

Introduzione

Nel processo di ottimizzazione di un intervento ferroviario, sia in fase di progettazione dell'opera che di gestione dell'esercizio, è necessario analizzare opportunamente le relazioni esistenti fra le diverse classi di variabili costituenti il complesso sistema "uomo - veicolo - infrastruttura"; ciò, per poter individuare compiutamente le azioni più idonee a massimizzare il comfort di marcia e la sicurezza, nel rispetto delle compatibilità ecosistemiche.

Inizialmente è stato definito il concetto di sicurezza ferroviaria contestualizzando tale concetto nell'ambito nazionale ed europeo passando in rassegna la normativa italiana e comunitaria e analizzando nelle sue parti il data base BDS di RFI che è utilizzato per l'implementazione del modello inferenziale.

A questo punto sono stati passati in disamina i vari sistemi tecnologici tracciando un percorso storico dell'evoluzione di questi ultimi e parallelamente, analizzando l'evoluzione nel tempo del concetto di sicurezza, sottolineando la fondamentale importanza che gli apparati tecnologici rivestono nell'ottimizzazione della sicurezza, soffermandosi in particolare sul sistema ERTMS/ETCS e su i suoi riflessi sull'interoperabilità ferroviaria, inquadrandolo nel contesto europeo.

Si è poi proceduto ad illustrare su quali basi si realizza il distanziamento ferroviario esaminando i vari tipi di segnalamento e le teorie che stanno alla base del calcolo della distanza di sicurezza, analizzando il concetto di potenzialità di un nodo ferroviario passando dal concetto di potenzialità teorica a quello di potenzialità pratica. Successivamente, è stato condotto

lo studio delle criticità di esercizio e si è visto come tale problema può essere ricondotto ad un problema geometrico di tipo Laplace. Infine è stata sviluppata un'apposita metodologia tramite un approccio integrato all'analisi del problema dell'analisi di rete, attraverso la rappresentazione geometrica in un iperspazio \mathfrak{R}_d , che affronta il complesso di problemi che hanno riflesso sull'esercizio ferroviario e si pone l'obiettivo di garantire nella massima sicurezza la mobilità promiscua sia dei convogli passeggeri che delle merci nella rete, ponendo l'attenzione al rispetto del comfort psicofisico del conducente e della connessa verifica puntuale del tracciato, anche sotto l'ottica delle possibili reazioni che si possono determinare durante il moto soprattutto in punti singolari o critici per la circolazione, garantendo all'utenza un ottimale qualità del viaggio, tutto ciò grazie ad un apposito codice di calcolo, denominato TrainDy che è in grado di simulare il comportamento dinamico longitudinale di un convoglio ferroviario nelle diverse condizioni di moto cui esso è sottoposto, che consente di determinare alcune grandezze, quali quelle cinematiche e le forze longitudinali che si trasmettono mediante respingenti e tiranti e quelle che ciascun veicolo scambia con le rotaie, permettendo così di arrivare a dedurre se l'utente si trova in una condizione di comfort o meno.

Capitolo 1

La sicurezza nel trasporto ferroviario

1.1 I “cardini” della sicurezza (norme, tecnologie, fattore umano, manutenzione)

La sicurezza della circolazione ferroviaria si basa essenzialmente sulla corretta esecuzione di ben individuate operazioni, nel rigoroso rispetto della normativa d’esercizio, preliminarmente a ogni movimento di treno, durante la circolazione e a viaggio concluso. Le operazioni salienti per la sicurezza della circolazione sono:

1. realizzazione e verifica della presenza sul percorso stabilito di tutte le condizioni necessarie alla marcia in sicurezza del treno;

2. comunicazione al treno, tramite il segnalamento e/o prescrizioni, dell'avvenuta verifica di cui al punto precedente e delle eventuali condizioni limitative legate al percorso;
3. condotta del treno nel rispetto delle informazioni ricevute e in conformità alle norme.

Idonee norme di esercizio, tese a codificare e standardizzare il comportamento degli operatori, regolando tutte le attività connesse con la sicurezza della circolazione ferroviaria; la loro complessità e articolazione è strettamente correlata alle capacità richieste agli operatori impiegati nell'espletamento di operazioni in sicurezza.

L'esperienza acquisita con il passare degli anni con il contestuale aumento della potenzialità delle linee e degli impianti e delle prestazioni dei mezzi di trazione ha evidenziato che le delicate fasi di verifica e controllo delle operazioni legate alla sicurezza di circolazione non possono più essere affidate completamente alla capacità dei singoli operatori; per gestire in sicurezza processi sempre più complessi si è reso necessario adottare sistemi tecnologici.

L'introduzione della tecnologia e, con essa, di nuovi componenti, prodotti e sottosistemi riduce il numero di operazioni affidate all'uomo e porta a rivedere il corpo normativo che sovrintende alla circolazione e all'esercizio ferroviario, richiedendo la stesura di norme idonee di uso e manutenzione delle apparecchiature introdotte e di gestione delle situazioni di degrado a seguito di momentanea indisponibilità dei sistemi tecnologici.

Contestualmente, è stato necessario rivedere le condizioni di fornitura e di utilizzo dei nuovi prodotti e sistemi:

- ai costruttori viene richiesto il rispetto di adeguati valori dei parametri di affidabilità, disponibilità, manutenibilità e sicurezza dei prodotti e sistemi da essi sviluppati e forniti;

- ai manutentori viene richiesta un'adeguata organizzazione, al fine di assicurare il rispetto delle norme di uso e manutenzione dei prodotti e sistemi a loro affidati e di garantire il mantenimento dei parametri richiesti per un ottimale utilizzo dell'infrastruttura, degli impianti tecnologici e del materiale rotabile.

Anche in questo nuovo scenario il comportamento dell'uomo, il cosiddetto "fattore umano", gioca un ruolo determinante, e la probabilità che un operatore compia errori deve essere continuamente ridotta, agendo su due fronti:

- sul fattore umano, tramite un'adeguata selezione e un efficace e continuo addestramento degli operatori, per affrontare nel migliore dei modi situazioni non interamente gestite dalla tecnologia, in particolare nelle aree operative situate alle interfacce (interfaccia operatore-macchina), nelle situazioni di degrado della stessa e nelle operazioni di manutenzione;

- sullo sviluppo di prodotti e sistemi a tecnologia innovativa che consentano di incrementare il livello d'automazione delle verifiche a terra, tramite apparati centrali e sistemi di blocco, fornendo al macchinista le informazioni necessarie per la condotta del treno in sicurezza:

1. in un primo tempo, tramite i segnali laterali, lasciando nella responsabilità del macchinista il rispetto delle informazioni e delle prescrizioni cartacee;

2. in anni relativamente recenti inviando direttamente a bordo le informazioni necessarie per un'interpretazione agevole da parte del personale di macchina e successivamente utilizzate per la verifica automatica del corretto operato del personale di macchina.

1.2 L'incidentalità ferroviaria

Il sistema ferroviario è uno dei più sicuri. Per avere un efficace indicatore del livello di sicurezza e come utile strumento di confronto fra le reti ferroviarie appartenenti all'UIC (l'Unione internazionale delle ferrovie), è stata da tempo standardizzata dall'UIC stessa la classificazione dei dati sull'incidentalità: nella “*Tabella A 91 – Incidenti dell'esercizio ferroviario*” ciascuna rete deve raccogliere e trasmettere annualmente all'UIC gli incidenti occorsi sulle linee principali e sui binari di servizio da essa gestiti, in piena linea e nell'ambito delle stazioni. Sono esclusi gli incidenti verificatisi all'interno delle officine, dei magazzini e dei depositi.

Nella Tabella A 91 sono annoverati gli incidenti che hanno avuto come conseguenza:

- la morte di persone (decedute sul colpo o entro i trenta giorni successivi all'incidente, per cause a esso legate) o il ferimento grave (persone che hanno subito ferite che hanno comportato un'incapacità lavorativa superiore ai 14 giorni, compreso quello dell'incidente), a esclusione dei suicidi e dei tentativi di suicidio; sono ugualmente escluse le morti criminali o naturali;

- avarie importanti al materiale rotabile, all'infrastruttura o agli impianti (danni superiori ai 10.000 euro), o una perturbazione importante del traffico (interruzione della circolazione dei treni sulla via principale per più di sei ore, deviazione o trasbordo dei viaggiatori).

In essa gli incidenti sono suddivisi in:

1. *collisioni* tra materiale rotabile (treni, manovre, locomotive isolate ecc.) o di materiale rotabile contro ostacoli (inclusi i veicoli stradali caduti sulla sede ferroviaria), esclusi gli incidenti classificati come “incidenti ai passaggi a livello”;
2. *deragliamenti* (dei treni, in manovra, delle locomotive isolate);
3. *altri incidenti che concernono il materiale rotabile*, come ad esempio gli incendi o le esplosioni, a esclusione degli incidenti “ai passaggi a livello” e “alle persone in relazione al materiale in movimento”;
4. *ai passaggi a livello*, cioè collisioni tra materiale rotabile e veicoli stradali ai passaggi a livello;
5. *alle persone in relazione al materiale in movimento*, che partecipano a un'operazione di manovra o di aggancio di veicoli, che stazionano o circolano nell'ambito della ferrovia, che sono urtate da un ostacolo o da un veicolo mentre sono trasportate da un veicolo ferroviario, che cadono da un veicolo ferroviario in movimento. Sono inclusi in questa categoria gli incidenti ai pedoni ai passaggi a livello.

Le categorie da 1 a 4 sono denominate “*incidenti tipici*”; la categoria 5 “*incidenti atipici*”. Per ciascuna di tali categorie è riportato il numero di casi verificatisi nell'anno preso in considerazione. È inoltre riportato il numero di viaggiatori, agenti ferroviari e altri estranei al servizio, morti o feriti per:

- collisioni o deragliamenti;
- altri incidenti.

Per compilare la tabella A 91, ma soprattutto per avere lo stato aggiornato della sicurezza ferroviaria, RFI si è dotata di un'apposita Banca dati sicurezza (BDS), nella quale vengono inseriti gli incidenti e le anomalie che accadono sulla rete FS.

1.3 Banca Dati Sicurezza della circolazione ferroviaria (BDS) per la rete italiana

Il data base utilizzato per l'implementazione del modello inferenziale è il Sistema Banca Dati Sicurezza della circolazione ferroviaria (di seguito indicata come BDS) di RFI, che è la società del gruppo Ferrovie dello Stato che gestisce la rete ferroviaria italiana nazionale regolandone la circolazione e manutenzione. RFI, come gestore dell'infrastruttura, ha fra le missioni primarie quella di garantire la sicurezza dei propri clienti. Uno dei fattori principali per il miglioramento della sicurezza ferroviaria è la prevenzione e a tale scopo, è stata realizzata la BDS.

Sostanzialmente la BDS risponde a due principali direttive:

1. Il DM 138/T del 31.10.2000 (Atto di concessione) che, tra l'altro, all'art. 7 comma 2 punto c), impone che il Gestore Infrastruttura *“garantisce al Ministro dei Trasporti e della Navigazione ed alle Imprese Ferroviarie l'accesso alla Banca Dati della sicurezza sulla circolazione ferroviaria costruita secondo gli standard riconosciuti in sede internazionale”*;

2. la Fiche A-91 dell'UIC (Union Internationale des Chemins de fer) che definisce un incidente in maniera omogenea ed univoca per tutti i Paesi aderenti.

Il Sistema è operativo dal 01.01.2001 e nel febbraio del 2002 è stato certificato in qualità da una terza parte indipendente (il TÜV) secondo le Norme UNI EN ISO 9001:2000.

Oltre agli incidenti UIC sopra descritti, RFI registra anche tutti quegli incidenti che non hanno raggiunto le soglie indicate (denominate “*Incidenti lievi*”) e, soprattutto, tutti quegli eventi potenzialmente pericolosi che, pur non avendo conseguenze, avrebbero potuto degenerare in incidenti (definiti “*Situazioni anomale*”).

Per fornire una dimensione degli eventi inseriti, la BDS registra mediamente 1.000 eventi al mese, di cui circa il 2% sono “*Incidenti UIC*”, circa il 18% sono “*Incidenti lievi*” ed il restante 80% sono “*Situazioni anomale*”.

In particolare la BDS funziona in modo tale che ogni informazione pervenuta viene inserita nel sistema secondo un “*Albero delle cause*” che codifica gli eventi partendo dalla macrotipologia dell'incidente (es: incidente “*Tipico*” in circolazione) snodandosi per i vari rami di livello inferiore: *Macroclassifica* (es: urto, svio, altro), *Classifica* (es: urto tra treni che marciano in senso opposto), *Situazione anomala* che ha determinato l'evento (es: SPAD – Indebito supero di segnale disposto a via impedita), una *Causa primaria* (es: inosservanza dei regolamenti) ed infine una *Causa secondaria* (es: disattenzione). Per una rappresentazione cosmetica di quanto detto si veda la figura seguente:

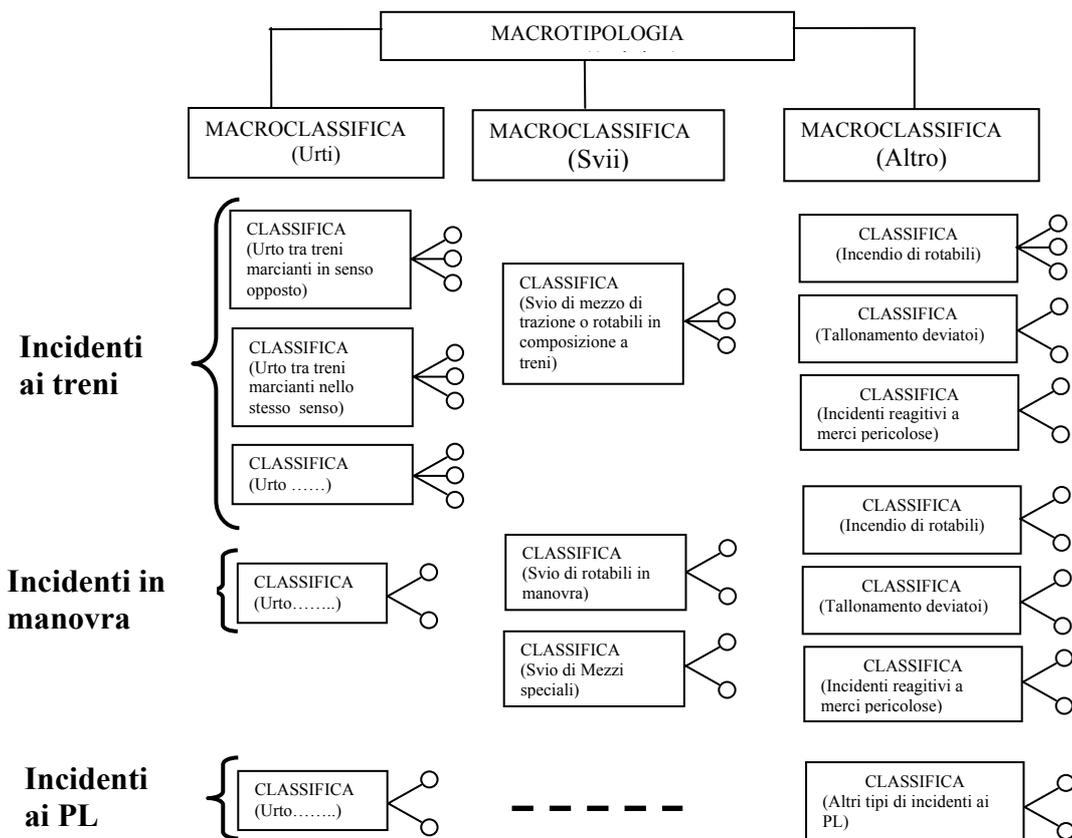


Fig. 1.1: Rappresentazione ad albero delle cause

1.4 Contesto normativo attuale

La sicurezza della circolazione

La sicurezza della circolazione ferroviaria è disciplinata dai seguenti atti legislativi:

- DPR 11 luglio 1980 n. 753 “Nuove norme in materia di polizia, sicurezza e regolarità dell’esercizio delle ferrovie e di altri servizi di trasporto”;
- DPR 8 luglio 1998 n. 277 “Regolamento recante norme d’attuazione della direttiva 91/440 CEE relativa allo sviluppo delle ferrovie comunitarie”;
- DPR 16 marzo 1999 n. 146 “Regolamento recante norme d’attuazione della direttiva 95/18/CE, relativa alle licenze delle imprese ferroviarie, e della direttiva 95/19/CE, relativa alla ripartizione delle capacità di infrastruttura ferroviaria e alla riscossione dei diritti per l’utilizzo dell’infrastruttura”

Ulteriori atti rilevanti sono:

- Provvedimento del Ministero dei Trasporti e della Navigazione 247/VIG3 del 22 maggio 2000;
- Decreto ministeriale 31 ottobre 2000 n. 138-T (Atto di concessione).

Tali atti, oltre a individuare i diversi attori coinvolti nel processo – Ministero-Servizio di vigilanza, gestore infrastruttura (Rete Ferroviaria Italiana), imprese ferroviarie – e fissarne i relativi ruoli e obblighi, sanciscono, all’articolo 8 del DPR 11 luglio 1980, n. 753, il principio fondamentale cui il sistema deve riferirsi nell’espletamento delle varie

attività ("Nell'esercizio ferroviario si devono adottare le misure e le cautele suggerite dalla tecnica e dalla pratica atte a evitare sinistri") e, più recentemente, introducono, ai punti 4.1 j) e 5.2 b) della Determinazione dirigenziale 247/VIG3 del 22 marzo 2000, il concetto della minimizzazione del rischio d'incorrere in eventi incidentali, quale obiettivo connesso alla costituzione e al mantenimento di un'organizzazione in grado di coordinare tutte le attività e i processi di competenza dei vari operatori.

Per ciò che riguarda la potestà normativa e le funzioni di vigilanza e controllo, la situazione delineata dalle leggi sopra indicate è la seguente:

- il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti è l'organismo che definisce gli standard e le norme di sicurezza, su proposta del gestore dell'infrastruttura ferroviaria, e controlla la loro applicazione da parte del gestore dell'infrastruttura (art. 7 comma 1 DPR 146/99);
- il gestore dell'infrastruttura, individuato dall'art. 3 comma 1 del DPR 277/98 come incaricato prevalentemente della costruzione e della manutenzione di una infrastruttura ferroviaria, nonché della gestione dei sistemi di controllo e di sicurezza connessi alla circolazione dei convogli, è l'organismo che emana le prescrizioni e le disposizioni attuative in materia di sicurezza di circolazione ferroviaria in applicazione degli standard e norme di sicurezza definiti dal ministero (art. 7 comma 4 e art. 11 comma 1 DPR 146/99); inoltre rilascia il certificato di sicurezza alle imprese ferroviarie e vigila su di esse in merito all'applicazione delle norme e standard ministeriali e delle disposizioni e prescrizioni da lui stesso emesse (art. 7 commi 6 e 7 DPR 146/99).

Tutto questo sulla base della qualificazione (Atto di concessione DM 138T 31.10.2000) attribuitagli dallo stesso ministero: il gestore dell'infrastruttura è organismo tecnico dotato di comprovata esperienza, idonee competenze e adeguata organizzazione in materia di sicurezza, esercita i compiti e le attività previsti dal DPR n. 277 del 1998 e dal DPR n. 146 del 1999, in conformità alle prescrizioni di cui al DPR 11 luglio 1980 n. 753, nonché agli standard e norme di sicurezza definiti. Inoltre, esercita le funzioni e i poteri pubblicistici già attribuiti da norme di legge o regolamento alla cessata Azienda autonoma FS e al cessato Ente FS (art 7 DM 138-T/2000).

Il quadro di riferimento normativo delineato dai DPR 277/98 e 146/99 non rappresenta una discontinuità rispetto alla legislazione precedente, e tuttora vigente, costituita dal DPR 753/80, poiché al titolo IX (artt. 95, 96, 97, 98, 99) vengono infatti individuati gli organi competenti a emanare norme regolamentari e disposizioni interne. Anche in questo caso vengono indicati due livelli: uno ministeriale e l'altro interno all'allora Azienda autonoma FS.

Il riallineamento al nuovo quadro di riferimento e la validazione di tutto il corpo normativo esistente sono stati realizzati dal provvedimento del Ministero dei Trasporti e della Navigazione 247/VIG3 del 22 maggio 2000 nel quale vengono elencati gli standard e le norme di sicurezza definite nella competenza del ministero (art. 1) e le disposizioni e prescrizioni definite ed emanate dal gestore dell'infrastruttura (art. 3). Tra le prime annoveriamo il Regolamento per la circolazione dei treni (RCT) e il Regolamento sui segnali (RS).

1.5 Gli organismi internazionali

AEIF (Associazione europea per l'interoperabilità ferroviaria)

È l'associazione indicata dalla Commissione europea quale “organismo comune rappresentativo” previsto dalle Direttive UE 96/48 (relativa all'alta velocità ferroviaria europea) e 2001/16 (relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale) per l'elaborazione delle STI (Specifiche tecniche d'interoperabilità). Tali STI saranno utilizzate dagli organismi notificati degli Stati membri per le verifiche di conformità dei sottosistemi e componenti d'interoperabilità. L'AEIF ha sede a Bruxelles e vi partecipano le organizzazioni internazionali delle ferrovie (UIC, CCFE), dell'industria (UNIFE), dei trasporti pubblici (UITP).

UIC (Union internationale des chemins de fer)

Ha sede a Parigi e dal 1922 raggruppa in associazione gli enti ferroviari nazionali nel mondo, con la missione di promuovere la cooperazione tra gli enti ferroviari sul piano mondiale e svolgere attività per lo sviluppo del trasporto ferroviario internazionale.

Tra le varie attività dell'UIC sono comprese la preparazione e l'emissione di norme, prescrizioni e raccomandazioni (le cosiddette “fiches”). Storicamente le “fiches” UIC hanno rappresentato un importante riferimento tecnico-normativo per tutte le ferrovie. Esse, pur nella loro riconosciuta validità tecnica, sono comunque emanate da un'associazione tra enti e non hanno valore cogente.

ERRI (European Railway Research Institute)

Ha sede a Utrecht. Creato nel 1950, ha lo scopo di mettere in comune i risultati raggiunti dalle ferrovie aderenti nelle ricerche e negli esperimenti di carattere tecnico, nonché i mezzi materiali necessari per eseguirli. La sua attività si estende al materiale rotabile, al binario, al segnalamento, all'elettrificazione e ai problemi tecnici in genere.

CCFE (Communauté de chemins de fer européens)

La missione della CCFE comprende i seguenti punti:

- garantire gli interessi dei membri nei rapporti con le istituzioni europee nel campo della politica comune dei trasporti;
- valutare l'impatto della legislazione europea del trasporto;
- impostare progetti e studi comuni;
- agire da portavoce della comunità ferroviaria europea.

La CCFE lavora in collaborazione con l'UIC; mentre la CCFE è responsabile dell'ambito politico, l'UIC fornisce il supporto tecnico. Gli argomenti presi in esame dalla CCFE hanno riguardato, tra gli altri, l'armonizzazione delle norme relative all'organizzazione del lavoro in ambito ferroviario e la presentazione alla Commissione europea di elementi per la predisposizione della Direttiva europea sulla sicurezza ferroviaria.

Ha sede a Bruxelles; vi partecipano le ferrovie degli Stati membri dell'Unione Europea più la Svizzera e la Norvegia; a tali paesi si sono aggiunti altri 8 paesi dell'Europa centro - orientale, candidati a far parte dell'Unione Europea.

CEN (Comitato europeo per la normazione)

È un Comitato europeo preposto alla definizione di standard relativi a prodotti e servizi tecnici, esclusi quelli riguardanti prodotti e servizi elettrotecnici per i quali l'organismo competente è il CENELEC, e quelli relativi alle telecomunicazioni per i quali l'organismo interessato è l'ETSI.

Il CEN è strutturato in Comitati tecnici (TC = Technical Committee), che attualmente sono oltre 250. Il Comitato tecnico CEN che si occupa della materia ferroviaria è il TC 256. Esso è diviso in Gruppi di lavoro (WGs = Working Groups), che elaborano Progetti di norma europea (EN) su molteplici aspetti d'interesse delle amministrazioni e dell'industria ferroviaria (binari, ruote, freni, rumore, aerodinamica ecc.).

Il CEN è coordinato, per le attività che hanno validità anche in campo extraeuropeo, con l'ISO, che s'interessa della definizione degli standard internazionali.

Membro nazionale italiano del CEN è l'UNI.

CENELEC (Comitato europeo per la normazione in campo elettrico)

È preposto alla definizione degli standard che definiscono le condizioni per l'accesso ai prodotti e di servizi elettrotecnici nel mercato europeo. I lavori del CENELEC sono coordinati con quelli dell'IEC, organizzazione che si occupa della definizione degli standard elettrici e per le telecomunicazioni in campo mondiale.

Membro nazionale italiano del CENELEC è il CEI.

ETSI (European Telecommunications Standards Institute – Ente europeo per gli standard delle telecomunicazioni)

È un'organizzazione, ufficialmente riconosciuta dalla Commissione Europea, la cui missione è la produzione di standard relativi alle telecomunicazioni, fornendo supporto all'armonizzazione globale nel settore. *CEMT (Conférence européenne des ministres des Transports)* ha lo scopo di prendere tutte le misure intese a realizzare la migliore utilizzazione e lo sviluppo più razionale dei trasporti europei di superficie aventi importanza internazionale nonché di coordinare e promuovere i lavori delle organizzazioni internazionali che si occupano di tali trasporti. L'Italia vi aderisce dalla sua istituzione (1953). Ne fanno parte i ministri dei Trasporti di 19 paesi europei. La Conferenza ha l'obiettivo di adottare le misure idonee a realizzare la migliore utilizzazione e lo sviluppo più razionale dei trasporti interni europei d'importanza internazionale e di coordinare e promuovere i lavori delle organizzazioni internazionali che si occupano di trasporti interni europei.

OTIF (Organizzazione intergovernativa per il trasporto internazionale ferroviario)

È un'organizzazione tra vari Stati europei, sia comunitari sia extracomunitari, con sede a Berna. Essa è preposta a regolare i rapporti fra gli Stati membri al fine del rispetto e dello sviluppo della Convenzione COTIF (Convenzione relativa ai trasporti internazionali ferroviari). La COTIF scaturisce dall'esigenza di uniformare le regole per il contratto di trasporto ferroviario allo scopo di limitare i disagi derivanti ai traffici internazionali dalla diversità delle legislazioni nazionali. L'attività

dell'OTIF si esplica principalmente attraverso un costante adeguamento delle norme del diritto del trasporto all'evoluzione economica e tecnologica del settore ferroviario.

La stesura/modifica della COTIF interessa i regolamenti in essa contenuti, tra cui:

- CIV (contratto di trasporto internazionale viaggiatori e bagagli);
- CIM (contratto di trasporto internazionale merci);
- RIC (contratto di utilizzazione reciproca e immatricolazione delle carrozze);
- RIV (contratto di utilizzazione reciproca e immatricolazione dei veicoli);
- RID (regolamento per il trasporto internazionale ferroviario delle merci pericolose);

CIT (Comité international des transports ferroviaires)

Il CIT è un organismo ferroviario che ha per scopo lo sviluppo del diritto internazionale dei trasporti ferroviari sulla base della Convenzione relativa ai trasporti internazionali ferroviari (COTIF) e delle sue appendici CIV (regole uniformi per il contratto di trasporto internazionale viaggiatori e bagagli) e CIM (regole uniformi per il contratto di trasporto internazionale merci); possono aderire al CIT le aziende ferroviarie degli Stati che applicano la COTIF.

FTE (Forum train Europe)

Organismo interferroviario di coordinamento della capacità infrastrutturale. Sostituisce CEM e CEH (conferenze degli orari merci e viaggiatori) dal 1997.

GEIE-ERTMS (Gruppo europeo d'interesse economico per lo sviluppo del sistema europeo di gestione del traffico ferroviario)

I GEIE sono organismi d'azione comune retti a titolo primario dalle norme del diritto comunitario europeo. In ambito ferroviario sono stati costituiti diversi GEIE (ad esempio per concretizzare accordi multilaterali relativi alla circolazione di determinati treni internazionali).

Il GEIE-ERTMS, con sede a Bruxelles, ha l'incarico di sviluppare, insieme alle industrie europee di segnalamento ferroviario, le specifiche del sistema europeo di controllo della marcia dei treni (ERTMS/ETCS).

1.6 L'organizzazione della sicurezza nelle altre principali reti europee

Ciascuna amministrazione ferroviaria è soggetta alle leggi e alle disposizioni dello Stato al quale appartiene. Ciò ha delineato nel corso degli anni organizzazioni e approcci diversi in materia di sicurezza dell'esercizio. Solo negli ultimi anni, in seguito all'emanazione delle Direttive riguardanti le ferrovie, si assiste a un riallineamento a livello europeo.

Nella tabella 1.1 sono riepilogati i diversi approcci in materia di sicurezza di Francia, Germania, Spagna, Gran Bretagna. È, quindi, riportata, per ciascuno di tali Stati, l'organizzazione in materia di sicurezza dell'esercizio.

Organizzazione della sicurezza in alcuni paesi europei				
	Francia	Germania	Spagna	Gran Bretagna
Metodologia di stima del rischio	ORA ¹	ORA	Valutazione degli esperti	ORA
Costo che si è disposti a sostenere per salvare una vita umana	€ 6M ²	Non pubblicato	ND ³	€ 1.5M/€ 5M ⁴
Numero di feriti gravi/lievi equivalenti a un morto	ND ⁵	10/100	ND	10/200
Ispettorato (inclusa l'omologazione di nuovo materiale rotabile)	Ente non indipendente	Ente governativo	Gestore dell'infrastruttura	Ente governativo
Criteri legali per scelte relative alla sicurezza	Conforme alla normativa	Conforme e ragionevole	Conforme alla normativa	Ragionevolmente praticabile
Analisi costi/benefici per l'adozione di interventi in materia di sicurezza	Sì	No	ND	In parte
Obbligatorietà dell'uso dello "stato dell'arte"	No	Sì	No	No

¹ Analisi del rischio quantitativa.
² È giustificata una spesa di € 150M per evitare una morte accidentale all'anno per la durata dell'investimento. Si presume che la vita sia di 25 anni.
³ Non applicabile.
⁴ Il valore più alto è relativo a più di un morto.
⁵ Il modello francese è riferito a "eventi critici" che potrebbero recare ai passeggeri danni fisici diversi dalla morte. Non c'è diretta connessione tra feriti e morti.

Tab. 1.1: Organizzazione della Sicurezza nei principali Paesi Europei

FRANCIA

RFF e SNCF sono enti pubblici, di proprietà dello Stato. RFF è stata individuata come il proprietario dell'infrastruttura, per conformarsi alla Direttiva 91/440. Ha ereditato l'infrastruttura e i debiti pregressi delle ferrovie (circa Euro 21 miliardi). È responsabile del finanziamento della manutenzione ordinaria e dello sviluppo dell'infrastruttura. RFF ha un contratto (di circa Euro 2,5 miliardi l'anno) con la divisione infrastruttura di SNCF per la gestione della rete e riceve una concessione dallo Stato per i miglioramenti (circa Euro 3 miliardi l'anno).

La Divisione esercizio di SNCF è responsabile dei servizi di trasporto ferroviario. Essa paga RFF per l'utilizzo della rete (circa Euro 1.5 miliardi l'anno). Non ci sono operatori ferroviari privati e la legislazione al riguardo non è ancora completa. I soli treni che percorrono l'infrastruttura ferroviaria francese non posseduti o gestiti da SNCF sono quelli degli operatori stranieri (in particolare merci), delle associazioni internazionali di cui SNCF è membro (Eurostar, Thalys) e della Metro di Parigi.

SNCF mantiene i rapporti con le altre parti in causa, come gli enti locali, i passeggeri e gli altri operatori che utilizzano l'infrastruttura. RFF tratta con le autorità nazionali, regionali e municipali per quanto riguarda la pianificazione delle nuove linee, ma non per i servizi esistenti.

La supervisione del governo è divisa tra il ministero dei Trasporti (per questioni d'esercizio) e il ministero delle Finanze (per questioni economiche). Non c'è un regolatore indipendente per la sicurezza o i servizi. I ministeri non sono competenti per dirimere le dispute tra RFF e SNCF.

Responsabilità per le decisioni in materia di sicurezza

SNCF è responsabile della sicurezza delle ferrovie, sia direttamente come impresa ferroviaria che gestisce i treni, sia indirettamente come incaricato da RFF di gestire l'infrastruttura. Essa è in grado di svolgere questa mansione per ciò che riguarda l'amministrazione dei beni esistenti, inclusi la loro manutenzione e i rinnovi ordinari. RFF decide se approvare investimenti per nuovi lavori, o se derogare alla pratica consolidata, il che lascia SNCF in una posizione contraddittoria: è responsabile per la

sicurezza, ma non per le decisioni sugli investimenti necessari per la sicurezza.

Il bilancio complessivo per gli investimenti ferroviari è approvato dal Ministero dei Trasporti (e da quello delle Finanze). Il Ministero non ha grande competenza tecnica, quindi questo processo d'approvazione è soprattutto amministrativo.

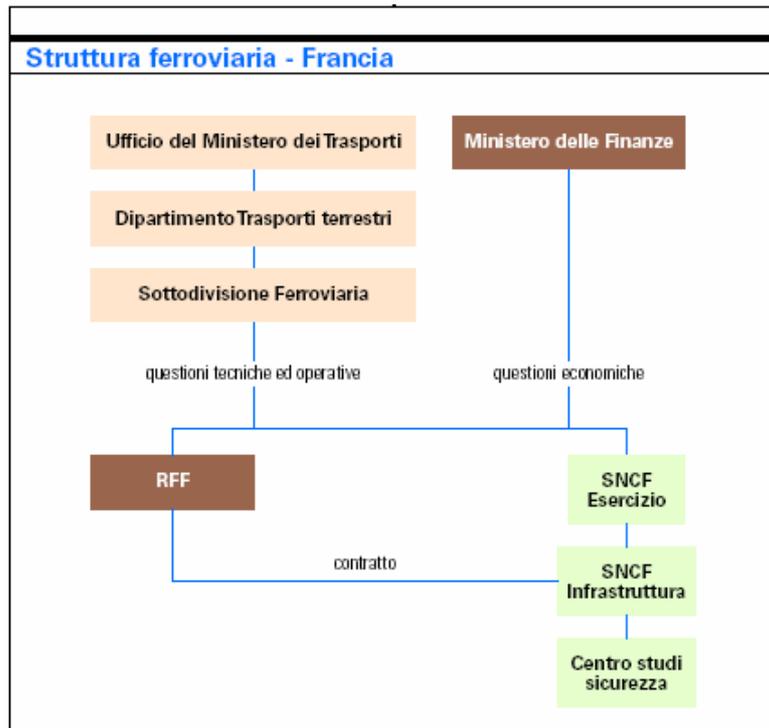


Fig. 1.2: Struttura ferroviaria francese

GERMANIA

Le divisioni operative (società affiliate: infrastruttura, imprese di trasporto ecc.) non sono ancora società separate, sebbene ognuna mantenga il proprio conto di profitti e perdite.

La diversificazione viene portata avanti secondo la “Eisenbahnneuordnungsgesetz”, che contiene la cosiddetta “Bahnreform” (riforma della ferrovia). DB è interamente di proprietà dello Stato. DB Netz AG (gestore dell’infrastruttura) stipula contratti di manutenzione e di costruzione di nuove infrastrutture con altre società, incluse società private e sue consociate.

Responsabilità per le decisioni che riguardano la sicurezza

Ci sono tre attori coinvolti nella sicurezza:

- DB AG a livello di consiglio di amministrazione;
- Eisenbahnbetriebsleiter all’interno di ogni società operativa (che lavora con gruppi che riuniscono esperti di diverse divisioni);
- EBA (Eisenbahn - Bundesamt), è l’ufficio federale delle ferrovie tedesche che sovrintende la sicurezza.

La responsabilità formale per le decisioni che riguardano la sicurezza è del consiglio d’amministrazione di DB AG. È questo è il livello al quale si incontrano i settori sicurezza, tecnico e d’esercizio della compagnia.

Eisenbahnbetriebsleiter sono impiegati DB con qualifiche e competenza adeguate a identificare e valutare il rischio sicurezza. DB propone a EBA che una persona diventi un Eisenbahnbetriebsleiter, EBA controlla che

egli abbia la competenza necessaria prima di concedere la licenza. È responsabilità dell'Eisenbahnbetriebsleiter agire indipendentemente e fare consulenze al consiglio d'amministrazione in materia di sicurezza. L'obbligo di avere un Eisenbahnbetriebsleiter è sancito in una nuova direttiva ("Verordnung über die Bestellung, Bestätigung und Prüfung von Betriebsleitern sowie deren Aufgaben und Befugnisse"). EBA è l'autorità nazionale per la ferrovia. In tale ambito essa opera come legislatore in materia di sicurezza. È parte del governo federale ed è responsabile dell'approvazione di nuove norme su infrastrutture e materiale rotabile, per l'omologazione degli operatori e per l'approvazione dei sistemi ferroviari d'esercizio.

Gli operatori ferroviari stranieri devono ottenere la licenza da EBA e l'approvazione di DB Netz per operare sull'infrastruttura DB AG.

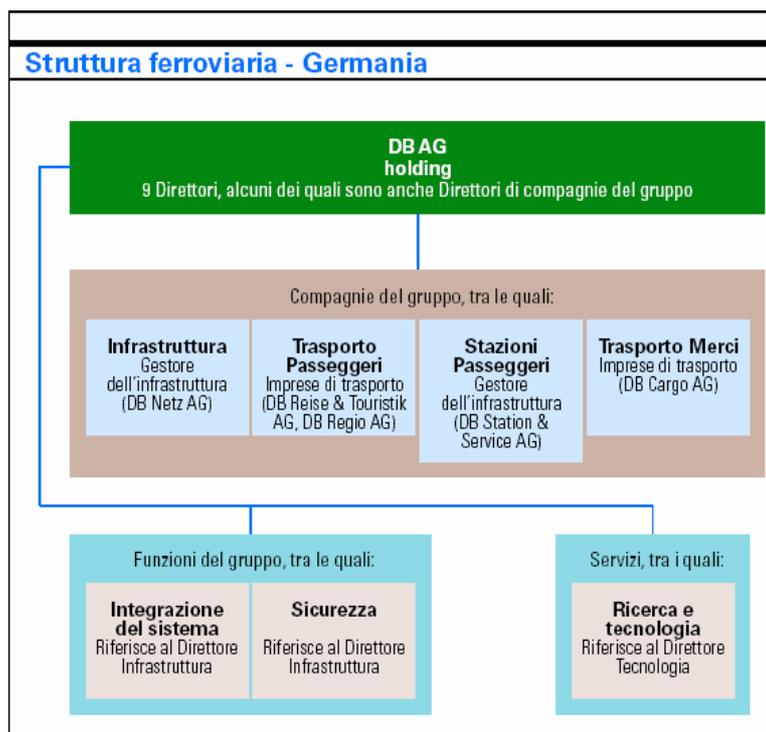


Fig. 1.3: Struttura ferroviaria tedesca

SPAGNA

Il GIF è un ente separato, responsabile della costruzione delle nuove linee ad alta velocità, che saranno successivamente gestite e mantenute in efficienza da RENFE, che possiede il materiale rotabile.

Non ci sono ancora compagnie di trasporto private, ma alcune società hanno manifestato interesse a gestire servizi di trasporto a lunga distanza. Ci sono inoltre alcune ferrovie regionali gestite dagli enti locali e che non fanno parte della rete RENFE.

Responsabilità per le decisioni che riguardano la sicurezza

La responsabilità dell'approvazione del materiale rotabile, del controllo della sicurezza d'impianti e infrastrutture e dell'abilitazione dei macchinisti e dell'altro personale coinvolto nella sicurezza è attribuita alla Dirección de protección civil y seguridad en la circulación (Direzione sicurezza). La Direzione sicurezza mantiene inoltre un registro di ogni elemento del materiale rotabile, connesso in tempo reale al sistema di gestione del traffico, in modo tale che nessun veicolo possa essere utilizzato quando, per esempio, abbia superato l'intervallo limite per la manutenzione. Lo scopo complessivo è usare la tecnologia per ridurre la probabilità dell'errore umano. La Direzione sicurezza nomina la Commissione sicurezza, riunendo insieme i rappresentanti di ogni unità aziendale (e altri azionisti come le Unioni di commercio) per assicurarsi che tutte le questioni (commerciale, finanziaria, operativa, personale, ecc.) siano prese in considerazione quando si esamina la sicurezza.

La misura del successo di RENFE è il numero annuale di incidenti, tenendo conto del fatto che gli incidenti che presentano un costo finanziario inferiore alle 300.000 pesetas (circa Euro 1800) sono ignorati. Questa misura non distingue gli incidenti che causano lesioni o morte da quelli che causano danni materiali, ma si sostiene che le misure indirizzate a questi ultimi aiutino anche a ridurre i primi e perciò questo è un indicatore efficace. RENFE ha scarsa o nulla responsabilità per azioni illegali di altri, come incidenti a pedoni che ignorino un segnale che proibisca loro di attraversare i binari, o ai guidatori sui passaggi a livello che ignorano gli avvertimenti. La decisione finale di spendere denaro su

investimenti per migliorare la sicurezza è attribuita al Ministero dei Trasporti. RENFE riconosce che il budget è limitato e perciò il Ministero deve, con l'aiuto di RENFE, scegliere tra investimenti in sicurezza alternativi.

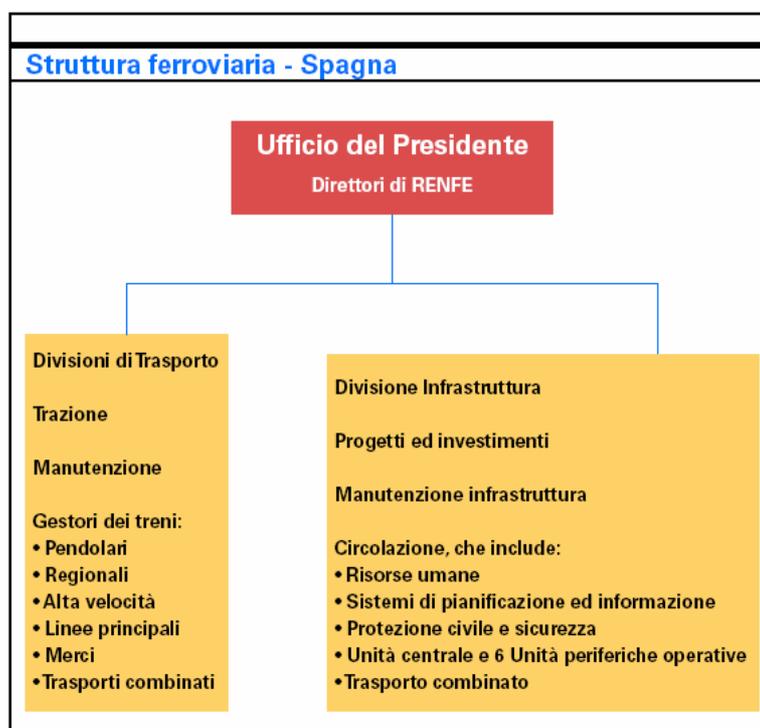


Fig. 1.4: Struttura ferroviaria spagnola

GRAN BRETAGNA

Railtrack è una società privata, proprietaria dell'infrastruttura e responsabile della gestione del traffico e della manutenzione. Le imprese di trasporto passeggeri espletano il servizio con materiale rotabile fornito

in leasing da società proprietarie (ROSCO) o dai costruttori. Le imprese di trasporto merci sono invece proprietarie del materiale rotabile che utilizzano. Railtrack è supervisionata dall'Ufficio del regolatore ferroviario, che supervisiona anche i rapporti fra le imprese di trasporto. Le licenze per gestire servizi passeggeri e merci sono rilasciate dall'Autorità strategica ferroviaria (SRA). SRA è anche responsabile per l'attivazione dello sviluppo di una nuova infrastruttura.

Responsabilità per le decisioni che riguardano la sicurezza

Ogni società deve rispettare la legge sulla salute e sicurezza sul lavoro (HSWA) del 1974, che impone una precisa responsabilità per ogni danno subito da dipendenti o altri, a meno che la società possa provare che non era ragionevolmente percorribile la riduzione del rischio che quel danno accadesse.

Railtrack e le imprese ferroviarie sono tenute a sottoporre un Dossier di sicurezza all'Ispettorato ferroviario (HMRI), l'Autorità della sicurezza, spiegando in dettaglio come adempiranno al proprio compito in conformità al HSWA. Queste compagnie costituiscono anche il "Railway Group", e si richiede loro di rispettare gli standard del Railway Group (RGS). I ROSCO non sono membri del Railway Group, sebbene come possessori del materiale rotabile siano spesso responsabili dell'adozione delle misure di sicurezza richieste dagli RGS. Gli RGS definiscono le modalità sicure di lavoro e d'interfacciamento tra operatori e sono amministrate da "Railway Safety", una sussidiaria del Gruppo Railway.

Railway Safety ha anche una missione più ampia: fornire consulenza e direzione industriale nell'amministrazione della sicurezza e assumere la direzione dei consulti industriali con il governo e HMRI riguardo la sicurezza.

Tutti i nuovi lavori e materiale rotabile devono essere approvati da HMRI, sebbene il processo d'approvazione non esamini il progetto o la realizzazione nel dettaglio. Le compagnie restano responsabili anche se HMRI ha concesso l'approvazione. Le principali decisioni sulla sicurezza sono in pratica prese dal governo tramite il dipartimento Ambiente, Trasporto e Regioni (DETR) ed entrano in vigore con la pubblicazione dei requisiti legali ai quali le compagnie devono rispondere.

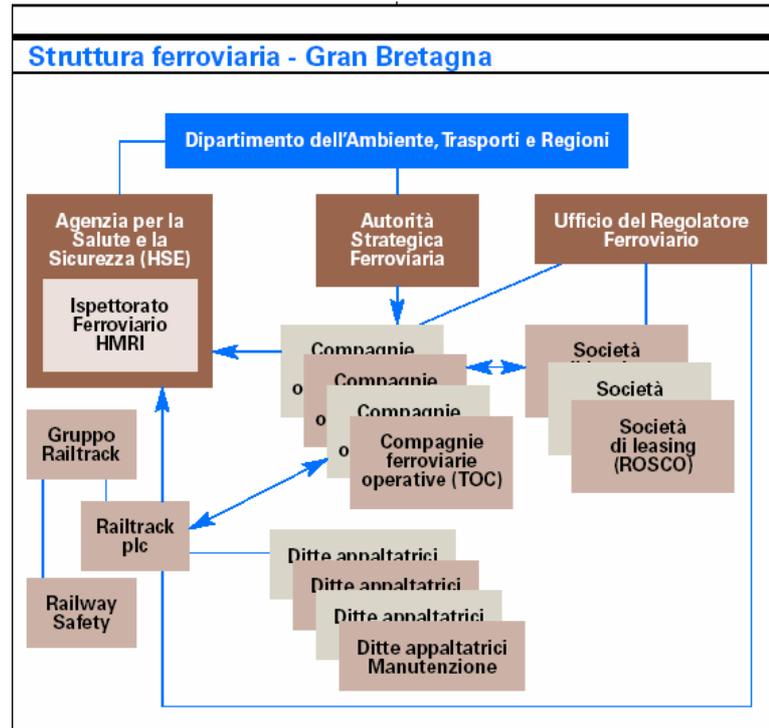


Fig. 1.5: Struttura ferroviaria inglese

1.7 Lo sviluppo del sistema

1.7.1 Le prospettive di evoluzione del contesto normativo attuale

Il quadro legislativo delineato al precedente punto è destinato a subire alcune modifiche legate al recepimento delle direttive europee di più recente emanazione che hanno modificato le preesistenti in materia di libero accesso, certificazione di sicurezza, assegnazione delle tracce e hanno introdotto il concetto di interoperabilità delle rete europea convenzionale.

1.7.2 Le prospettive di evoluzione del contesto normativo comunitario e internazionale

I due principali processi normativi in corso a livello europeo sono:

- l'elaborazione delle Specifiche tecniche d'interoperabilità per la rete convenzionale (STI CR);
- la proposta di una Direttiva europea sulla sicurezza ferroviaria e di un regolamento che istituirà l'Agenzia ferroviaria europea di coordinamento delle autorità nazionali per la sicurezza ferroviaria.

L'elaborazione delle STI CR è attualmente in fase avanzata.

In ogni caso, anche se tra i requisiti essenziali imposti dalla Direttiva 16/2001, come del resto la 96/48 relativa all'interoperabilità della rete AV, è presente la sicurezza, l'attestazione di conformità alle STI riguarda l'interoperabilità del sottosistema o componente sottoposto a verifica; per l'immissione in esercizio saranno sempre necessarie le verifiche della "Safety Authority" competente.

Proprio per armonizzare a livello europeo gli aspetti strettamente legati alla sicurezza è in fase di elaborazione la proposta di una Direttiva europea per la sicurezza ferroviaria, che presenta alcuni contenuti innovativi, peraltro per molti aspetti in linea con quello che sta facendo RFI in termini di sicurezza.

Capitolo 2

Le componenti tecnologiche

2.1 Introduzione

Lo sviluppo tecnologico nel periodo attuale ha consentito l'introduzione di alcune importanti innovazioni nella gestione in sicurezza della circolazione ferroviaria. Le novità più rilevanti riguardano:

- l'estensione del BACC (Blocco Automatico a Correnti Codificate);
- i sistemi di comando e controllo della marcia dei treni (SCMT, Vigilante, ERTMS/ETCS);
- i nuovi sistemi di comunicazione terra-treno (GSM-R);
- gli apparati centrali di stazione e i relativi sistemi di comando e controllo a distanza degli stessi;
- i sistemi di rilevamento temperature boccole calde (RTB).

2.2 Il Blocco Automatico a Correnti Codificate (BACC)

Il Blocco automatico a correnti codificate (nel seguito BACC) è stato il primo sistema installato sulla rete FS in grado di inviare direttamente a bordo le informazioni necessarie alla condotta in sicurezza del treno.

Esso in realtà è stato introdotto principalmente per innalzare la velocità consentita oltre i 150 km/h, riportando in cabina di guida l'informazione sul numero di sezioni di blocco disponibili per il treno istante per istante. È stato poi possibile sfruttare la presenza a bordo di questa informazione anche per proteggere, nei limiti consentiti dalla tecnologia disponibile, la marcia del treno da alcuni eventuali errori di guida del personale di macchina.

Tale protezione non è però completa dal momento che, ad esempio, l'attivazione automatica della frenatura d'emergenza non garantisce in ogni situazione l'arresto del treno prima del punto protetto da un segnale (scambio, paraurti, treno precedente) in caso di un indebito superamento a via impedita del segnale stesso.

La presenza di tratti di linea non attrezzati con il BACC, intercalati a tratti attrezzati, è comunque ritenuta una situazione non ottimale, richiedendo al macchinista frequenti azioni sul dispositivo di bordo e cambiamento di modalità di guida (passaggio dalla sola osservanza del segnalamento esterno all'osservanza del segnalamento esterno più quello di cabina).

Le FS prima, e RFI ora, hanno attivato una serie di interventi finalizzati all'eliminazione di tali situazioni, venutesi a creare principalmente per le differenti epoche di attrezzaggio di tratti di linea adiacenti.

2.3 ATC, SCMT, VIGILANTE

La complessità realizzativa, unitamente all'elevato costo e alla solo parziale efficacia nel verificare il corretto operato del personale di macchina, ha limitato l'impiego del BACC alle linee principali.

Per attuare un intervento complessivo sull'intera rete e sull'intero sistema ferroviario, le FS hanno attivato il progetto *Automatic Train Control*, più brevemente ATC, la cui fase pilota, concentrata nel nodo di Cremona (300 km complessivi), fu completata alla fine del 1998.

L'ATC, concepito per assicurare il controllo completo della marcia del treno, deve necessariamente garantire il corretto esercizio in tutte le condizioni di funzionamento normali o degradate, rendendo pertanto difficoltoso il raggiungimento concreto degli obiettivi prestazionali nei tempi fissati, per la complessità degli interventi necessari. Sarebbe stato possibile attrezzare 7.500 km di rete, con problemi di passaggio da una linea ATC a una non attrezzata con tale sistema, maggiori di quelli evidenziati per le discontinuità del BACC.

Tra l'altro, il programma di sviluppo, l'ambito d'applicazione e le funzionalità del sistema ATC progettato in Italia erano molto simili a quelle dell'ATC europeo, l'ERTMS/ETCS, sistema in studio nell'ambito della realizzazione della rete interoperabile europea e attualmente ancora in fase di sperimentazione con il concorso di tutte le reti ferroviarie.

Pertanto, pur confermando la scelta di attrezzaggio definitivo delle linee con il sistema ERTMS/ETCS, la copertura in tempi accettabili dell'intera rete attuale FS è garantita, su 5.500 km di linee attuali a velocità massima inferiore a 100 km/h e traffico limitato a non più di 60 treni al giorno per

binario, dal Vigilante, supportato eventualmente da tecnologie semplificate di supporto alla condotta, e sui 10.500 km di rete commerciale dal SCMT; l'ERTMS/ETCS è destinato inizialmente alle linee AV, in attesa dell'emanazione delle Specifiche tecniche d'interoperabilità per la rete convenzionale. Il Vigilante e il SCMT sono progettati in modo da poter essere "upgradati" verso l'ATC.

Il "Vigilante" è un dispositivo di bordo che verifica, a treno in movimento, in modo continuo la presenza dell'agente di condotta al posto di guida e, a intervalli di tempo o spazio, che l'agente di condotta sia cosciente e capace di reagire.

Il dispositivo Vigilante entra in funzione non appena il mezzo si muove (al massimo 6 km/h) e richiede un'azione continua su un apposito organo d'interfaccia (pedale, pulsante ecc.).

Se l'agente di condotta rilascia l'interfaccia, essa si riporta automaticamente nella posizione di riposo. Con l'interfaccia in posizione di riposo si attiva, in un tempo massimo di 2,5 secondi, un avvisatore acustico e, dopo altri 2,5 secondi, se l'agente di condotta non aziona nuovamente l'interfaccia, viene comandata la disinserzione della trazione e attivata la frenatura d'emergenza.

Se l'agente di condotta aziona nuovamente l'interfaccia prima che la disinserzione della trazione e la frenatura di emergenza siano state attivate, il segnale acustico viene tacitato e la frenatura non applicata.

La frenatura, una volta attivata, è riarmabile con una doppia azione (organo d'interfaccia e pulsante di riarmo). Con treno in movimento e interfaccia azionata in modo continuo, trascorso un tempo di 55 secondi (tempo di vigilanza), il dispositivo emette in un tempo massimo di 2,5

secondi un segnale acustico d'attenzione in cabina di guida richiedendo al personale di condotta il rilascio momentaneo dell'interfaccia.

Tale operazione deve avvenire in un tempo massimo di 2,5 secondi dall'inizio del segnale acustico; in caso contrario viene comandata la disinserzione della trazione e applicata la frenatura d'emergenza che, una volta attivata, è riarmabile con una doppia azione (organo d'interfaccia e pulsante di riarmo).

Se l'agente di condotta effettua l'azione di cui sopra (rilascio momentaneo e successivo riarmo dell'interfaccia) prima dell'attivazione del segnale acustico d'attenzione, il conteggio del tempo viene azzerato e inizia un altro ciclo (azzeramento tempo di vigilanza).

Con dispositivi a funzionamento a spazio tali controlli vengono effettuati al raggiungimento dello spazio corrispondente a quello percorso alla velocità di 100 km/h per un tempo di 55 secondi.

L'apparecchiatura è dotata inoltre di un dispositivo per l'inserimento del dato relativo al numero degli agenti di condotta cui è affidato il mezzo di trazione: "due agenti" oppure "un agente". Quando viene inserito il dato "un agente", l'apparecchiatura comanda l'inibizione della trazione e la frenatura d'emergenza del treno al superamento della velocità di 100 km/h.

È stato attivato un piano di verifica delle documentazioni prodotte per i vigilanti di tipo VACMA (*Veille Automatique Control par Maintien d'Appui*, cioè sistema di controllo automatico del mantenimento della vigilanza) installati a bordo di mezzi leggeri diesel (ALn 668-663), nonché su mezzi pesanti (E656, E633, E652, E444). L'installazione sui mezzi pesanti avviene contemporaneamente all'installazione del

dispositivo “scatola nera”. In tale fase è stata avviata una prima verifica sull’ergonomia delle apparecchiature VACMA installate, attività propedeutica all’omologazione del sistema. È in fase di definizione un programma di verifica tecnico - funzionale dell’installazione del VACMA, suddiviso per tipologia di rotabili. Riguardo all’attivazione automatica, la richiesta funzionale è stata ratificata con apposita specifica emessa da RFI.

In ogni caso l’applicazione del dispositivo sui mezzi di trazione previsti non permette l’utilizzo del mezzo (mancata trazione) se il dispositivo vigilante non viene inserito. Riguardo al resettaggio del tempo di vigilanza del dispositivo con altri comandi di banco, la richiesta è stata ratificata con la stessa specifica.

Il sistema SCMT controlla istante per istante che la velocità del treno non sia superiore a quella massima imposta dalle protezioni offerte dal sistema rispetto a:

- segnali fissi;
- velocità massima e pendenza della linea;
- rallentamenti-riduzioni di velocità;
- velocità per itinerari deviati di arrivo/partenza;
- velocità massima del materiale rotabile;
- velocità massima ammessa dalla frenatura;
- controllo della corretta operatività del personale di macchina rispetto all’inserzione/disinserzione della RSC.

Il macchinista guida il treno in maniera tradizionale, mettendo in relazione le caratteristiche dell’infrastruttura, le caratteristiche del treno e il segnalamento laterale.

Gli obiettivi che si conseguono con la realizzazione di tale sistema restano i seguenti:

1. aumento della sicurezza della circolazione, mediante attrezzaggio di tutte le linee principali della rete con il sistema SCMT e realizzazione degli interventi necessari a rendere omogeneo l'attuale attrezzaggio tecnologico di segnalamento delle linee interessate (eliminazione di buchi di codifica del Blocco automatico, sulle principali direttrici);
2. riduzione dei costi di gestione per la modifica dello standard di composizione del modulo di condotta dei treni a seguito dell'introduzione della tecnologia di supporto alla guida dei convogli.

Le fasi di sviluppo individuate, tra loro intrinsecamente correlate, sono:

- lo sviluppo di prototipi;
- l'attività di omologazione dei sottosistemi di terra e bordo;
- l'attrezzaggio di 10.500 km di rete e 3.200 rotabili, suddiviso in: "realizzazione di fase 1" e "realizzazione di fase 2".

Sulle linee AV/AC è installato il sistema ERTMS/ETCS Livello 2.

Su tali linee non sono necessari segnali luminosi laterali, di difficile interpretazione alle velocità di circolazione previste (300 km/h); l'informazione sullo spazio disponibile e sulla velocità alla quale esso può essere percorso istante per istante saranno inviate via GSM-R direttamente a bordo treno. Il sistema effettua inoltre, in condizioni nominali, il controllo della corretta operatività del personale di condotta. In tali condizioni ("full supervision"), al superamento della velocità ammessa il sistema comanda immediatamente la frenatura d'emergenza, garantendo in ogni caso l'arresto del treno prima del superamento del punto protetto.

2.4 Gli Apparati Centrali di Stazione

Gli apparati centrali di stazione sono un elemento fondamentale per la sicurezza della circolazione.

La circolazione ferroviaria basata sullo scambio di informazioni tra veicolo e terra costituisce un fenomeno complesso che coinvolge elementi diversi che interagiscono tra loro. Nel caso più generale, in prima approssimazione, gli elementi del sistema possono essere ricondotti ai seguenti:

1. il veicolo;
2. la via sulla quale il veicolo si muove;
3. gli agenti di terra;
4. gli agenti di bordo;
5. gli apparati di terra;
6. gli apparati di bordo.

La tipologia e l'entità delle informazioni e dei comandi che vengono scambiati tra gli elementi del sistema definiscono, a seconda dei componenti coinvolti, i vari regimi di circolazione, mentre il tipo e l'entità delle funzioni affidate agli apparati di terra e di bordo definisce il livello di automazione del sistema.

Nel caso di un sistema completamente automatico non esistono funzioni affidate all'uomo e scompaiono le interazioni tra esso e gli altri elementi del sistema e ciò corrisponde ad eliminare i collegamenti tra gli agenti e gli apparati. Parallelamente si sposta la sede della Logica della Sicurezza che viene trasferita dall'uomo (caso dei regimi di circolazione esclusivamente manuali) all'apparato centrale di stazione come avviene

nei moderni apparati centrali in cui la verifica delle condizioni di sicurezza è tutta attribuita all'apparato e all'uomo è affidata soltanto la funzione di regolazione della circolazione e l'attivazione delle procedure. Analogamente a bordo la Logica della Sicurezza può essere attribuita agli apparati di bordo (mediante sistemi ATP – Automatic Train Protection) lasciando all'uomo solo la funzione di decisione della partenza.

In ogni caso l'azione dell'uomo è necessaria per la gestione delle situazioni di avarie e di malfunzionamenti o per gestire i movimenti di manovra.

La sicurezza effettiva dipende dal corretto funzionamento di tutti gli elementi e dai criteri progettuali con cui sono gestite le situazioni di avaria (fail - safe, sicurezza intrinseca, ridondanza, ecc.).

2.4.1 Funzionalità di un Apparato Centrale

Per garantire la sicurezza di circolazione il sistema di segnalamento di linea e di stazione deve essere tale da assicurare l'uso esclusivo della infrastruttura ad un treno alla volta.

In stazione, per effetto della variabilità della configurazione, il processo di assegnazione di un itinerario ad un treno comprende una serie di fasi che iniziano con la decisione del Dirigente Movimento di attribuire l'itinerario ad un determinato treno e terminano con la liberazione del binario da parte del treno.

Il tempo di decisione corrisponde all'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui il dirigente del movimento decide di preparare l'itinerario e l'istante di inizio delle operazioni di formazione.

La sua entità è variabile e dipende da fattori umani e da fattori contingenti legati alla intensità della circolazione. Su di esso agiscono due elementi contrastanti: da una parte la necessità di prendere decisioni in tempi brevi per non rischiare di imporre perturbazioni al treno che utilizzerà l'itinerario; dall'altra la consapevolezza che una non attenta valutazione delle priorità di utilizzo di itinerari di accesso tra loro interferenti, specie nelle situazioni di traffico intenso, potrebbe portare a decisioni non ottime dal punto di vista del pieno utilizzo dell'infrastruttura.

Le operazioni successive alla decisione sono quelle relative alla realizzazione dell'itinerario. Esse iniziano con la registrazione e terminano con la predisposizione dell'aspetto del segnale e comprendono l'attuazione di comandi e di verifiche sullo stato effettivo dei dispositivi che compongono l'itinerario (libertà dei tratti di binario, posizione dei deviatori, aspetto dei segnali).

L'utilizzazione in sicurezza degli itinerari è garantita se sono verificate quattro condizioni fondamentali:

- *Compatibilità*: l'itinerario da realizzare è compatibile con altri itinerari eventualmente già realizzati;
- *Libertà*: l'itinerario da realizzare è libero;
- *Esistenza*: l'itinerario da realizzare esiste, cioè i deviatori sono disposti secondo il percorso voluto;

- *Irrevocabilità*: l'itinerario, una volta realizzato non può essere modificato prima che il treno lo abbia utilizzato e completamente liberato.

I comandi e le verifiche relative alle suddette condizioni sono attuate dall'Apparato Centrale della stazione. Le procedure funzionali dell'apparato devono pertanto garantire la sequenza logica delle operazioni ed il rispetto delle condizioni di sicurezza.

Il comando dell'itinerario innesca la manovra e la registrazione dell'itinerario. L'attuazione di questi comandi è subordinata alla verifica di manovrabilità dei deviatori e di compatibilità dell'itinerario.

La verifica delle incompatibilità si basa sulla *matrice degli itinerari* e sulla *matrice dei deviatori*.

La matrice degli itinerari è una matrice quadrata in cui le righe e le colonne corrispondono agli itinerari dell'impianto. Ciascuna casella della matrice riporta il valore della relazione di compatibilità o incompatibilità tra gli itinerari corrispondenti.

La matrice dei deviatori individua, per ogni coppia di itinerari, il deviatore che discrimina, con la sua posizione, la formazione dell'uno o dell'altro itinerario della coppia.

Dopo la registrazione viene effettuato il bloccamento logico dell'itinerario per impedire che la successiva formazione di altri itinerari incompatibili con quello che si sta formando.

Successivamente vengono effettuate le verifiche della libertà della via e di esistenza dell'itinerario. La libertà viene verificata analizzando lo stato dei circuiti di binario che compongono l'itinerario i quali sono in grado di rilevare la eventuale occupazione del binario da parte di veicoli.

L'esistenza dell'itinerario viene verificata controllando che la posizione effettivamente assunta dai deviatori sia quella corrispondente all'itinerario scelto.

La durata di queste operazioni, nel caso di verifiche positive delle condizioni di sicurezza, cioè in assenza di itinerari incompatibili già realizzati e nell'ipotesi che l'itinerario da realizzare sia libero, è relativamente breve se confrontata con il tempo complessivo di utilizzazione dell'itinerario. Essa dipende dai tempi di risposta dei dispositivi meccanici ed elettromeccanici; il tempo medio di manovra di un deviatore è dell'ordine del secondo mentre i tempi di commutazione dei relè sono sensibilmente inferiori.

Pur in presenza di itinerari complessi costituiti da molti deviatori e da molti circuiti di binario, caratteristici degli impianti situati nelle aree metropolitane dei grossi nodi ferroviari, i tempi di attuazione degli itinerari, sempre nell'ipotesi che le verifiche di cui sopra vadano a buon fine, sono pertanto molto contenuti.

Non è da escludere che in condizioni di traffico intenso possano verificarsi situazioni in cui la decisione di formare un determinato itinerario non possa essere attuata per mancanza di verifica di compatibilità dovuta a indisponibilità, parziale o completa, dell'itinerario richiesto. Ai fini del tempo di utilizzazione il perditempo corrispondente all'attesa per la verifica di compatibilità si traduce in un aumento del tempo di manovra.

Il tempo di manovra pertanto può essere considerato come somma di una parte deterministica relativa al tempo di risposta dell'apparato e dei dispositivi ad esso collegati e di una parte aleatoria dipendente dalla

probabilità di verificarsi di situazioni di interferenza. Il tempo complessivo di occupazione dell'itinerario incide direttamente sulla capacità di circolazione dell'impianto poiché per tutto questo tempo viene interdetta la circolazione sugli itinerari incompatibili con quello considerato. Il suo valore è condizionato anche dal comportamento degli operatori ai quali è affidata la decisione dell'istante di inizio delle manovre di formazione degli itinerari in relazione all'avvicinarsi del treno alla stazione.

2.4.2 Tipologie di Apparati Centrali

La tecnologia con cui vengono realizzate le diverse funzioni di comando, attuazione e verifica ed il livello di automazione del processo di formazione dell'itinerario caratterizza le diverse topologie di apparato centrale.

In particolare si possono avere le seguenti soluzioni :

2. *tecnologia meccanica*: le manovre degli enti e le verifiche delle condizioni di sicurezza vengono attuate mediante dispositivi meccanici, idraulici od oleodinamici;
3. *tecnologia elettromeccanica*: le manovre vengono attuate mediante dispositivi elettromeccanici (motori elettrici, elettromagneti ecc.) e le verifiche delle condizioni di sicurezza vengono effettuate tramite circuiti elettrici in cui si adotta convenzionalmente una corrispondenza tra la circolazione di corrente e lo stato fisico e logico degli enti (binario libero, itinerario registrato ecc.);

4. *tecnologia elettronica*: le manovre vengono attuate mediante dispositivi elettromeccanici e le verifiche delle condizioni di sicurezza vengono effettuate tramite circuiti elettronici.

In linea di principio il processo di formazione dell'itinerario può essere completamente manuale per cui l'operatore di stazione manovra separatamente i deviatori ed i segnali oppure completamente automatico per cui l'operatore seleziona l'itinerario da formare e l'apparato provvede alla esecuzione di tutte le azioni necessarie. L'apparato centrale si colloca, infatti, nella catena logica operativa del sistema di comando e controllo della circolazione, tra l'operatore di stazione ed il piazzale.

Con riferimento ad una tecnologia elettromeccanica sono elencati di seguito gli elementi più importanti che compongono l'apparato:

- 1) *Quadro luminoso*: riproduce il piano schematico della stazione e riporta le indicazioni sullo stato degli enti di piazzale: aspetto dei segnali, occupazione dei binari, posizione dei deviatori, ecc.
- 2) *Banco di manovra*: costituisce l'elemento di interfaccia tra l'operatore e l'impianto che consente di compiere le azioni di comando; esso comprende in relazione alla tipologia tecnologica, leve, pulsanti, lampade, spie di segnalazione ecc. Nel caso di apparati meccanici, al suo interno trovano posto le serrature meccaniche che condizionano i movimenti delle leve.
- 3) *Armadio Relè*: rappresenta l'unità logica che contiene i circuiti elettrici preposti alla verifica delle condizioni di sicurezza.
- 4) *Centralina di alimentazione*: provvede all'alimentazione elettrica dell'apparato e dei dispositivi.

5) *Orologi registratori degli eventi*: memorizzano con continuità lo stato di alcuni enti (aspetto di segnali, circuiti di binario, ecc.) e dispositivi (posizione di leve, ecc.) particolarmente utili per controllare il funzionamento degli enti e le manovre degli operatori.

I tipi di apparati più diffusi sono essenzialmente a tecnologia elettrica in cui la manovra di tutti gli enti è realizzata tramite l'energia elettrica; essi sono fondamentalmente di due tipi:

- Apparati Centrali Elettrici a leve singole (ACE);
- Apparati Centrali Elettrici a Itinerari (ACEI)

2.4.3 Apparati Centrali Elettrici a leve (ACE)

Negli apparati centrali elettrici a leve la formazione dell'itinerario e l'apertura dei segnali avviene agendo su apposite leve; le condizioni di sicurezza vengono verificate tramite serrature di tipo meccanico o elettrico. Con le serrature meccaniche la leva può essere manovrata solo se si trovano nella corretta posizione appositi chiavistelli che interferiscono con essa e la cui posizione dipende dalla posizione di altre leve.

Collegando opportunamente chiavistelli e leve è possibile subordinare ad esempio la manovra delle leve di un itinerario alla manovra dei deviatori in esso presenti oppure subordinare la manovra del segnale alla manovra dell'itinerario.

Nelle serrature elettriche il chiavistello può essere manovrato direttamente da un elettromagnete il cui azionamento può essere comandato

elettricamente in relazione all'avvenuta verifica di determinate condizioni.

I tipi di leve possono essere i seguenti:

1. *leva per la manovra dei deviatori*: può assumere due diverse posizioni corrispondenti alle posizioni di deviatoio normale o deviatoio rovescio;
2. *leva per la manovra degli itinerari*: può assumere due diverse posizioni corrispondenti alle posizioni di itinerario bloccato o non bloccato;
3. *leva per la manovra dei segnali* : può assumere le posizioni corrispondenti all'aspetto dei segnali di prima categoria (segnale di protezione per l'ingresso in stazione, segnale di partenza dalla stazione), dei segnali di avviso e dei segnali bassi per le manovre;
4. *leva per manovra dei passaggi a livello*.

La manovra delle leve viene consentita o impedita, tramite l'azione delle serrature meccaniche od elettromeccanici, solo se sono verificate determinate condizioni di sicurezza.

Ad esempio la leva del generico deviatoio può essere manovrata solo se il deviatoio è libero (circuito di binario libero), non è utilizzato da altri itinerari già attuati ed esiste il controllo che la sua posizione, retta o deviata, sia correttamente assunta e stabile.

La manovra della leva del segnale è possibile solo se tutto l'itinerario è libero (circuiti di binario non occupati), i deviatori sono nella posizione voluta, i controlli dei deviatori sono efficienti e le condizioni di libertà della linea sono verificate (consenso del sistema di blocco della linea).

In generale le manovre che devono essere effettuate per la preparazione di un itinerario sono le seguenti:

1. manovra dei deviatori nella posizione richiesta dal percorso tramite le leve da deviatoio;
2. manovra dei passaggi a livello tramite le apposite leve;
3. manovra dei segnali tramite le leve da segnale.

Le serrature che vincolano i movimenti delle leve garantiscono il rispetto delle condizioni di sicurezza ma possono limitare o addirittura bloccare la circolazione nell'impianto nel caso in cui si abbiano avarie ai dispositivi o inconvenienti di esercizio.

Si pensi ad esempio all'avaria al sistema di controllo della posizione dei deviatori (assenza di segnale del controllo con il deviatoio in posizione corretta) o al caso di sosta prolungata di un treno su una parte dell'itinerario la cui occupazione impedisce la formazione di altri itinerari della stazione.

In questi casi le serrature impedirebbero qualsiasi manovra per cui, per far fronte a questi inconvenienti, sono previsti tasti di soccorso, normalmente piombati, che, se azionati, eliminano il vincolo delle condizioni di sicurezza. Di conseguenza la verifica delle condizioni viene demandata direttamente all'operatore di stazione.

2.4.4 Apparatı Centrali Elettrici a Itinerari (ACEI)

Gli Apparatı Centrali Elettrici ad Itinerari (ACEI) consentono la formazione dell'itinerario agendo semplicemente su appositi pulsanti, uno

per ciascun itinerario previsto nell'impianto, che comandano le operazioni di formazione dell'itinerario, le manovre dei deviatori e dei segnali e le verifiche delle condizioni di sicurezza.

In questo tipo di apparati la verifica delle condizioni di sicurezza avviene tramite circuiti logici basati sulla tecnologia relè.

Ogni relè (costituito da un dispositivo mobile detto ancora, che si sposta per effetto di una forza magnetica) è inserito in un circuito di comando (principale) ed in un circuito comandato (secondario). La circolazione della corrente nel circuito comandato dipende dalla circolazione della corrente nel circuito principale e dalla connessione dei due circuiti.

Il banco di un apparato ACEI è dotato di pulsanti di itinerario che devono essere premuti per attuare la formazione dell'itinerario. L'azione sul pulsante determina l'innesco della procedura di verifica delle condizioni di sicurezza e di manovra dei deviatori che termina con la predisposizione dell'aspetto dei segnali.

L'itinerario rimane bloccato, cioè tutti gli enti coinvolti non possono essere utilizzati per altri itinerari finché non interviene la liberazione con il transito del treno.

La liberazione può avvenire dopo che il treno ha liberato completamente l'itinerario (liberazione rigida) oppure progressivamente per tratti parziali, man mano che il treno percorre l'itinerario (liberazione elastica). In questo caso gli enti liberati possono essere utilizzati per la formazione di altri itinerari anche se il treno non ha completamente liberato l'intero itinerario.

Nel caso in cui una o più condizioni di sicurezza non siano soddisfatte l'itinerario non viene formato, gli enti vengono automaticamente sbloccati e possono essere utilizzati per altre richieste.

Rispetto agli ACE gli ACEI sono più vantaggiosi in termini di rapidità delle manovre, di minori oneri per l'operatore e di possibilità di comando remoto e centralizzato. Negli apparati elettrici ACEI le condizioni di sicurezza vengono garantite dalla struttura stessa dei circuiti elettrici.

La configurazione degli apparati di tipo ACEI è tale per cui la verifica della generica condizione è associata alla circolazione della corrente elettrica nel circuito; la struttura del circuito riproduce la struttura logica delle condizioni di sicurezza. 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 il corrispondente relè è eccitato e consente la circolazione di corrente nel circuito di verifica della libertà della via. Tutti i relè di tutti i circuiti di binario dell'itinerario sono disposti in serie in modo che solo nel caso in cui tutti siano liberi può circolare la corrente nel circuito di verifica.

Una tale configurazione viene detta a logica cablata per indicare che la logica della sicurezza dipende dalla modalità con cui sono collegati i circuiti elettrici dell'apparato. Per la verifica delle condizioni di sicurezza i relè inseriti nei circuiti elettrici risultano eccitati o non eccitati in funzione del risultato della verifica.

Il significato attribuito allo stato del relè tiene conto anche del criterio di far corrispondere eventuali guasti a situazioni di sicurezza. Ad esempio la compatibilità è verificata se il corrispondente relè è eccitato; in tal modo

una eventuale avaria all'alimentazione impedisce la verifica della compatibilità e quindi il completamento della preparazione dell'itinerario. La combinazione dei diversi relè all'interno dei circuiti elettrici consente di riprodurre la struttura funzionale dell'impianto nel rispetto della logica di sicurezza.

2.4.5 Apparati Centrali Statici (ACS)

Gli apparati centrali statici (ACS) o a calcolatore (ACC) sono caratterizzati da una struttura logica di tipo programmato. La differenza sostanziale, rispetto alla struttura a logica cablata caratteristica degli ACEI, è che le condizioni di sicurezza sono verificate da un programma di calcolo installato su un calcolatore che effettua l'analisi degli stati degli enti di piazzale e che, sulla base di essi, fornisce il risultato della verifica. L'apparato risulta costituito da due sottosistemi fondamentali: il sottosistema della sicurezza che svolge le funzioni vitali ed il sottosistema di diagnosi e telecomando.

Gli elementi principali dell'apparato sono i calcolatori (hardware) ed i programmi di calcolo (software). Per limitare al minimo le possibilità di errore e garantire un livello di sicurezza sufficientemente elevato il sottosistema della sicurezza viene in genere realizzato utilizzando più calcolatori identici in parallelo (ad esempio 3) e più software realizzati da gruppi di tecnici diversi. Al termine di ogni elaborazione vengono confrontati i risultati dei diversi calcolatori e dei diversi programmi proseguendo nel processo solo se tutti forniscono lo stesso risultato. In

alcuni casi si accetta il risultato anche se è confermato solo da due calcolatori su tre (logica 2 su 3).

L'ACS è collegato agli enti di piazzale in modo del tutto analogo a quello degli apparati ACEI. Uno dei vantaggi fondamentali degli ACS è quello della modularità per cui alcuni moduli, in particolare quelli che svolgono le funzioni vitali, possono essere facilmente applicati a qualunque tipo di impianto senza ulteriori interventi di adeguamento. Gli interventi sono necessari per adeguare l'apparato alla configurazione specifica che ovviamente dipende dalla forma dell'impianto.

Negli ACEI più moderni i pulsanti sono sostituiti da tastiere mediante le quali si può selezionare l'itinerario voluto componendo il corrispondente codice. Questa soluzione riduce sensibilmente le dimensioni del banco di manovra.

La sostituzione di un ACEI con un ACS, oltre a vantaggi economici e gestionali derivanti da una più facile reperibilità sul mercato dei componenti necessari, apporta anche alcuni miglioramenti in termini di sicurezza, come ad esempio la possibilità di gestire in maniera più articolata i degradi degli enti di piazzale. Anche per i sistemi di controllo a distanza degli apparati centrali di stazione, è in corso d'attivazione il nuovo sistema a tecnologia elettronica, il SCC: il notevole innalzamento del livello tecnologico della rete anche in questo caso va essenzialmente a favore di una migliore gestione del traffico e di utilizzazione delle risorse umane, ma dà alcuni importanti contributi alla sicurezza della circolazione in specifiche condizioni di degrado, rendendo disponibili al posto centrale alcune funzioni di soccorso "sicure" non presenti nei vecchi CTC.

2.5 Impianti Rilevamento Temperatura Boccole RTB

Proprio in seguito all'adozione degli SCC su vasta scala, assumono un ruolo indispensabile gli impianti di rilevamento temperatura boccole (RTB): i treni si trovano a percorrere infatti lunghi tratti di linea impresenziati e occorre sostituire con sistemi di terra, in attesa dello sviluppo di affidabili sistemi di rilevamento di bordo, l'opera empirica ma essenziale di osservazione dello stato del convoglio è svolta dal personale lungo linea al passaggio dei treni.

Il raggiungimento di elevati valori di temperatura delle boccole di un veicolo ferroviario può in effetti condurre a situazioni particolarmente critiche per l'esercizio, dal danneggiamento del materiale fino allo svio con tutte le sue possibili conseguenze.

Sono stati, quindi, messi a punto apparati RTB di nuova generazione, dedicati alla rilevazione della temperatura delle boccole dei rotabili in un punto di linea e in grado di rendere disponibili al DM (Dirigente Movimento) / DCO (Dirigente Centrale Operativo) o ad altro operatore le informazioni relative a tali rilevazioni, corredate da eventuali segnalazioni acustiche e visive d'allarme nel caso in cui le temperature lette superano i valori di soglia prefissati.

Un apparato RTB è costituito da:

- posto di rilevamento, con funzione di rilievo della temperatura delle boccole e di elaborazione dati, comprendente i captatori, il sistema d'attivazione (pedali d'attivazione e comando-lettura) e le apparecchiature d'elaborazione e trasmissione dati;

- posto di controllo (centrale: collocato nei locali delle postazioni DCO sulle linee telecomandate; locale: ubicato nell'Ufficio movimento sulle altre linee), con funzione di presentazione e registrazione dei dati e stampa dei moduli, comprendente i dispositivi di ricezione, registrazione, localizzazione e allarme;
- apparato di trasmissione, con funzione di collegamento tra posto di rilevamento e posto di controllo, costituito dal sistema di trasmissione dati.

Il sistema è in grado di fornire due tipi d'allarme:

- *assoluto*, che segnala il superamento di una temperatura prefissata nella boccola interessata;
- *relativo*, che segnala il superamento, da parte della boccola interessata, di uno scarto termico prefissato rispetto alle altre boccole del treno.

La norma generale di riferimento è la Disposizione n. 48/2001 del gestore dell'infrastruttura, riguardante la "Normativa per l'esercizio degli impianti di rilevamento temperatura boccole (RTB)". Essa definisce le caratteristiche generali degli impianti RTB e i criteri d'applicazione sulle linee e disciplina l'esercizio in condizioni di normale funzionamento e di anomalità e guasti degli impianti RTB. Sulle linee telecomandate il modulo d'installazione per le nuove realizzazioni è:

- 25÷40 km per $V \geq 150$ km/h e $V \leq 250$ km/h;
- 40÷60 km per $V \geq 100$ km/h e $V \leq 150$ km/h;
- 60÷80 km per $V \leq 100$ km/h.

Il modulo varia in funzione dei vincoli infrastrutturali legati alla configurazione degli impianti e dei punti in cui risulta più opportuno arrestare il treno in allarme, come indicato più avanti.

Per le linee già attrezzate è ammesso il seguente modulo d'installazione:

- 60 km per le linee con $V \leq 150$ km/h;
- 30 km per le linee con $V \geq 150$ km/h.

È consentito, per tratti di lunghezza inferiore a 80 km, anche in relazione alla V_{\max} della linea, di non procedere all'installazione di alcun impianto RTB. Sulle linee a dirigenza locale gli impianti RTB rivestono carattere di ausilio e non è definito un modulo d'installazione particolare.

Su linee a dirigenza locale non è ammesso ubicare un posto di controllo in località di servizio impresenziata. Salvo deroghe dell'unità centrale interessata, fra un posto di rilevamento e la località di servizio in cui è realizzato il collegamento con i segnali non devono trovarsi altre località di servizio.

Nella scelta delle località di servizio in cui effettuare il collegamento coi segnali si preferiscono, per quanto possibile, le stazioni rispetto ai bivi e ai posti di comunicazione. Esse devono essere posizionate in modo da poter arrestare il treno con frenatura normale di servizio e devono trovarsi, di regola, in precedenza di:

- gallerie di lunghezza superiore a 5 km;
- ingresso e uscita dalle linee con $V_{\max} > 200$ km/h;
- diramazioni di linee (o dopo la convergenza di linee);
- ultima stazione, di regola quella di confine, su linee verso altre reti ferroviarie.

2.6 ERTMS/ETCS

ERTMS/ETCS è il sistema europeo di controllo automatico della marcia del treno e rappresenta la soluzione individuata da ferrovie e industrie europee per realizzare l'interoperabilità ferroviaria. Le specificazioni dei requisiti sono pubbliche e definiscono il cosiddetto kernel e le sue interfacce con le apparecchiature di terra e di bordo. Le specifiche vigenti sono le specifiche ETCS di classe 1 pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale Europea nel 2000. Fra queste, particolarmente significativa è la specifica dei requisiti di sistema (SRS) che descrive il kernel ETCS che comprende l'intero EUROKAB, le apparecchiature d'interfaccia verso il GSM-R, quelle di gestione della trasmissione dati con EUROBALISE, EUROLOOP, EURORADIO, l'interfaccia verso i sistemi di segnalamento a terra (*interlocking*, segnali) e verso gli altri sistemi di bordo (sistema di frenatura).

2.6.1 La funzionalità di ETCS

Concettualmente la funzionalità di ERTMS/ETCS si può riassumere con il grafo rappresentato in fig. 2.1.

Le modalità con le quali possono essere ricevute dal treno le informazioni di terra dipendono dal livello d'applicazione scelto per ETCS.

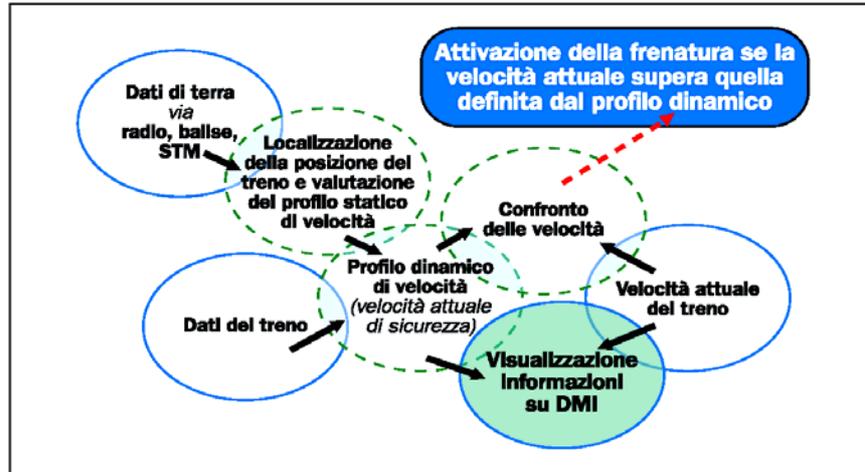


Fig. 2.1: La funzionalità di ERTMS/ETCS

Esistono tre livelli d'applicazione. Il livello d'applicazione 1 (fig. 2.2) utilizza, per la trasmissione a bordo delle informazioni di terra, una trasmissione di tipo discontinuo attraverso boe fisse o commutabili opportunamente posizionate e adeguatamente collegate agli impianti di segnalamento che costituiscono la sorgente informativa (segnali). I contenuti informativi e le modalità della loro codifica e della loro allocazione nel telegramma trasmesso dalla boa sono standard definiti nelle specifiche ETCS.

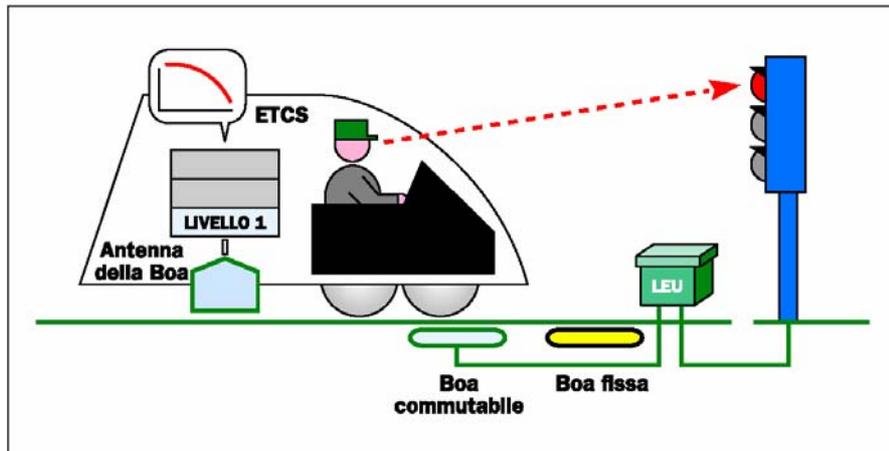


Fig. 2.2: Schema di ETCS livello di applicazione 1

La posizione dei treni è determinata da sistemi di rilevamento della posizione convenzionali (circuiti di binario).

Il livello d'applicazione 2 (fig. 2.3) utilizza, per la trasmissione a bordo delle informazioni di terra, una trasmissione di tipo continuo attraverso collegamenti radio in sicurezza tra un *Radio Block Center* e il treno. I *Radio Block Center* sono adeguatamente collegati agli impianti di segnalamento che costituiscono la sorgente informativa (apparati centrali).

Per la trasmissione sono utilizzate antenne collegate al *Radio Block Center* opportunamente posizionate lungo linea.

I contenuti informativi dei messaggi radio e le modalità della loro codifica e della loro allocazione nel telegramma trasmesso sono standard definiti nelle specifiche ETCS.

Anche per ETCS di livello 2 la posizione dei treni è determinata da sistemi di rilevamento della posizione convenzionali (circuiti di binario) e

la logica di bordo gestisce una funzionalità analoga a quella descritta nel grafo rappresentato in fig. 2.1 utilizzando le informazioni disponibili di terra (dello stesso tipo ma meglio definite e più tempestive rispetto al livello 1) e del treno.

Il sistema trasmissivo utilizzato per il collegamento radio fra terra e bordo è il GSM-R, installato su tutte le linee della rete fondamentale, sui valichi e sulla rete AV. ETCS livello 2 implica per il bordo la capacità di percorrere linee attrezzate sia con il livello 2 sia con il livello 1 di ETCS.

Si è definito anche un livello d'applicazione 3 di ETCS, a tutt'oggi non utilizzato, che non prevede di usare dispositivi tradizionali per individuare la posizione del treno. La posizione del treno è determinata a bordo, e a terra sono previste solo boe di calibrazione. Per tale soluzione è necessario garantire l'integrità del treno, problema ancora lontano da una soluzione convincente.

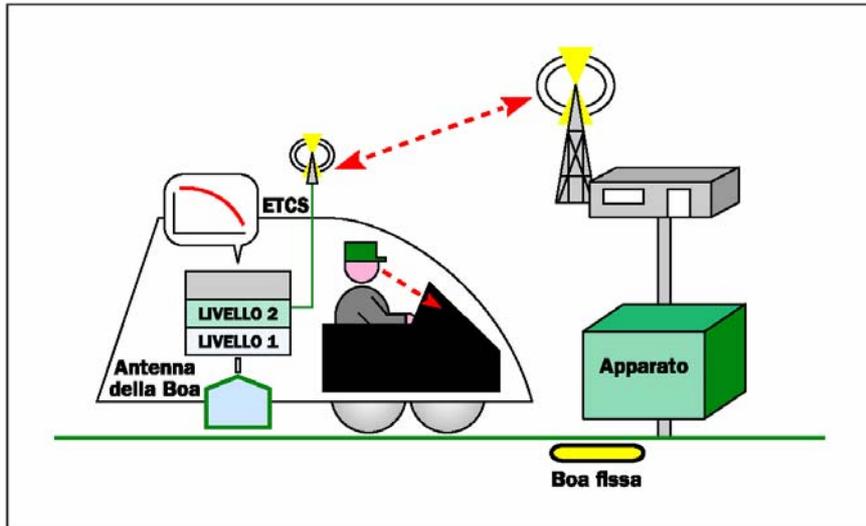


Fig. 2.3: Schema ETCS livello di applicazione 2

Il livello 3 può consentire, con l'adozione del blocco mobile, non più legato a sezioni di linea ma alla posizione reale dei treni in circolazione, un distanziamento ottimale. Anche per questo aspetto restano aperti molti problemi, fra i quali anche quelli relativi all'impatto su norme e regolamenti d'esercizio.

I treni ETCS che hanno installato a bordo lo *Specific Transmission Module* (STM) del sistema nazionale possono transitare su linee equipaggiate con tale sistema. Le apparecchiature STM sono capaci di fornire a ETCS informazioni standard ricavate dalle informazioni dei sistemi nazionali installati a terra e consentono le prestazioni possibili con il sistema nazionale.

Una sintesi delle apparecchiature necessarie per i diversi livelli d'applicazione di ERTMS/ETCS è riportata nella tabella 2.1.

ETCS level	Onboard		Track-side			
	Check of train integrity	Data transmission	Lineside electronic units	Lineside signals	Track occupancy detection	Radioblock
1	no	balises+loops (option)	yes	yes	yes	no
2	no	balises+radio	no	no	yes	yes
3 (planned)	yes	balises+radio	no	no	no	yes

Tabella 2.1: Apparecchiature per ERTMS/ETCS

2.7 Il sistema ERTMS in Italia

Il sistema ERTMS (*European Railway Traffic Management System*) è utilizzato in Italia come il sistema di radiosegnalamento al servizio delle linee Alta velocità/Alta capacità (AV/AC).

Esso sarà realizzato al livello 2 (L2), con le apparecchiature e i sottosistemi che descriveremo più avanti. Detto sistema si può generalmente descrivere come costituito da due sottosistemi, di terra e di bordo, sintetizzabili come segue:

- sottosistema di terra (SST), ripartito in tre aree geografiche, di carattere gerarchico:
 - nazionale, per la supervisione di tutte le linee del sistema AV/AC;
 - centrale, per la gestione operativa di ogni singola linea;
 - periferico, per l'interfacciamento con gli enti di stazione-linea e con i treni;

- sottosistema di bordo (SSB), rappresentato dall'insieme d'apparecchiature installate a bordo dei treni.

Il sottosistema di terra e quello di bordo comunicano essenzialmente in due modi:

- bidirezionale, via radio, attraverso il canale GSM-R;
- monodirezionale, dal sottosistema di terra a quello di bordo tramite le boe.

2.7.1 Sottosistema di terra (SST)

Il sottosistema di terra (fig. 2.4) si articola in:

- un PSV (Posto di supervisione nazionale)
- e, per la singola linea o tratta sotto controllo, in:
- un PCS (Posto centrale satellite);
 - più PPF (Posti periferici fissi);
 - un sistema di boe (balise);
 - un sistema GSMR, comprendente apparati nel PCS e stazioni radio-base BTS (*Base Transceiver Station*) distribuite lungo le tratte;
 - un sistema di telecomunicazioni per lunga distanza, TLC/LD, per il collegamento delle suddette unità PSV e PCS con i PPF e le BTS;
 - un sistema di telefonia selettiva.

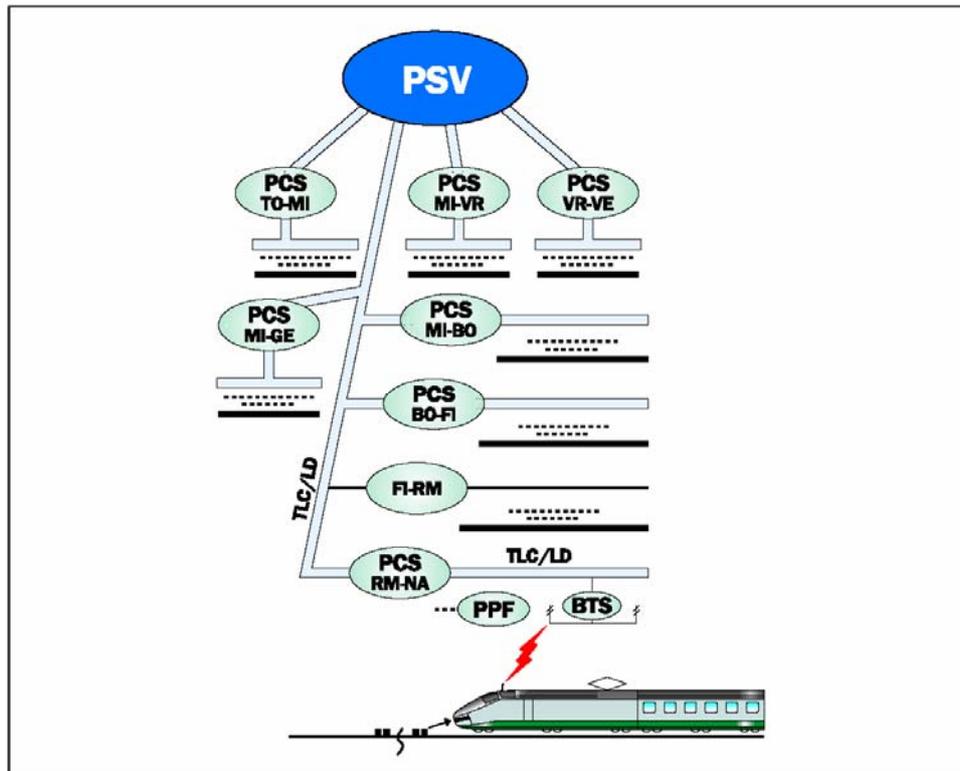


Fig. 2.4: Architettura generale del sistema ERTMS AV/AC

Posto di supervisione nazionale (PSV) e Posto centrale satellite (PCS)

Il PSV (Posto di supervisione nazionale) ha il compito della supervisione integrata dei PCS (Posti centrali satellite) che, a loro volta, operano direttamente il comando e il controllo della circolazione ferroviaria di ogni singola tratta nella propria giurisdizione.

La funzione del PCS è pertanto quella di gestire:

- il distanziamento treni nella tratta;
- il comando e controllo degli impianti di segnalamento e sicurezza della circolazione;

- il comando e la regolazione degli impianti d'alimentazione e distribuzione per la trazione elettrica;
- il telecomando degli impianti ausiliari distribuiti in linea e nei posti di servizio.

Nel PCS sono ubicati (fig. 2.5):

- il Radio Block Center (*RBC*) per la gestione centralizzata del distanziamento treni nella tratta considerata, comprendente anche la parte di terra del sistema EURORADIO per il collegamento fisico tra *RBC* e *GSM-R*, come viene di seguito indicato; sono presenti più *RBC* se la tratta è superiore a 70 km;
- il Sistema di comando e controllo (*SCC-AV*) per il telecomando e la tele-gestione degli impianti di segnalamento e sicurezza della circolazione, degli impianti TE e degli impianti ausiliari;
- il sistema di radiocomunicazioni *GSM-R* di livello centrale collegato, mediante il sistema di telecomunicazioni lunga distanza (*TLC/LD*), con le apparecchiature *GSM-R* di livello periferico;
- il sistema di telecomunicazioni operativo di livello centrale, comprendente anche la *CTS0* (Centrale telefonica selettiva d'inizio tratta) del *STSI* (Sistema telefonico selettivo integrato).

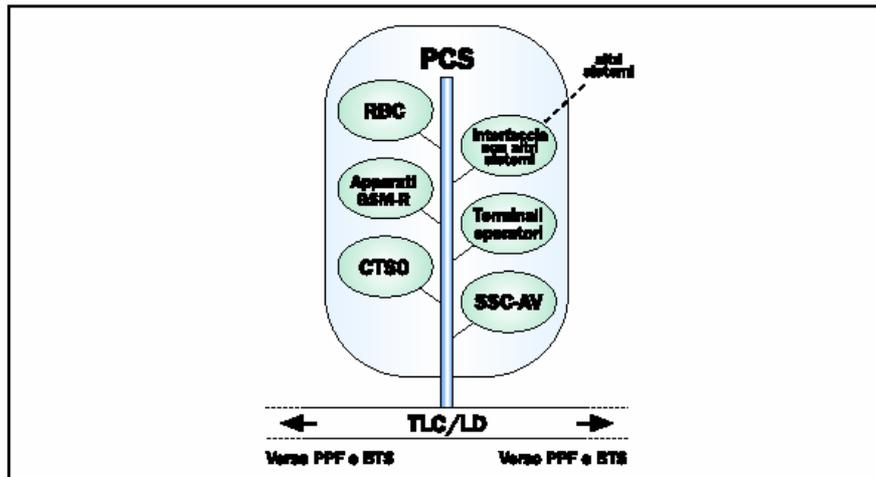


Fig.

2.5: Posto centrale satellite (PCS)

Posti periferici fissi (PPF)

I PPF (fig. 2.6) si trovano in corrispondenza dei PdS (Posti di servizio) lungo la tratta controllata; fra questi si distinguono come norma i PM (Posti di movimento), i PC (Posti di comunicazione), i PT (Posti tecnologici) e i PJ1 e PJ2 (Posti d'interconnessione rispettivamente sulla nuova linea AC e sulla linea "storica"). Ogni PPF comprende un ACS costituito essenzialmente da una sezione d'elaborazione (NVP, Nucleo vitale periferico) e da una di input/output (GAT, Gestore attuatori) collegata con gli enti di stazione e di linea, quali deviatori, fermadeviatoi, unità bloccabili e circuiti di binario. Ai PPF fanno capo anche i dispositivi RTB (Rilevamento temperatura boccole) e RCVL (Rilevamento caduta veicoli in linea). Gli enti di stazione di ogni PPF sono gestiti mediante telecomandi / telecontrolli relativamente agli enti di stazione e di linea di propria giurisdizione. Ogni PPF comunica con il posto centrale PCS,

nonché con i PPF adiacenti, attraverso i cavi del sistema di telecomunicazioni.

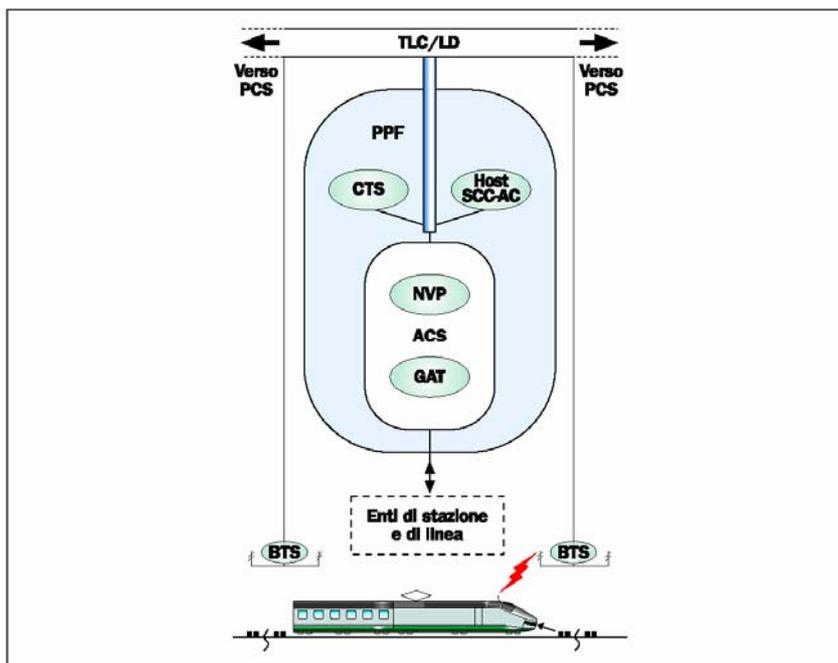


Fig. 2.6: Posto periferico fisso (PPF)

Sistema di balise

Lungo linea e nei PPF (fig. 2.7) sono installati gruppi di boe per la trasmissione al treno delle informazioni fisse, riguardanti la progressiva chilometrica e imponendo la comunicazione con il RBC.

Il sottosistema Eurobalise permette una comunicazione unidirezionale e discontinua da terra a treno sfruttando dei dispositivi di segnalamento, detti tecnicamente boe o balise, disposti sui binari lungo la linea

ferroviaria. Il passaggio del treno al di sopra di una boa determina una breve trasmissione di dati dalla balise al treno; in questo senso si indica la trasmissione come “discontinua”.

Un'antenna, vincolata al sotto - cassa del locomotore, riceve i messaggi, che vengono decodificati ed elaborati dal computer vitale di bordo. Il treno, leggendo l'identità della balise, risale alla sua precisa posizione lungo la linea ferroviaria mediante invio di un “*position report*” al RBC e ricevendo da questi informazioni sulla marcia da attuare (autorizzazioni al movimento, profilo statico di velocità e pendenza). Le balise non richiedono alimentazione esterna, ma sono tele - alimentate dal treno stesso al suo passaggio.

Quest'ultimo attiva la balise con un segnale a 27 MHz, la balise risponde inviando il messaggio in modulazione FSK a 3,9 - 4,5 MHz con un transfer rate di circa 564 kbit/s. I messaggi hanno una lunghezza variabile fra 341 e 1.023 bit e le trasmissioni sono garantite nella loro correttezza per velocità del treno fino a 500 km/h. Generalmente le balise sono installate a coppie, a distanza di qualche metro, così da determinare, oltre alla posizione, anche la direzione del treno e in modo tale da aumentare, per mezzo della ridondanza, l'affidabilità del sistema.



Fig. 2.7: A sinistra, una balise; al centro, alcune balise installate lungo i binari; a destra, antenna posta sotto il locomotore

2.7 2 Sottosistema di bordo (SSB)

Il sottosistema di bordo è rappresentabile come in fig. 2.8.

Dalla figura si riconoscono tre strati funzionali, che partendo da quello più esterno a quello più interno comprendono lo strato “treno”, il guscio intermedio SSB e il cuore SSB ERTMS.

Interfaccia treno

Nell’interfaccia “treno” sono presenti i ricetrasmittitori GSM-R, per il collegamento bidirezionale con le stazioni radiobase (BTS), i sensori odotachimetrici, i pantografi e varie apparecchiature del mezzo di trazione quali alimentazione, leva di trazione, assetto cassa e altri, nonché il rubinetto elettronico (per la frenatura di servizio) e la piastra pneumatica (per il comando della frenatura d’emergenza); in detto strato si rappresentano il personale di macchina (PdM), i captatori e le antenne di rilevamento (in interfaccia aria, *air gap*) dei sistemi di segnalamento, quali boe (in particolare di Eurobalise e SCMT), segnalamento continuo (BACC) e d’eventuali altri sistemi di segnalamento nazionali.

Sezione intermedia

Il guscio intermedio SSB s'interfaccia con il mondo esterno, e quindi con gli elementi suddetti del treno, tramite: il terminale mobile (dati più voce) collegato a GSM-R, il cruscotto del macchinista, il vigilante, il registratore di dati diagnostici (DRU, *Diagnostic Recording Unit*), i moduli STM (*Specific Transmission Module*), il cui compito è appunto l'interfacciamento con il o i diversi sistemi di segnalamento nazionali; attraverso questi il sistema di bordo ERTMS sarà pertanto in grado di interpretarne le informazioni.

Cuore SSB

Nel cuore o kernel SSB del sottosistema di bordo vero e proprio ERTMS figurano il computer vitale di bordo EVC e gli altri componenti caratteristici di sistema ERTMS di bordo, quali il nocciolo di sicurezza di quest'ultimo (kernel), l'odometro, l'interfaccia MMI, il modulo captatore dei segnali di Eurobalise (BTM, *Balise Transmission Module*), l'interfaccia con gli apparati treno (TIU, *Train Interface Unit*) e i relativi attuatori, il registratore di carattere giuridico (JRU, *Juridical Recording Unit*).

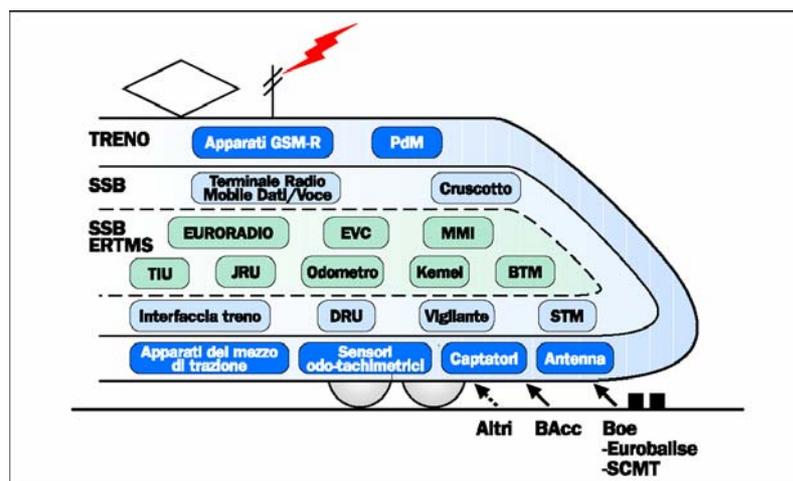


Fig. 2.8: Sottosistema di bordo

2.8 Sistema GSM-R

Il sistema di radiotelecomunicazioni GSM-R è, come già visto, il supporto per le comunicazioni bidirezionali tra il RBC e i treni.

In particolare:

- tra il RBC e le stazioni radiobase (BTS) il collegamento viene effettuato mediante cavi in fibra ottica facenti parte del sistema TLC/LD;
- tra le BTS e il treno il collegamento viene effettuato mediante radiocomunicazione.

Le apparecchiature del GSM-R (fig. 2.9) sono dislocate sia a livello centrale, nel PCS, sia a livello locale.

Nel PCS sono installate le seguenti principali apparecchiature:

- di commutazione, il *Network Switching System* (NSS) costituito dal MSC-HLR (*Mobile Switching Center-Home Location Register*) che comprende gli apparati per le funzioni di commutazione e le banche dati per la gestione degli utenti;
- di supervisione, il *Network Management System* (NMS) composto dall'OMC-S/R (*Operating Maintenance Centre-Switching/Radio*) che costituisce il gruppo di controllo e gestione della manutenzione dell'intera rete GSM-R composta da apparati di commutazione e radio sia centrali sia periferici;
- di gestione delle apparecchiature periferiche, il *Base Station Subsystem* (BSS), realizzato al centro dal *Basic Station Controller* (BSC) che gestisce i collegamenti e le connessioni tra le apparecchiature centrali (MSC) e quelle periferiche (BTS) in funzione della posizione dei treni.

Lungo la tratta sono inoltre ubicate le BTS che realizzano il sistema GSM-R di livello periferico; sono essenzialmente dei ricetrasmittitori che mediante antenne si collegano con i treni.

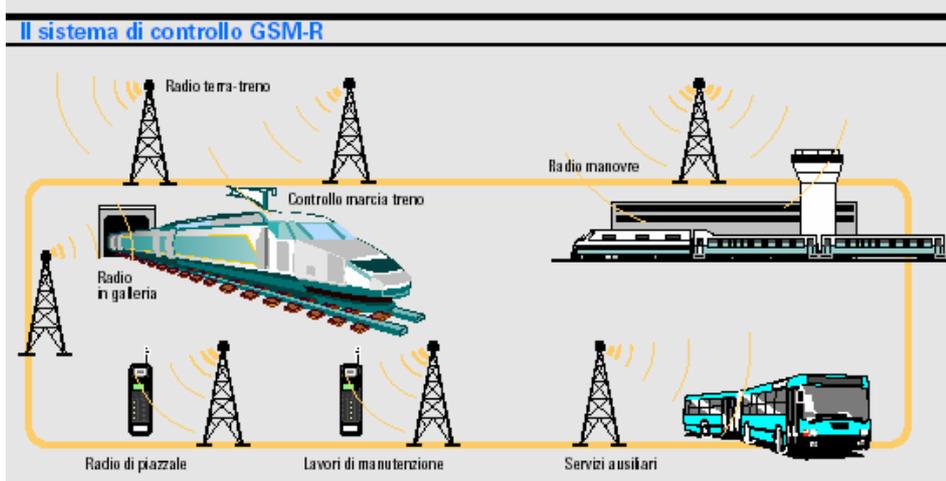


Fig. 2.9: Sistema di controllo GSM-R

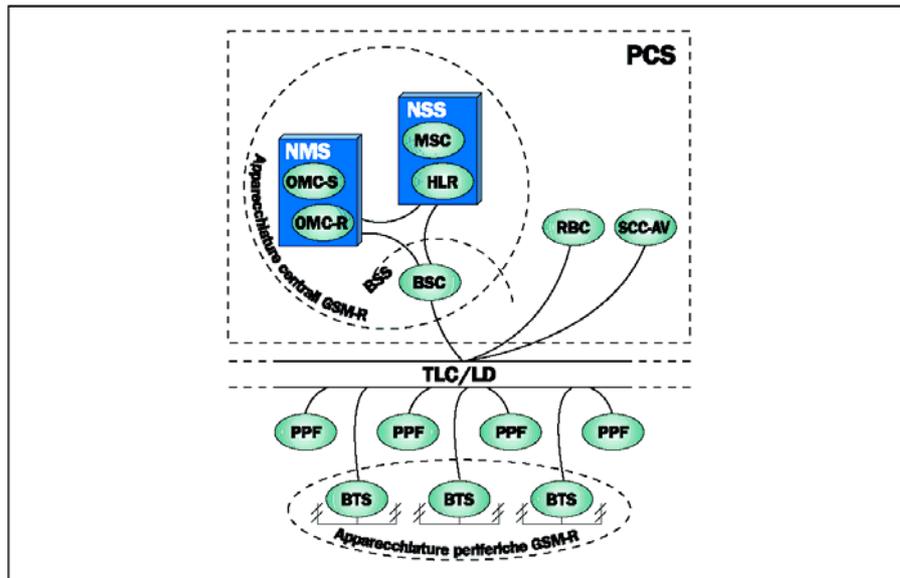


Fig. 2.10: Componenti GSM-R

Capitolo 3

Il distanziamento dei treni

3.1 Criteri di sicurezza

La tecnica della marcia a guida vincolata si basa sul vincolo, imposto dalla via per la traiettoria da seguire, che impedisce scostamenti anche minimi da essa.

La circolazione può avvenire in sicurezza se si garantiscono precise condizioni di marcia che regolano il movimento del veicolo da solo ed in relazione al movimento di altri veicoli.

In piena linea tali condizioni consistono nella verifica della libertà del percorso e della compatibilità del verso di percorrenza. In stazione la presenza dei deviatori rende variabile la configurazione del tracciato e introduce ulteriori verifiche di compatibilità per effetto dei molteplici movimenti che si possono avere e delle diverse tipologie delle traiettorie

che possono essere convergenti, divergenti e intersecanti in relazione alle diverse funzioni previste per le circolazioni (transito, sosta, manovra ecc.).

La linea ha una configurazione fissa dei binari ma può ammettere diversi regimi di circolazione in funzione del tipo di impianto di segnalamento che viene adottato. Nel caso di linee a singolo binario l'unico binario viene utilizzato alternativamente per i due sensi di marcia. L'incrocio tra treni di verso opposto deve avvenire in stazione ove sono predisposti almeno due binari paralleli tra loro collegati.

Nel caso di doppio binario i due binari possono essere utilizzati in modo specializzato per i due versi di marcia opposti oppure, in funzione delle esigenze di servizio, ciascuno dei due binari può essere utilizzato indifferentemente nei due sensi di marcia, in questo caso si parla di circolazione banalizzata.

Con la circolazione banalizzata si ha una maggiore flessibilità che può consentire un migliore sfruttamento dell'infrastruttura per effetto della possibilità di sorpasso tra treni che marciano a velocità diverse nello stesso verso e della possibilità di marcia parallela nel caso di circolazioni più intense in un verso di marcia rispetto all'altro.

Pertanto i criteri di sicurezza per la circolazione in linea si basano fondamentalmente sulla verifica della libertà della tratta da percorrere e della compatibilità del verso di percorrenza.

A tal fine la linea è suddivisa in sezioni che possono essere occupate da un treno alla volta e l'autorizzazione ad utilizzare la sezione viene concessa da terra al treno tramite il sistema di segnalamento; tale sezione viene detta sezione di blocco.

Nel caso di binari che possono essere percorsi nei due sensi di marcia l'autorizzazione deve valere ovviamente per tutto il tratto compreso tra due posti di incrocio.

La verifica delle condizioni di sicurezza e la conseguente autorizzazione ad utilizzare la sezione di linea possono effettuarsi in modi diversi in funzione del criterio di regolazione adottato e del livello di automazione del sistema di segnalamento. Le diverse modalità caratterizzano i diversi sistemi di comando e controllo della circolazione.

Fondamentalmente si hanno due tipi di blocco, blocco semiautomatico e blocco automatico; il primo richiede azioni da parte del personale mentre il secondo è completamente automatico.

3.2 Sistemi di blocco semiautomatico

La sezione di linea oggetto di autorizzazione per la circolazione corrisponde all'intera tratta che collega due stazioni. I segnali sono disposti all'ingresso e all'uscita di ciascuna stazione ed autorizzano rispettivamente l'accesso alla stazione e l'accesso alla linea. In ciascuna stazione è presente un responsabile della circolazione che manovra i segnali.

Per consentire ad un treno di andare da una stazione A alla successiva B la stazione A deve richiedere alla stazione B il consenso all'inoltro del treno.

Lo scambio di informazioni tra le due stazioni avviene tramite un circuito elettrico che collega le due stazioni e termina con due dispositivi di

comando a leve, uno per ciascuna stazione; tale dispositivo prende il nome di strumento di blocco. Mediante la manovra di apposite leve viene richiesto e concesso il consenso all'inoltro del treno.

Sulla linea, all'inizio ed alla fine della sezione, vi sono dei pedali che vengono azionati direttamente dal treno e segnalano il transito del treno in corrispondenza ad essi.

Poiché essi vengono azionati non appena il treno li incontra con tale azione essi segnalano che la testa del treno ha raggiunto il punto corrispondente al pedale. Ciò però non consente di accertare che tutto il treno abbia raggiunto tale posizione in quanto se il treno si spezzasse in due parti per effetto della rottura dei ganci la parte di treno ancora collegata con la locomotiva potrebbe continuare la marcia fino al pedale mentre la parte restante potrebbe rimanere sulla tratta.

Tale situazione di pericolo non viene rilevata dal pedale pertanto è necessario, per verificare che la tratta sia effettivamente libera, che tutto il treno abbia raggiunto la stazione controllando la sua composizione al momento dell'arrivo.

Lo scambio di consensi si basa sul presupposto che la circolazione sulla linea è normalmente interdetta e viene autorizzata solo a seguito di richiesta e concessione esplicita del consenso.

Il tempo per lo scambio delle informazioni riduce ovviamente il tempo disponibile per la circolazione e quindi influenza la potenzialità della linea (di cui parleremo in maniera più diffusa nel corso del presente elaborato).

3.3 Sistemi di blocco automatico

L'introduzione di dispositivi in grado di rilevare la presenza di veicoli sul binario (es. circuiti di binario) per tutta l'estensione della sezione di linea tra due stazioni consente di ridurre l'estensione della sezioni di blocco oggetto di autorizzazione e risolve anche il problema di verificare in modo automatico l'occupazione e la liberazione della sezione da parte di tutto il treno.

La tratta tra due stazioni viene suddivisa in sezioni ciascuna dotata ad esempio di un circuito di binario e di un segnale di protezione il cui aspetto dipende dallo stato di occupazione o liberazione della sezione a valle.

Con questi dispositivi si può adottare un criterio più efficace per la circolazione rispetto a quello precedente, che corrisponde a considerare la sezione normalmente libera e quindi consente di evitare i perditempo relativi alle verifiche delle condizioni di sicurezza ed alla predisposizione dei segnali prima dell'arrivo del treno.

I segnali che proteggono la sezione sono normalmente a via libera e si dispongono a via impedita solo se la sezione è occupata da un treno. Quando essa viene liberata tornano automaticamente a via libera.

I compiti degli operatori di stazione, per quanto riguarda la circolazione in linea, consistono sostanzialmente nelle manovre dei segnali di ingresso e di uscita dalla stazione e nelle manovre relative al comando del senso di marcia per quei binari che possono essere percorsi in entrambi i versi. La verifica automatica della occupazione della sezione può essere attuata,

senza dover ricorrere all'installazione di circuiti di binario per tutta l'estensione della tratta anche mediante dispositivi di conteggio degli assi. Il principio di funzionamento è il seguente: si dispongono due contatori di assi uno all'inizio della sezione e l'altro alla fine; confrontando i valori dei due contatori è possibile verificare, se il generico convoglio che ha occupato la sezione l'ha liberata completamente; solo in questo caso infatti il numero di assi conteggiati dal dispositivo posto al termine della tratta coincide con il numero di assi conteggiati dal dispositivo posto all'inizio della tratta.

L'informazione che si ottiene è analoga a quella che si ha tramite i circuiti di binario con il vantaggio che i contatori sono dispositivi meno complessi e costosi essendo di tipo puntuale e non esteso. Inoltre i dispositivi di conteggio sono utilizzabili anche nelle linee a semplice binario in quanto sono in grado di riconoscere il senso di marcia. Questo tipo di blocco prende il nome di blocco conta assi.

3.4 Impianto di segnalamento di linea

La sicurezza della circolazione dipende fondamentalmente da due condizioni: la stabilità del veicolo isolato rispetto al binario e l'assenza di situazioni di interferenza tra veicoli che utilizzano lo stesso binario.

La stabilità di marcia in condizioni di piena efficienza del veicolo e delle infrastrutture dipende dalle caratteristiche di marcia e principalmente dalla velocità: più alta è la velocità più alto è il rischio di situazioni di instabilità. Si pensi ad esempio al possibile deragliamento o ribaltamento

che avviene se si affronta una curva od il ramo deviato di un deviatoio a velocità troppo elevata.

Le condizioni di interferenza si possono presentare tutte le volte in cui i percorsi di veicoli diversi hanno tratti in comune che debbono essere utilizzati contemporaneamente. E' il caso di veicoli che percorrono lo stesso itinerario nello stesso verso o in verso opposto o di veicoli che percorrono itinerari convergenti in uno stesso punto.

Questa situazione è particolarmente importante nei sistemi ferroviari in cui il vincolo della guida non consente deviazioni dalla traiettoria per evitare l'interferenza.

L'aumento della velocità e del traffico rendono ancora più critico il problema della sicurezza per cui non è possibile lasciare al solo operatore di bordo la regolazione della marcia sulla base della sola percezione visiva (marcia a vista).

La marcia del veicolo deve essere basata su informazioni che vengono trasmesse da terra a bordo indipendentemente dalla percezione diretta degli ostacoli da parte del conducente.

Gli impianti di segnalamento sono preposti a questa funzione di trasmissione delle informazioni.

I segnali luminosi sono di 1^a categoria o di avviso se posti in precedenza immediata del punto protetto e, se disposti a via impedita, non devono essere superati dai treni e vengono installati per la protezione:

- dei posti di servizio:
 - stazioni;
 - bivi;
 - posti di comunicazione.

- degli enti in linea:
 - passaggi a livello;
 - deviatori in linea;
 - punti particolari (zone soggette a caduta massi, ecc.).

Per consentire il rispetto delle indicazioni fornite i segnali di protezione o di blocco, sono preceduti, ad opportuna distanza, da un segnale di avviso o da segnali di attenzione che avvisano il macchinista circa l'aspetto del segnale successivo.

Il segnale di protezione consente o vieta l'ingresso dei treni in stazione o in altra località di servizio.

Il segnale di partenza unico o esterno è utilizzato per il distanziamento dei treni, comanda l'uscita dalla stazione e, pertanto, l'ingresso sul tratto di linea successivo.

La sua disposizione a via libera notifica al macchinista la libertà della via (esistenza di via libera di blocco), nonché la regolarità di tutti gli enti ad esso collegati.

Le informazioni necessarie per la regolazione della marcia possono essere così sintetizzate:

- informazioni sullo stato di libertà o di occupazione della via;
- informazioni relative al consenso ad entrare negli impianti di stazione o di linea (bivi, posti di comunicazione,..) ad attraversare passaggi a livello;
- informazioni per la partenza dalle stazioni dopo la sosta;
- informazioni sui limiti di velocità dovuti al tracciato (es. presenza di curve);

- informazioni sui limiti di velocità in presenza di alternative di tracciato (ad esempio in corrispondenza dei deviatori);
- informazioni sui limiti di velocità temporanei (rallentamenti per lavori);
- informazioni relative ai tipi di impianti installati sulla tratta (zone attrezzate per la ripetizione dei segnali in macchina, zone elettrificate, presenza di impianti di comunicazione telefonica,...);
- informazioni relative alla posizione dei veicoli lungo la linea;

I limiti di velocità dipendono oltre che dalle condizioni della via (circolazione, tracciato, ecc.) anche dal tipo di veicolo: ad esempio la distanza di frenatura varia in funzione della velocità e dell'efficacia dell'impianto frenante, la velocità massima in curva dipende anch'essa dal tipo di veicolo: per i veicoli merci a parità di tracciato essa è più bassa di quella fissata per i veicoli passeggeri a lunga percorrenza; inoltre per veicoli ad assetto trasversale della cassa di tipo variabile (tipo Pendolino) essa può essere più alta di quella fissata per i veicoli ad assetto trasversale della cassa di tipo fisso.

Gli impianti di segnalamento di linea pertanto devono essere in grado di fornire informazioni per tutte le categorie di veicoli. Gli impianti di segnalamento di linea, poiché regolano il distanziamento stabiliscono la densità massima di treni sulla linea e quindi la potenzialità della linea stessa.

Per garantire la distanza di sicurezza minima è necessario conoscere la posizione reciproca dei treni che percorrono la tratta. Se la posizione del treno viene determinata in forma discontinua, come avviene nei sistemi basati sul distanziamento per sezioni di blocco in cui si rileva la presenza

del treno su sezioni di linea di lunghezza definita (da 1000-1500 m ad alcuni km), la distanza minima tra i treni viene stabilita mediante il minimo numero di sezioni di blocco che devono essere libere per garantire l'arresto del veicolo che segue senza urtare il veicolo che precede.

La marcia sulla base di segnali non esclude ovviamente la marcia a vista che viene adottata nelle manovre o nelle situazioni di avaria e inefficienza dell'impianto di segnalamento.

I diversi sistemi di segnalamento si differenziano oltre che per il tipo di informazioni che vengono trasmesse, che comunque in generale rientrano tra quelle sopra riportate, anche per le modalità con cui esse vengono fornite dal sistema di terra al veicolo in movimento e viceversa.

I sistemi di distanziamento attualmente in uso sono a distanziamento di spazio: la linea viene suddivisa in tratte elementari (sezioni di blocco) su ciascuna delle quali può circolare un solo veicolo alla volta.

Sulla base delle informazioni ricevute a bordo la guida del treno deve attuare le manovre necessarie per regolare coerentemente la marcia.

A tal fine le riduzioni di velocità o i punti di arresto devono essere segnalati in anticipo in modo tale che il veicolo abbia lo spazio sufficiente per adeguarsi alle indicazioni segnalate con un opportuno margine di sicurezza.

Come è noto l'arresto del veicolo a partire da una velocità V avviene in uno spazio definito dalla seguente relazione:

$$S_f = v \cdot t_r + \frac{v^2}{2a}$$

essendo t_r il tempo di reazione dell'operatore e degli impianti di bordo e a la decelerazione media in frenatura.

In Italia la distanza tra i due segnali è dell'ordine dei 1350 m. Essa consente l'arresto del convoglio nelle peggiori condizioni di frenatura a partire da velocità massime di 140 km/h. Per velocità superiori è necessario ricorrere ad altri sistemi di segnalamento che forniscano l'informazione dell'eventuale riduzione di velocità o arresto del veicolo, con anticipo tanto maggiore quanto maggiore è la velocità.

La segnalazione dello stato di occupazione o libertà della sezione di blocco può essere attuata in diversi modi:

- tramite segnali laterali fissi;
- tramite ripetizione a bordo del veicolo, in modo automatico e continuo, dell'aspetto dei segnali da terra;
- tramite ripetizione a bordo del veicolo, in modo discontinuo, dell'aspetto dei segnali da terra;

a) Segnalamento a due aspetti

I segnali laterali vengono disposti all'inizio di ciascuna sezione di blocco. Ciascun segnale può assumere due aspetti (verde o rosso) corrispondenti allo stato di libertà o di occupazione della sezione a valle. Essi sono detti segnali di protezione o segnali di prima categoria.

Prima del segnale, a distanza sufficiente per la frenatura vengono disposti i segnali di avviso. Essi possono assumere l'aspetto verde o giallo in funzione dell'aspetto del segnale successivo: assumono l'aspetto verde se il successivo segnale è verde, l'aspetto giallo se il successivo segnale è rosso. Tale sistema, denominato a due aspetti (fig. 3.1), è adatto per

velocità massime che consentono l'arresto del treno nello spazio compreso tra il segnale di avviso e quello di protezione.

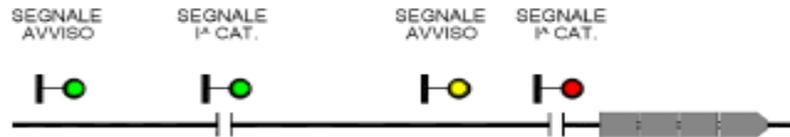


Fig. 3.1: Sistema di segnalamento a due aspetti

b) Segnalamento a tre aspetti

La lunghezza della sezione di blocco dipende dal tracciato della linea e dalla posizione delle stazioni ed influenza la potenzialità della linea: infatti a parità di velocità, sezioni di blocco lunghe impongono grandi distanziamenti tra i treni e comportano una ridotta potenzialità della linea, viceversa sezioni di blocco corte possono consentire una densità di treni maggiore, quindi una maggiore potenzialità, ma richiedono un quantità di segnali più elevata.

Riducendo la lunghezza della sezione di blocco aumenta la densità di segnali lungo la linea e si riduce la distanza tra il segnale di avviso ed il segnale di 1° categoria della sezione precedente.

Una soluzione più conveniente si può ottenere facendo coincidere il segnale di avviso con il segnale di 1° categoria trasferendo a quest'ultimo la funzione di avviso.

Questo segnale svolge pertanto sia la funzione di protezione della sezione immediatamente a valle del segnale stesso, sia la funzione di avviso dell'aspetto del successivo segnale di 1° categoria.

Ogni segnale assume in questo caso tre aspetti (figura 3.2). In entrambi i sistemi, segnalamento a due aspetti e segnalamento a tre aspetti, la velocità massima è condizionata dalla distanza tra il segnale di avviso ed il segnale di 1° categoria.

Per velocità superiori occorre disporre di spazi di arresto più lunghi. Pertanto nasce il problema di come consentire l'uso della linea a treni che marciano a velocità diverse sfruttando in ogni caso la massima potenzialità della linea.

Una soluzione si può ottenere raggruppando più sezioni di blocco e fornendo al macchinista, tramite i segnali, le indicazioni relative al numero di sezioni di blocco libere. In tal modo in funzione del numero di sezioni di blocco libere si può stabilire la velocità massima che consente l'arresto del treno in sicurezza. In tal modo aumenta il numero degli aspetti dei segnali che ovviamente non possono essere aumentati oltre un certo valore per effetto del limite imposto dalla capacità di percezione. Ad esempio alla velocità di 300 km/h i segnali distanti 1200 m uno dall'altro, verrebbero incontrati ogni 15 secondi, intervallo di tempo troppo breve per garantire il riconoscimento dei diversi aspetti, la tempestività e la sicurezza della manovra. Con queste velocità si deve ricorrere alla ripetizione automatica dei segnali in macchina.



Fig. 3.2: Sistema di segnalamento a tre aspetti

3.5 Tipi di segnali

Le informazioni che vengono trasmesse da terra a bordo sono sostanzialmente di due categorie: informazioni variabili con la circolazione (stato di libertà della via, percorso in deviata, ecc.) e informazioni fisse indipendenti dalla circolazione (limiti di velocità dovuti al tracciato, ecc.).

Nei sistemi di segnalamento basati su segnali posti lateralmente alla via si hanno due categorie di segnali: segnali ad aspetto variabile (in genere luminosi) e segnali ad aspetto fisso (tabelle).

I segnali ad aspetto variabile sono segnali luminosi dotati di una o più luci, ciascuna luce può assumere più aspetti (rosso, giallo, verde) e può essere di tipo fisso oppure di tipo lampeggiante.

Essi vengono utilizzati sia per dare informazioni relative alla sezione immediatamente a valle del segnale (segnale di protezione o di prima categoria), sia per dare informazioni relative all'aspetto del successivo segnale (segnali di avviso).

Con la combinazione delle luci e degli aspetti si ottengono le diverse informazioni che corrispondono allo stato di libertà o di occupazione della via e alle indicazioni dei limiti di velocità che dipendono ad esempio dalla posizione dei deviatori del percorso che dovrà essere effettuato.

Le diverse situazioni che si possono avere sono:

- indicazione di libertà della sezione a valle del segnale;
- indicazione di occupazione della sezione a valle del segnale;
- avviso di occupazione della sezione a valle del prossimo segnale;
- avviso di libertà della sezione a valle del prossimo segnale;
- indicazione della velocità massima sul percorso in deviato (normalmente vengono adottate tre limiti di velocità: 30, 60, 100 km/h, in relazione al tipo di deviatoio che verrà incontrato);
- informazioni di segnali posti a distanza più ravvicinata del normale per effetto di vincoli dovuti al tracciato.

Raggruppando più segnali luminosi si ottengono segnali multipli ed aumentano il numero delle informazioni che si possono fornire con un solo segnale. Oltre ai tre aspetti principali (verde, giallo, rosso) si possono ottenere altre indicazioni con lampeggiamenti delle luci.

Il numero delle combinazioni che si possono ottenere è elevato, non tutte vengono comunque utilizzate a causa delle difficoltà a percepire con sicurezza l'aspetto del segnale durante la marcia.

In generale le luci singole indicano lo stato di libertà o di occupazione della sezione, le luci doppie danno indicazione relative alla velocità e quelle triple danno indicazioni sulla posizione ravvicinata dei segnali.

I segnali ad aspetto fisso vengono utilizzati per fornire quelle informazioni che non variano con la circolazione: esse riguardano principalmente:

- limiti di velocità dovuti al tracciato;
- limiti di velocità dovuti a rallentamenti temporanei (esempio per lavori);
- indicazioni sul tipo di segnalamento (zona attrezzata per la ripetizione dei segnali in macchina);
- indicazioni sulla elettrificazione (inizio o fine della zona elettrificata, sistema di elettrificazione, massima corrente che può essere assorbita dalla linea, ecc.).

Essi sono costituiti da tabelle disposte di lato o in alto rispetto alla via.

3.6 Circuiti di binario

Il circuito di binario (c.d.b.) e' un dispositivo elettrico che, utilizzando le rotaie come conduttori, rileva la presenza dei rotabili. I c.d.b. piu' largamente diffusi sono:

- circuito di binario di tipo tradizionale;
- circuito di binario con connessioni induttive.

Il circuito di binario tradizionale (denominato anche c.d.b. ad una sola fuga di rotaia isolata) e' costituito da una rotaia detta "isolata", utilizzata per il suo funzionamento, e dall'altra detta "a terra", utilizzata per il ritorno delle correnti di trazione elettrica.

Per il corretto funzionamento del circuito di binario le rotaie “isolate” ed “a terra” devono susseguirsi realizzando una continuità del tipo “serie”.

I circuiti di binario che devono essere codificati per consentire la ripetizione in macchina del codice, non possono essere ad una sola fuga di rotaia isolata ma utilizzano entrambe le rotaie e debbono coesistere con il ritorno della corrente di trazione elettrica. inoltre, in alcuni casi, i circuiti di binario del blocco automatico a correnti codificate devono avere lunghezze considerevoli in tali casi vengono installate le connessioni induttive.

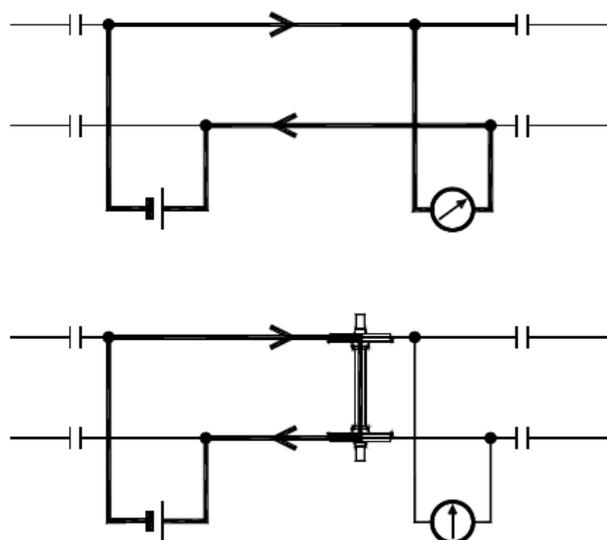


Fig. 3.3: Schema di principio del circuito del binario.

In alto stato di circuito libero e in basso stato di circuito occupato

Il transito di un veicolo sul binario mette in contatto le due rotaie e interrompe la corrente nel tratto di circuito su cui è inserito lo strumento di misura. Lo strumento di misura rileva pertanto la presenza o meno del veicolo sul binario.

Per il corretto funzionamento del dispositivo è necessario che i due tratti di rotaia abbiano continuità elettrica e che siano isolati elettricamente rispetto alla restante parte del binario. La loro lunghezza deve essere tale da limitare la caduta di tensione, che si ha per effetto della resistenza elettrica delle rotaie, a valori che garantiscano una corrente elettrica sufficiente per il sistema di rilevamento.

Inoltre, poiché le rotaie sono utilizzate nelle linee elettrificate come conduttori del circuito elettrico di trazione, è necessario che non vi siano interferenze tra la corrente di trazione e la corrente del circuito utilizzato per il rilevamento della posizione del veicolo.

Le soluzioni tecnologiche adottate per risolvere i problemi esposti sono diverse.

Si hanno circuiti a correnti continue o a correnti alternate con l'interruzione di una sola rotaia delle due o con interruzioni alternate per garantire la continuità del circuito di trazione. Altre soluzioni prevedono l'uso di correnti alternate a frequenze foniche che non richiedono l'interruzione delle rotaie.

Viene inoltre adottato il criterio del fail-safe per garantire stati sicuri anche in presenza di avarie.

Il limite di lunghezza viene superato suddividendo la sezione di blocco in più circuiti di binario tra loro collegati.

3.7 Il distanziamento tra due treni

Per potenzialità di circolazione di una linea ferroviaria si intende il numero massimo di convogli che possono utilizzare la linea nel tempo di riferimento. Essa dipende dalla velocità di marcia e dal sistema di distanziamento dei treni.

Il distanziamento tra due treni deve essere tale da lasciare tra un treno e l'altro uno spazio libero sufficiente a consentire l'arresto del treno che segue in caso di improvviso arresto del treno che precede. Esso deve tenere conto dei seguenti elementi (fig. 3.4):

- t_r è il tempo di reazione che va dall'istante di percezione dell'ostacolo all'istante di piena efficienza del sistema frenante;
- s_r è lo spazio percorso nel tempo di reazione;
- s_a è lo spazio di arresto percorso dall'istante di inizio dell'azione frenante all'arresto del veicolo;
- s_0 è il franco di sicurezza;
- a è la decelerazione in frenatura;
- v è la velocità;
- L è la lunghezza del treno.

Il distanziamento tra due treni che si seguono misurato tra le teste, calcolando lo spazio di arresto nell'ipotesi di moto uniformemente ritardato, vale pertanto

$$d = s_r + s_a + s_0 + L = v \cdot t_r + \frac{v^2}{2a} + s_0 + L \quad (1.3)$$

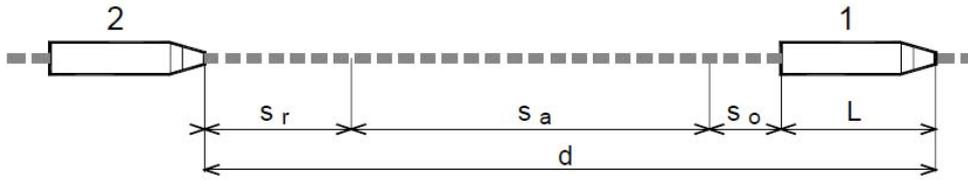


Fig. 3.4: Distanza minima di sicurezza tra due treni che marcano sulla stessa linea

Il distanziamento temporale Δt , cioè l'intervallo di tempo tra il transito di due treni successivi attraverso una sezione trasversale della linea, si ottiene, supponendo la velocità costante, dividendo il distanziamento spaziale per la velocità:

$$\Delta t = \frac{d}{v} = t_r + \frac{v}{2a} + \frac{s_0 + L}{v} \quad (2.3)$$

La potenzialità come sopra definita cioè il numero di treni che transitano sulla linea nel tempo di riferimento può essere valutata come rapporto tra il tempo di riferimento stesso e l'intervallo minimo di distanziamento tra due treni.

Prendendo come riferimento il tempo unitario essa è data dall'inverso del distanziamento temporale:

$$P = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{t_r + \frac{v}{2a} + \frac{s_0 + L}{v}} \quad (3.3)$$

La potenzialità dipende pertanto dalla velocità di marcia: in particolare nel campo delle basse velocità la potenzialità aumenta all'aumentare della velocità mentre ad alte velocità la potenzialità diminuisce con essa (fig. 3.5). Infatti, supponendo costante il tempo di reazione, a basse velocità il peso del secondo termine al denominatore è trascurabile rispetto al terzo pertanto essa ha un andamento crescente con la velocità.

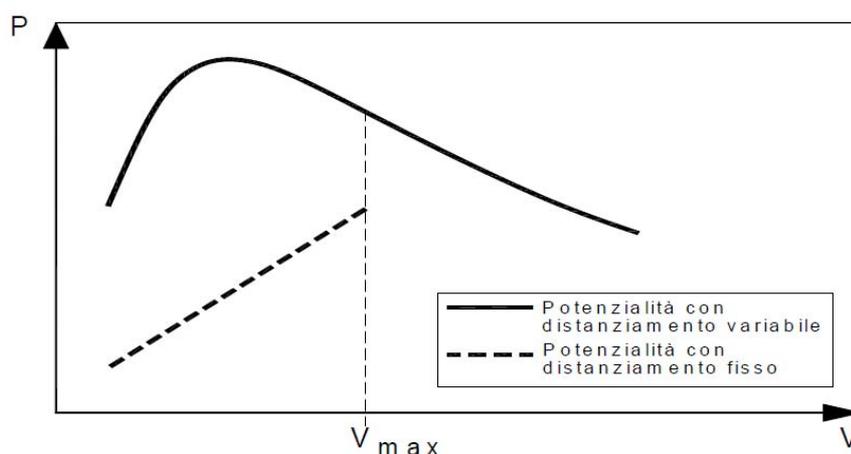


Fig. 3.5: Potenzialità teorica con distanziamento variabile (linea continua) e potenzialità con distanziamento basato su sezione di blocco di lunghezza fissa (linea tratteggiata)

A velocità più elevate diventa trascurabile il peso del terzo membro a denominatore rispetto al secondo quindi l'andamento è decrescente con la velocità.

L'espressione così ottenuta esprime la potenzialità teorica massima per treni che percorrono la linea con la stessa velocità (circolazioni omotachiche).

Essa presuppone comunque che ciascun treno sia informato istante per istante della posizione del treno che precede. Una tale condizione corrisponde a quella del cosiddetto blocco mobile.

In relazione al tipo di blocco si possono avere diverse situazioni.

3.7.1 Potenzialità con sistemi a blocco fisso

I sistemi di distanziamento basati sulla sezione di blocco forniscono informazioni al treno sullo stato di libertà o di occupazione della linea con continuità e con una precisione che dipende dalla lunghezza della sezione di blocco.

Il sistema di segnalamento rileva lo stato di occupazione di ciascuna sezione di blocco e nel caso di sezione occupata fornisce l'informazione di sezione occupata ma non la posizione esatta del treno all'interno della sezione: pertanto la posizione del treno è determinata con un errore pari all'estensione della sezione.

$$\lambda + \delta \geq vt_r + \frac{v^2}{2a} \quad (4.3)$$

D'altra parte per garantire il distanziamento di sicurezza la lunghezza della sezione deve essere almeno pari allo spazio di arresto calcolato a partire dalla velocità massima consentita sulla linea cioè deve valere la relazione (4.3) avendo indicato con λ lo spazio di avvistamento del segnale.

Il distanziamento minimo tra due treni diventa pertanto (5.3):

$$d = \lambda + \delta + D + s_0 + L \quad (5.3)$$

che come si vede risulta indipendente dalla velocità.

Il distanziamento temporale e la potenzialità risultano essere:

$$\Delta t = \frac{d}{v}$$

$$P = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v}{d} = \frac{1}{t_r + \frac{v}{2a} + \frac{D + s_0 + L}{v}} \quad (6.3)$$

Pertanto il distanziamento temporale minimo e la potenzialità massima si ottengono in corrispondenza della massima velocità v_{max} consentita dalla lunghezza della sezione di blocco.

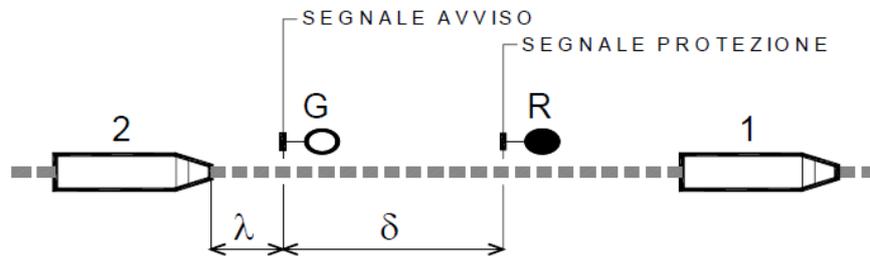


Fig 3.6: Distanza minima tra due treni con distanziamento basato su sezioni di blocco di lunghezza fissa

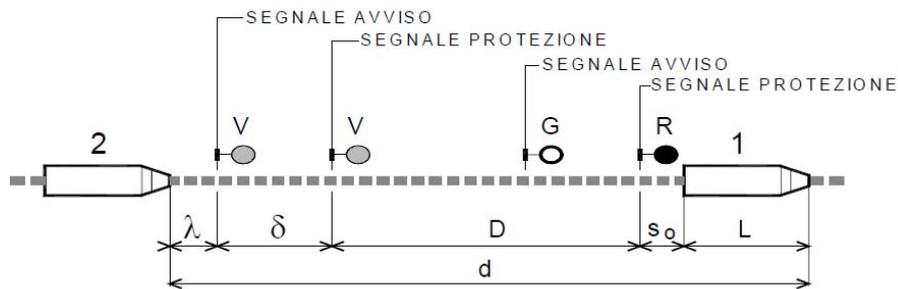


Fig. 3.7: Distanziamento con sezioni di blocco di lunghezza fissa e segnalamento a due aspetti

La potenzialità varia proporzionalmente con la velocità fino alla velocità massima (figura 3.5).

La potenzialità massima che si ottiene con questo sistema di distanziamento è inferiore a quella che si avrebbe se il distanziamento fosse quello minimo corrispondente al solo spazio di frenatura. La differenza deriva dalla presenza del termine D (lunghezza della sezione di blocco) nella relazione (6.3). Lo scarto tra la potenzialità teorica e la potenzialità effettiva dipende pertanto dal sistema di distanziamento. Esso può essere ridotto con sistemi di distanziamento che consentano di rilevare la posizione del treno con una precisione maggiore di quella che si ottiene con la sezione di blocco.

La potenzialità così ottenuta si riferisce ad una linea in cui le sezioni di blocco hanno tutte la stessa lunghezza e i treni marciano tutti alla stessa velocità. Nella realtà entrambe le condizioni non sono rispettate poiché la lunghezza delle sezioni di blocco varia lungo la linea e la linea in genere può essere percorsa da treni che hanno velocità diverse.

L'espressione sopra riportata per la potenzialità può essere ancora valida se applicata alla sezione di blocco più sfavorevole, quella a cui corrisponde il tempo di percorrenza maggiore. E' questa che determina infatti il distanziamento sufficiente per l'arresto del treno in tutte le sezioni della linea e quindi determina la sua potenzialità.

La presenza di treni che hanno velocità diverse tra loro è un ulteriore elemento che riduce la potenzialità della linea poiché interviene sul distanziamento temporale tra un treno e l'altro.

Ad esempio se un treno veloce segue un treno lento (fig. 3.8 treni 1 e 2), esso per non subire rallentamenti deve transitare o partire dalla stazione A con un distanziamento temporale superiore a quello minimo stabilito dal sistema di distanziamento poiché durante la marcia, per effetto della maggiore velocità, si avvicina progressivamente al treno che lo precede.

Per ottenere una marcia regolare l'intervallo di tempo tra la partenza di due treni successivi deve essere tanto più grande quanto più estesa è la tratta e di durata tale che il treno veloce non si avvicini mai al treno che precede una distanza pari a quella di minimo distanziamento. Se così non fosse una volta raggiunta la distanza di minimo distanziamento, esso dovrebbe ridurre la velocità e marciare alla stessa velocità del treno che precede.

Pertanto la presenza del treno lento riduce la potenzialità della linea. Nel caso di treno lento che segue treno veloce si ha una situazione analoga. In questo caso il treno lento può partire dopo un intervallo di tempo pari a quello minimo imposto dal sistema di distanziamento ed il distanziamento aumenta man mano che il treno avanza avendo come risultato una riduzione di potenzialità della linea.

Per tener conto delle diverse velocità in genere si ricorre a metodi di calcolo della potenzialità che considerano come distanziamento temporale la media dei distanziamenti corrispondenti alle diverse situazioni di successione di treni che viaggiano a velocità diverse, con la seguente espressione:

$$P = \frac{T}{\sum t_i} \quad (7.3)$$

Dove T è il tempo di riferimento e la sommatoria a denominatore comprende una serie di termini che dipendono dal distanziamento temporale medio, dai margini di tempo da aggiungere per tenere conto della probabilità del formarsi delle code e dal tipo di sistema di distanziamento.

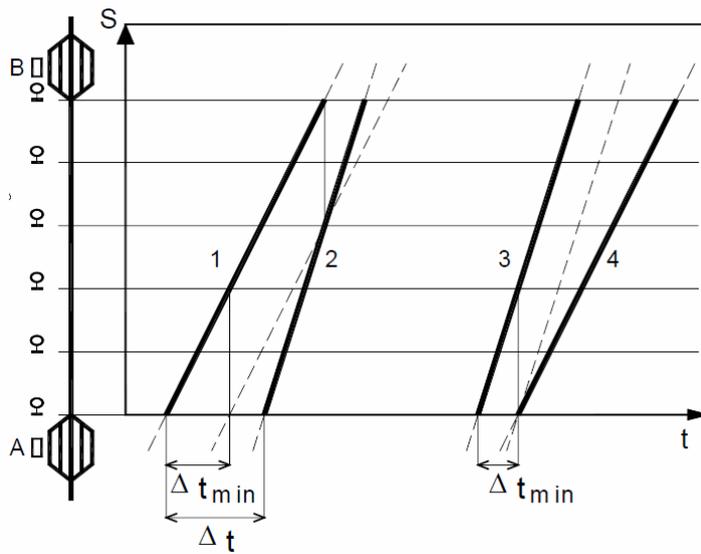


Fig. 3.8: Successione di treni a velocità diversa

Capitolo 4

La potenzialità pratica di un nodo ferroviario

4.1 La potenzialità teorica dei nodi stazione

Il metodo di cui si farà uso, pubblicato nel 1998, consente la valutazione della potenzialità teorica a mezzo di un modello matematico con riferimento alle reali condizioni di funzionamento dell'impianto, alle sue caratteristiche dimensionali, nonché alle probabilità d'arrivo in ritardo dei treni delle singole classi omotachiche, e quindi d'interferenza con gli altri convogli.

La potenzialità teorica del nodo ferroviario può essere determinata, applicando correttamente il modello di calcolo esposto, come somma delle potenzialità dei singoli itinerari indipendenti.

Per il calcolo della potenzialità di ciascun itinerario si utilizza una formula che deriva dalla classica espressione utilizzata nelle FS per la potenzialità teorica dell'itinerario $P_{T,it}$:

$$P_{T,it} = \sum_{i \in N} n_i + \frac{T - \sum_{i \in N} n_i t_i}{t} \quad (1.4)$$

in cui:

$\sum_{i \in N} n_i$ = numero dei treni che percorrono l'itinerario it nel tempo di riferimento T ;

$\sum_{i \in N} n_i t_i$ = somma dei tempi sottratti all'impianto da tutti i movimenti che si svolgono sul dato itinerario it ;

N = insieme dei treni che si riferiscono all'itinerario considerato nel tempo di riferimento;

t = tempo di occupazione regolare del nodo del generico treno della classe omotachica di riferimento.

Partendo dalla (1.4), per tener conto delle possibili interferenze che subiscono i treni che percorrono il dato itinerario, si modifica il numeratore della frazione a secondo membro:

$$P_{T,it} = \sum_{i \in N} n_i + \frac{T - \left(\sum_{i \in (N-M)} n_i t_i + \sum_{i \in M} n_i t_{occ,i} \right)}{t} \quad (2.4)$$

avendo definito con M l'insieme dei treni relativi all'itinerario considerato che possono subire interferenze; resta quindi conseguentemente definito anche l'insieme $N-M$ come l'insieme dei treni che hanno probabilità nulla di subire interferenza, per i quali, evidentemente, non va considerato il tempo di occupazione anomalo.

Tempi di occupazione

Il tempo di occupazione di un dato itinerario da parte di un treno è regolare, se il treno è solo tenuto a rispettare i tempi di predisposizione dell'itinerario e quelli di percorrenza dello stesso; è anomalo, se, invece, il treno subisce interferenza sul proprio itinerario a causa di altri treni che percorrono itinerari non indipendenti da quest'ultimo. La causa di un tempo di occupazione anomalo può essere solo l'arrivo fuori orario (in particolare in ritardo) dei treni interferenti.

Tenendo quindi conto della probabilità P_{ij} che un treno i subisca interferenza da un treno j , il tempo di occupazione dell'itinerario da parte di i può essere espresso dalla:

$$t_{occ,i} = P_{ij} \cdot \tau_{ij} + (1 - P_{ij}) \cdot t_i \quad (3.4)$$

dove:

τ_i = tempo di occupazione anomalo dell'itinerario da parte del treno i

t_i = tempo di occupazione regolare dell'itinerario da parte del treno i .

In sostanza il tempo di occupazione medio di un dato itinerario da parte di un treno è tanto più vicino al tempo di occupazione regolare quanto minore è la probabilità che il treno subisca interferenza; infatti dalla (3.4):

$$\begin{aligned} t_{occ,i} &= t && \text{per } P_{ij} = 0 \\ t_{occ,i} &= \tau_i && \text{per } P_{ij} = 1 \end{aligned}$$

Per determinare il tempo regolare di occupazione basta tener conto, prendendo per esempio un treno in arrivo, del tempo necessario per la costruzione di un itinerario (fino alla manovra a via libera del segnale di protezione dell'impianto), del tempo che intercorre dal momento in cui l'itinerario è formato a quello dell'effettivo arrivo del treno al segnale di protezione, del tempo fisico di percorrenza dell'itinerario fino alla sosta e del tempo di sosta.

Analogamente, senza scendere nel dettaglio, si possono calcolare banalmente i tempi di occupazione regolare per treni in partenza ed in transito.

Sostituendo nella (2.4) a $t_{occ,i}$ l'espressione (3.4), effettuando alcuni passaggi algebrici ed estendendo la somma a tutti gli it itinerari indipendenti del nodo, si ottiene l'espressione definitiva del modello per il calcolo della potenzialità teorica del nodo ferroviario:

$$P_{T,N} = \sum_{it} \left[\sum_{i \in N} n_i + \frac{T - \left(\sum_{i \in N} n_i t_i + \sum_{i \in M} n_i P_i (\tau_i - t_i) \right)}{t} \right] \quad (4.4)$$

in cui si è indicata con P_i la probabilità che il generico treno di classe i subisca interferenze da parte di un qualsivoglia numero di treni interferenti j .

Probabilità di interferenza

Per quanto riguarda il termine P_{ij} , esso va calcolato integrando in un opportuno intervallo di tempo un'adeguata funzione di densità di probabilità di arrivo al nodo; sperimentalmente è stato riscontrato che la funzione che assolve meglio allo scopo è la log-normale, che si riporta di seguito:

$$f_x(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5.4)$$

In cui μ e σ sono rispettivamente la media e lo scarto quadratico medio della distribuzione log – normale, espressi analiticamente dalle:

$$\mu = \ln \mu_{(x)} - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_{(x)}^2}{\mu_{(x)}^2}\right)$$

$$\sigma^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{(x)}^2}{\mu_{(x)}^2}\right)$$

$\mu_{(x)}$ e $\sigma_{(x)}$ sono la media aritmetica e lo scarto quadratico medio dei valori assunti dalla variabile x .

La probabilità che un treno j interferisca con i è data dalla probabilità che i due eventi “arrivo al nodo” siano contemporanei, e quindi in termini analitici risulta:

$$P_{i,j} = \int_{T_A - t_j}^{T_B} f_j \cdot \left(\int_t^{t+t_j} f_i dt \right) dt \quad (6.4)$$

in cui:

T_A, T_B = estremi dell'intervallo della funzione di distribuzione degli arrivi;

f_i, f_j = funzioni di densità di probabilità di arrivo al nodo dei treni i e j ;

t_j = tempo regolare di occupazione del treno interferente.

In realtà il semplice prodotto della probabilità di subire interferenza per il numero di treni interferiti è valido solo nel caso in cui gli orari di arrivo del treno interferito e di quello interferente siano cadenzati e quindi sfalsati sempre dello stesso intervallo di tempo; infatti l'integrale (6.4) assume valori diversi a seconda degli estremi di integrazione, che a loro volta dipendono dalle “posizioni” relative delle funzioni di distribuzione su una scala temporale.

Tali funzioni di distribuzione di tipo log – normale vanno posizionate sulla scala temporale in modo da rispettare la differenza fra gli orari di arrivo programmati del treno interferente e di quello potenzialmente interferito (Figura 4.1).

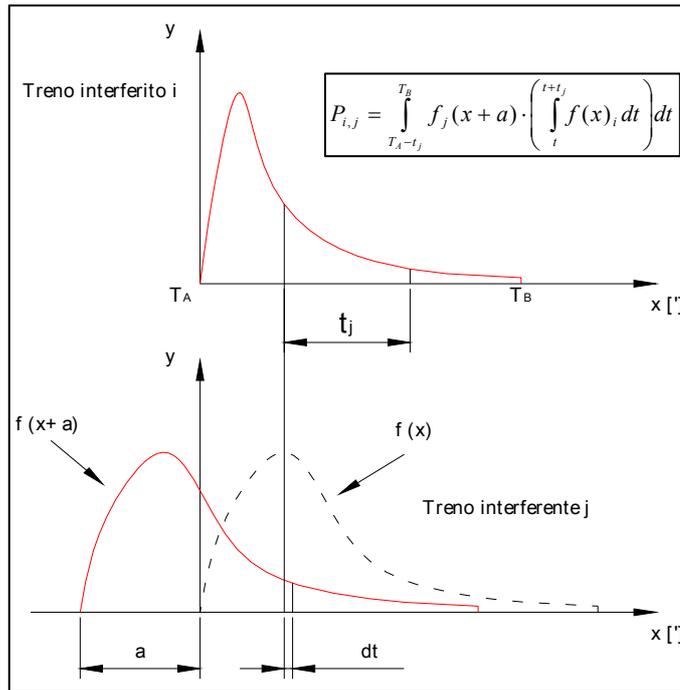


Fig. 4.1: Distribuzione delle probabilità di arrivo al nodo dei treni i e j e calcolo dell'interferenza subita dal treno i a causa di j

La funzione di distribuzione log – normale, come tutte le funzioni di distribuzione, tende a 0 per x tendente ad infinito ed assume valore 0 per $x = 0$, il che equivale ad assumere che un treno non possa arrivare in anticipo; l'estremo inferiore di integrazione dell'integrale esterno dovrebbe quindi essere 0; ma il treno j che dovesse arrivare prima dello 0 (istante T_A di arrivo del treno interferito) di un tempo minore o uguale a t_j potrebbe interferire comunque con il treno i : per questo l'estremo inferiore di integrazione dell'integrale esterno è $T_A - t_j$.

La scelta dell'estremo superiore coincide con quella del massimo ritardo che comunemente viene considerato; l'andamento asintotico della funzione

di distribuzione significa che esistono probabilità di arrivo sempre minori all'aumentare del ritardo e che un treno possa arrivare con un ritardo al limite infinito; si assume quindi come ritardo massimo ipotizzabile quello che non viene superato dal 90% dei treni: la funzione di distribuzione viene integrata fra lo 0 e il valore in corrispondenza del quale l'area sottesa dalla funzione di distribuzione è pari al 90% degli arrivi.

Pertanto l'estremo superiore di integrazione varia di volta in volta in funzione della classe di treni che si considera come interferenti. Diverse classi di treni hanno infatti generalmente funzioni di distribuzione degli arrivi diverse.

4.2 La potenzialità pratica del nodo

L'espressione (4.4) definisce la potenzialità teorica del nodo ferroviario; la *potenzialità pratica* potrà essere ottenuta moltiplicando la stessa per il modulo di un opportuno vettore $\beta = \{\beta_k\}$, inferiore dell'unità, i cui vettori componenti in \mathfrak{R}^m sono rappresentativi di anomalie riscontrabili nel funzionamento degli apparati per l'istadamento dei treni ed, in generale, alle altre carenze attribuibili agli apparati di linea o di stazione ovvero alle procedure di esercizio.

Poiché la *potenzialità*, o capacità di circolazione, di una linea o di un nodo ferroviario dipende sia dalla configurazione del sistema infrastrutturale, sia dalle modalità di utilizzo degli impianti da parte dei diversi convogli, ne discende che la funzionalità di un sistema ferroviario è correlata

intimamente alle caratteristiche dei sistemi di protezione, all'organizzazione dell'orario ed alle capacità di smistamento del traffico nelle stazioni e nei nodi.

Ciascuna delle variabili enunciate, come si vedrà più avanti, determina, in forma più o meno diretta i cosiddetti *fattori potenziali di rischio* nella sicurezza del funzionamento dell'impianto.

La sicurezza è, poi, legata alla probabilità di occupazioni anomale dei binari, all'affidabilità dei singoli elementi costitutivi dell'impianto, alle procedure di esercizio ed, infine, al "fattore uomo", sia in situazioni standard che in condizioni di sicurezza degradate.

Nella progettazione ferroviaria e, in particolare, negli interventi di riqualificazione della rete, importanza strategica riveste l'attuale funzionamento dei nodi di smistamento dei flussi di traffico, onde garantire adeguati standard prestazionali all'intero sistema, sotto il profilo sia dell'economicità e dell'efficienza, che della sicurezza d'esercizio.

Per ciò che concerne, poi, tale centrale problematica della sicurezza e, dunque, dell'incidentalità, opportuna attenzione deve essere rivolta, nell'ambito dell'analisi di rete, ai cosiddetti incidenti potenziali, cioè a tutte quelle situazioni anomale che possono, per entità e natura, generare un'accentuazione del livello di rischio localizzato o diffuso.

A tal proposito, bisogna, comunque, osservare che un ruolo significativo sulla qualità e sulla sicurezza svolgono non solo specifici elementi di pericolo riferiti al sistema infrastrutturale, ma anche la stessa configurazione delle procedure di esercizio e della gestione degli impianti, nonché il determinante "fattore uomo" che rappresenta, il più delle volte, la causa comprimaria e, spesso, decisiva dei fenomeni di incidentalità.

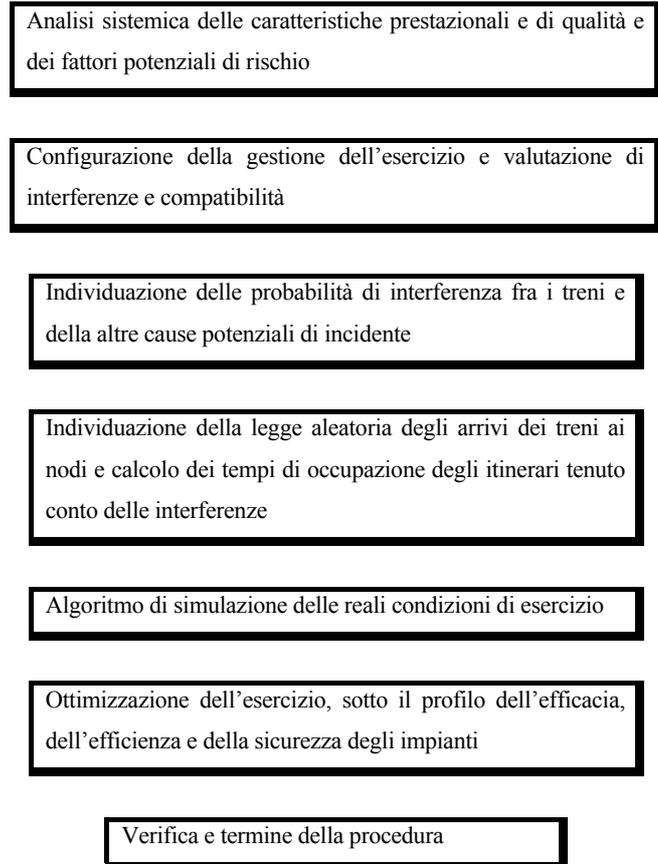
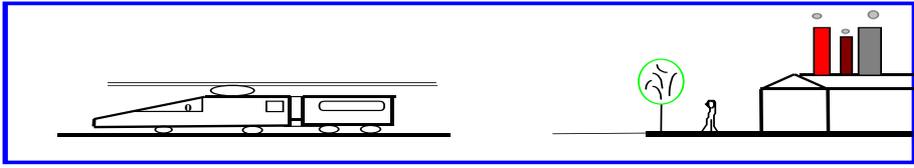


Fig. 4.2: Fasi logiche della metodologia di approccio allo studio di ottimizzazione



<i>Uomo</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Sistema veicolo - infrastruttura</i>
<i>Conducente</i>	<i>Condizioni atmosferiche avverse</i>	<i>Carenze attribuibili ad opere tecnologiche e ad apparati di linea e di stazione</i>
Problemi psico-fisici e/o errate valutazioni nella marcia; inosservanza dei segnali, di limitazioni o prescrizioni, etc.; . . .	Neve, gelo, turbolenze, nebbia, etc.; escursioni termiche eccessive; . . .	Anomalie tecnologiche degli impianti fissi; inadeguatezza del materiale rotabile rispetto alle condizioni tipologiche della linea; . . .
<i>Personale addetto e operatori</i>	<i>Eventi calamitosi ed altri imprevisti</i>	<i>Dissesti ed ammaloramenti del corpo stradale</i>
Deficit manutentivi; carenza nelle procedure di esercizio ed operazioni connesse (inosservanza di norme, regolamenti, etc.); . . .	Movimenti tellurici, smottamenti di terreno, frane, caduta massi, etc.; presenza di ostacoli sulla linea, anche a seguito di raffiche di vento o di trombe d'aria, etc.; . . .	Problemi connessi alle tipologie costruttive dei manufatti, etc.; carenza di apposito protocollo manutentivo, etc; . . .
<i>Passeggeri</i>	<i>Incendi nel territorio interessato ed altre cause esterne</i>	<i>Problemi di funzionamento degli equipaggiamenti fissi e mobili</i>
Conseguenze derivanti da imprudenze, sabotaggi, etc.; trasporto di sostanze pericolose; . . .	Vulnerabilità specifiche del territorio, etc.; pedologia e gestione agronomica dei suoli, etc.; . . .	Deficit del materiale rotabile; affidabilità dei componenti del sistema di equipaggiamento e segnalamento per i distanziatori di linea, etc.; . . .

Fig .4.3: Fattori di rischio per il comfort e la sicurezza d'esercizio nel caso ferroviario

Nella fig. 4.2 è riportato il diagramma a blocchi della successione delle fasi di lavoro mediante le quali è stato possibile pervenire al risultato che ci si era prefissi di raggiungere, mentre nella fig. 4.3 sono rappresentati i caratteristici fattori potenziali di rischio.

4.3 Il modello inferenziale Fuzzy per la determinazione del coefficiente di utilizzazione della potenzialità teorica

Il *Sistema Inferenziale Fuzzy* (SIF) è un processo che consente di generare un sistema di dati di output partendo da dati di input ed utilizzando la logica fuzzy. Il processo tiene conto delle funzioni di membership e degli operatori logici, di cui si è discusso precedentemente, e delle regole di tipo *if-then*, di cui si discuterà nel seguito del presente lavoro.

I sistemi inferenziali fuzzy hanno avuto un enorme successo in applicazioni quali controlli automatici, analisi decisionale, sistemi esperti, microprocessori. Nel presente lavoro il sistema inferenziale viene utilizzato per modellizzare il legame che esiste tra un sistema di dati di *input / output* costituito rispettivamente da un sistema di cause associate all'incidentalità ferroviaria (opportunosamente elaborati dai dati forniti dalle Ferrovie dello Stato) e da un indice di utilizzazione in grado di potere fornire il grado di correzione, adeguato ad un maggiore livello di sicurezza dell'esercizio, alla potenzialità teorica.

La struttura di base di un SIF (Sistema Inferenziale Fuzzy) è composta da un certo numero di input che consistono in funzioni di membership, da un sistema, più o meno complesso, di regole *if-then*, da un certo numero di

output, che possono essere funzioni di membership, e da un sistema di operatori fuzzy che consentono la connessione dei vari livelli o layers.

In fig. 4.4 è mostrato uno schema generale di un semplice sistema inferenziale fuzzy composto da n funzioni di input da regole if-then e da un sistema di m funzioni di output.

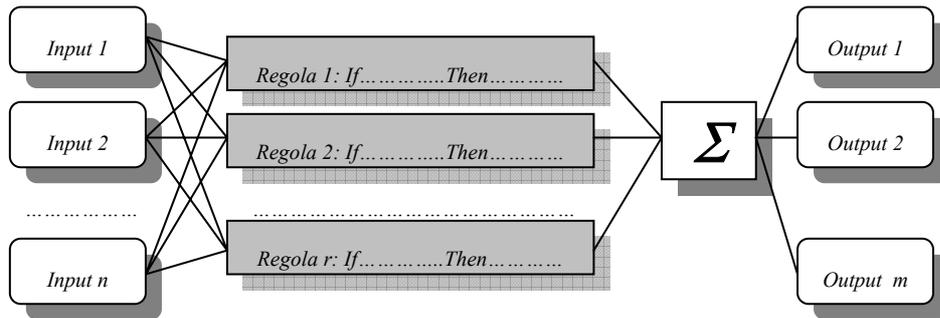


Fig. 4.4: Sistema Inferenziale Fuzzy

Il flusso di informazioni viaggia da sinistra verso destra e all'uscita del sistema i dati vengono defazzificati e resi crisp. Il sistema di regole parallele è un aspetto fondamentale dei sistemi inferenziali fuzzy, infatti è possibile, anche tramite l'utilizzo contemporaneo di più regole, passare in maniera graduale tra regioni in cui il comportamento del sistema è gestito da una regola piuttosto che da un'altra.

Il processo inferenziale fuzzy si suddivide in 5 parti:

- fazzificazione delle variabili di ingresso;
- applicazione degli operatori fuzzy AND e OR nell'antecedente¹;

¹ Si definisce parte *antecedente* di un sistema inferenziale la parte relativa alla fazzificazione dei dati di input e la prima parte delle regole (*if...or...and*). Si definisce

- implicazione dall'antecedente al conseguente;
- aggregazione del conseguente tramite il sistema di regole;
- fase di defuzzificazione.

Il primo passo consiste nel determinare il grado di appartenenza ad ogni fuzzy set dei vari input presi in considerazione attraverso le appropriate funzioni di membership.

Il valore di input è sempre un valore numerico di tipo *crisp* opportunamente definito nell'intervallo $[0, 1]$, cioè normalizzato.

Per il caso in esame le variabili di riferimento sono le seguenti:

- Disattenzione viaggiatori e personale FS;
- Indebito attraversamento dei binari;
- Irregolari movimenti di manovra;
- Indebita salita/discesa dal treno;
- Persone sulla sede ferroviaria non a distanza di sicurezza;
- Anormalità riguardanti le squadre/cantieri di lavoro.

Segue la fase di fuzzificazione che consiste nella ricerca e definizione della funzione di appartenenza. Per ognuna delle variabili sopra elencate si sono considerate tre funzioni di membership in relazione al grado di appartenenza del valore numerico riscontrato.

Una volta note le funzioni di membership si conosce anche, per ogni regola, il grado con cui ogni parte di antecedente è stato soddisfatto. Se l'antecedente di una data regola è composto da più di una parte, si utilizzano gli operatori fuzzy al fine di ottenere un valore numerico fuzzy che rappresenti l'intero antecedente. I dati di ingresso per gli operatori

conseguente la fase relativa alla seconda parte delle regole (...*then*) e alla defuzzificazione.

fuzzy consistono in due o più valori di appartenenza, derivanti dalle variabili di input fuzzificate. L'output è un valore singolo.

Gli operatori logici più utilizzati sono l'AND e l'OR. L'operatore AND coinvolge le operazioni matematiche di min (minimo) e prod (prodotto algebrico), l'operatore OR si attua tramite le operazioni di max (massimo) e il probor (or-probabilistico) meglio conosciuto come somma algebrica.

Prima di passare al passo 3 bisogna fare molta attenzione nel valutare bene i pesi delle regole if-then. Ogni regola, infatti, può essere controllata da un fattore di amplificazione (o peso) che consiste in un numero compreso tra 0 e 1 che si applica al valore dato dall'antecedente. Di solito tale peso è pari a 1 in modo da non avere alcun effetto nel processo di implicazione. Se poi, in fase di calibrazione, si verifica, facendo delle opportune iterazioni, che il valore unitario non è opportuno per gestire alla perfezione il sistema è bene modificare il valore di una quantità che si ritiene idonea per migliorare il sistema inferenziale. L'implicazione, che è strettamente necessario definire per ognuna delle regole, dipende dall'impostazione della parte conseguente. Il sistema di regole che è stato utilizzato per costruire il modello inferenziale in esame è molto semplice. Esso è infatti costituito da quattro regole riuscendo così a generare un sistema non estremamente complesso ma in grado di dare buone informazioni di output.

L'input per il processo di implicazione è un numero singolo generato dall'antecedente, mentre il valore di output è un fuzzy set. Le operazioni utilizzate per l'implicazione sono le stesse utilizzate per l'operatore AND e cioè il min, che genera un output fuzzy tronco, e il prod che invece genera un output pesato.

La fase di aggregazione consiste nell'unificare tutti gli output delle regole, prendendo i fuzzy set che rappresentano l'output di ogni regola e combinarli in un unico fuzzy set per poi passare alla fase finale di defuzzificazione. L'input del processo di aggregazione consiste nelle funzioni di output generate, da ogni regola, dal processo precedente di implicazione, l'output consiste in un fuzzy set per ogni variabile di uscita. Si osservi che essendo il metodo di aggregazione commutativo, l'ordine con cui vengono prese in considerazione le regole può essere qualsiasi.

I metodi utilizzati sono di solito l'operatore max, il probor, ed il sum (somma dell'output di ogni regola). Infine la fase di defuzzificazione consente di passare da un fuzzy set (aggregato) ad un output di tipo crisp. Il metodo di defuzzificazione di solito più utilizzato è il metodo del centro di gravità che assume come valore crisp di un numero fuzzy \tilde{A} il centro di gravità dell'area sottostante la funzione di membership di \tilde{A} , cioè:

$$A = \frac{\int x \cdot \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot dx}{\int \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot dx} \quad \text{o} \quad A = \frac{\sum_{k=1}^m x_k \cdot \mu_{\tilde{A}}(x_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_{\tilde{A}}(x_k)}$$

Tuttavia vi sono altri metodi che hanno dato buoni risultati, quali il metodo del centroide, della bisettrice, il centro del massimo (la media del valore massimo dei valori di output), il valore massimo più grande e il valore massimo più piccolo.

Si può osservare come per casi frequenti di indebito attraversamento dei binari e di presenza di persone sulla sede ferroviaria non a distanza di

sicurezza il sistema di regole porta ad una determinazione dell'indice di sicurezza maggiore di 0,5 il che significa che la presenza delle sole due cause associate mette notevolmente a rischio l'esercizio dell'intero sistema dimezzando la potenzialità teorica e, ovviamente, esponendo ad un possibile rischio sia gli addetti ai lavori che l'utenza.

Capitolo 5

Lo studio delle criticità di esercizio nella rete ferroviaria attraverso problemi geometrici di tipo Laplace

5.1 Introduzione

Per il trasporto ferroviario, soprattutto in condizioni di utilizzo della rete in modo promiscuo (contemporanea presenza di convogli passeggeri e merci) e di eterotachicità (differente velocità di esercizio) dei flussi di traffico, il problema dell'affidabilità e dell'efficienza della rete si può matematicamente schematizzare facendo riferimento a due classi di variabili caratteristiche: la domanda D di utilizzazione della risorsa infrastrutturale r esaminata (arco $h - k$ della rete, itinerario i , eccetera) e la capacità di resistenza offerta (in termini di sicurezza) dalla stessa risorsa r ,

che denoteremo con R . Secondo tale approccio metodologico, le condizioni d'affidabilità del sistema saranno verificate se risulta (in modulo) $R > D$ e, quindi, se vengono soddisfatte le relazioni scalari:

$$M = R - D > 0 \text{ (margine di sicurezza)}$$

e

$$\Phi = R/D > 1 \text{ (fattore di sicurezza).}$$

Note le funzioni di probabilità delle predette variabili aleatorie R e D , la probabilità che venga raggiunto lo stato limite di vulnerabilità è espressa dalla somma integrale delle probabilità che il fattore di sicurezza Φ sia compreso nell'intervallo $[0, 1]$;

$$P_r = \int_0^1 f_{\Phi}(\Phi) d\Phi$$

dove f_{Φ} è la funzione di densità della probabilità della variabile Φ , mentre la corrispondente affidabilità è misurata dall'espressione:

$$P_a = 1 - P_r.$$

Sulla base di quanto precede, emerge chiaramente come le condizioni d'efficienza della rete e di qualità globale d'esercizio sono, dunque, strutturalmente legate alle caratteristiche d'affidabilità e di vulnerabilità dei singoli itinerari.

L'affidabilità globale dell'intero sistema ferroviario dipende, però, da quella dei suoi singoli componenti e, in particolare, da quelli direttamente correlati alla circolazione dei treni anche all'interno dei nodi stazione, ove vengono eseguite le manovre di più elevata complessità. In differenti condizioni dimensionali dell'impianto, risulta possibile definire il legame funzionale tra grado di percezione del rischio e possibili cause dei sinistri, ad esempio, mediante la tecnica degli insiemi fuzzy (*Fuzzy Sets*) che consente di stabilire il valore numerico della capacità pratica dei nodi ferroviari, con riferimento alle relazioni logico - qualitative tra le caratteristiche dell'impianto e le condizioni potenziali di rischio specificamente stimate. Tale approccio consente d'individuare il modulo d'un opportuno vettore $\Delta < I$ d'utilizzazione della potenzialità teorica in condizioni di massima affidabilità del sistema sotto l'aspetto della sicurezza. Operativamente, un primo elemento, basilare per il raggiungimento della "configurazione sicura" del nodo, riguarda anche l'installazione e la tipologia delle procedure d'attivazione dei sistemi di protezione configurati in relazione a tutte le possibili anomalie potenziali (azioni delittuose, incendi, interventi d'estranei sugli impianti tecnologici, guasti negli apparati di controllo e di predisposizione degli itinerari, errore umano eccetera).

5.2 La schematizzazione della rete ferroviaria per l'analisi delle criticità di esercizio

Le normali condizioni di funzionamento della rete ferroviaria possono essere, talvolta, compromesse in esercizio da particolari che non consentono, a causa di ostacoli lungo la linea, l'ordinaria circolazione dei mezzi. In tali condizioni di criticità, occorre allora opportunamente individuare appositi itinerari alternativi per assicurare con efficacia l'effettuazione del servizio di trasporto al previsto recapito finale, per ciascuna delle relazioni origine Destinazione O-D interessate dall'evento esaminato. Dal punto di vista metodologico, il problema può essere adeguatamente affrontato facendo ricorso alla teoria delle *probabilità geometriche*. Considerando, infatti, il grafo rappresentativo della rete come un insieme unione di figure geometriche (quadrati, poligoni regolari in genere ecc.) formanti appositi *reticoli* \mathfrak{R} , nello spazio geometrico di riferimento, è possibile servirsi di particolari modelli matematici, rappresentativi dei treni, per studiare il relativo moto in \mathfrak{R} e le eventuali interferenze su di essi generate da ostacoli (di forma e dimensioni prefissate) lungo il percorso O-D prefigurato.

Nel campo ferroviario, tali *corpi-test*, per le analisi che ci proponiamo d'effettuare nel seguito, possono essere assunti come segmenti di opportuna lunghezza l (per schematizzare un convoglio con un elevato numero di carrozze, come ad esempio avviene nella composizione di un treno merci eccetera), ovvero costituiti da rettangoli di lati l_1 e l_2 (come nel caso di un pendolino, di un treno regionale, eccetera).

Per pervenire alla risoluzione matematica del problema posto, ipotizzeremo comunque, negli sviluppi successivi, che ciascun lato del reticolo considerato offra la stessa capacità di resistenza all'avanzamento del corpo-test. Inoltre, per \mathfrak{R} verrà assunta la forma rettangolare, mentre per gli ostacoli verrà assunta una diversa forma quadrata e circolare (ad esempio, rappresentanti la sezione di un tronco di albero caduto accidentalmente) e, infine, come corpo-test sarà utilizzato un segmento di lunghezza costante l .

Sia $\mathfrak{R}(a,c)$ un reticolo regolare con la cella fondamentale C_0 un rettangolo di lati a e b e quattro ostacoli, due quadrati con diagonali c e

due cerchi di raggio $\frac{c}{2}$ con $c < \min(a,b)$, (fig. 5.1).

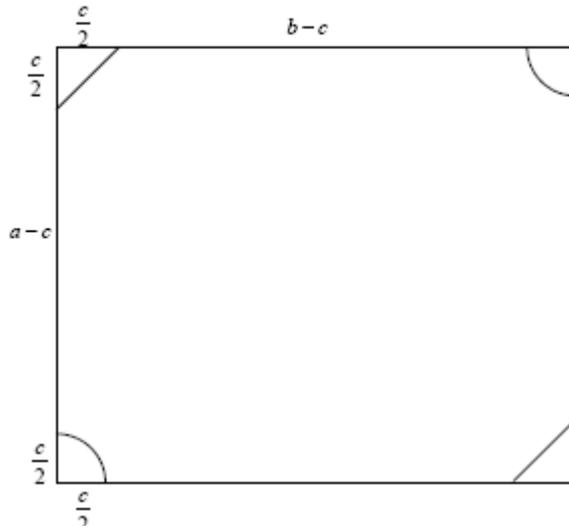


Fig. 5.1: Rappresentazione di $\mathfrak{R}(a,c)$

Abbiamo che:

$$areaC_0 = ab - \frac{(2\pi + 1)c^2}{4} \quad (1.5)$$

Vogliamo determinare la probabilità che un segmento s di posizione aleatoria e lunghezza costante l , con:

$$\frac{c}{2} < l < \min(a, b)$$

intersechi un lato del reticolo \mathfrak{R} (a, c).

Questa probabilità è uguale alla probabilità P_{int} che il segmento s intersechi un lato della cella fondamentale. Per calcolare questa probabilità consideriamo una posizione del segmento s di punto medio p e che formi un angolo φ con l'asse x . Si considerano le posizioni limite del segmento s e sia la figura determinata da queste posizioni (fig. 5.2):

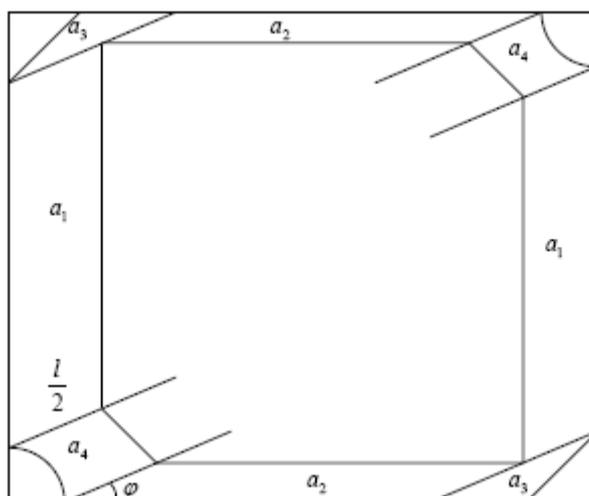


Fig. 5.2: Figura che soddisfa le ipotesi

Con queste notazioni di questa figura possiamo scrivere:

$$area\hat{C}_0(\varphi) = areaC_0 - 2[areaa_1(\varphi) + areaa_2(\varphi) + areaa_3(\varphi) + areaa_4(\varphi)] \quad (2.5)$$

Da una ricerca precedente (Caristi G. and Stoka M., A Laplace type problem for a regular lattice with obstacles (I), Atti Acc. Sci. Torino, to appear.) si ha che:

$$\begin{aligned}
 \text{area}a_1(\varphi) &= \frac{(a-c)l \cos \varphi}{2}, \\
 \text{area}[a_2(\varphi) + a_3(\varphi)] &= \frac{(b-c)l \sin \varphi}{2}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\text{area}a_4(\varphi) = \frac{cl}{4}(\sin \varphi + 2 \cos \varphi) - \frac{l^2}{4} \sin 2\varphi - \frac{(\pi-2)c^2}{8}$$

Sostituendo nella (2.5) l'espressione (3.5) otteniamo che:

$$\begin{aligned}
 \text{area}\widehat{C}_0(\varphi) &= \text{area}C_0 - \left[(a-c)l \cos \varphi + (b-c)l \sin \varphi + \frac{cl}{2}(\sin \varphi + 2 \cos \varphi) - \frac{l^2}{2} \sin 2\varphi - \frac{(\pi-2)c^2}{4} \right] = \\
 \text{area}C_0 - \left[al \cos \varphi + \left(b - \frac{c}{2} \right) l \sin \varphi - \frac{l^2}{2} \sin 2\varphi - \frac{(\pi-2)c^2}{4} \right]
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Indicando con M l'insieme dei segmenti s che hanno il baricentro in C_0 e N l'insieme dei segmenti s che non intersecano con la frontiera di C_0 , abbiamo:

$$P_{\text{int}} = 1 - \frac{\mu(N)}{\mu(M)} \tag{5.5}$$

Dove μ è la misura di Lebesgue nel piano Euclideo. Per calcolare $\mu(N)$ e $\mu(M)$ utilizziamo la misura cinematica di Poincarè:

$$dk = dx \wedge dy \wedge d\varphi$$

Dove x, y sono le coordinate di P e φ l'angolo definito.

Poiché c , dalla (1.5) abbiamo:

$$\mu(M) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \iint_{\{(x,y) \in C_0\}} dx dy = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (area C_0) d\varphi = \frac{\pi}{2} area C_0 \quad (6.5)$$

e considerando la (4.5), abbiamo che:

$$\begin{aligned} \mu(N) &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \iint_{\{(x,y) \in C_0\}} dx dy = \int_0^{\frac{\pi}{2}} area \widehat{C}_0(\varphi) d\varphi = \\ &= \frac{\pi}{2} area C_0 - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[al \cos \varphi + \left(b - \frac{c}{2} \right) l \sin \varphi - \frac{l^2}{2} \sin 2\varphi - \frac{(\pi - 2)c^2}{4} \right] d\varphi = \\ &= \frac{\pi}{2} area C_0 - \left[al \sin \varphi - \left(b - \frac{c}{2} \right) l \cos \varphi + \frac{l}{4} \cos 2\varphi - \frac{(\pi - 2)c^2}{4} \cdot \varphi \right]_0^{\frac{\pi}{2}} \\ &= \frac{\pi}{2} area C_0 - \left[\left(a + b - \frac{c}{2} \right) l - \frac{l^2}{2} - \frac{\pi(\pi - 2)c^2}{8} \right] \quad (7.5) \end{aligned}$$

Dalle relazioni (1.5), (5.5), (6.5) e (7.5) abbiamo che:

$$P_{\text{int}} = \frac{2 \left(a + b - \frac{c}{2} \right) - l^2 - \frac{\pi(\pi - 2)}{4} c^2}{\pi \left(ab - \frac{2\pi + 1}{4} c^2 \right)} \quad (8.5)$$

Quando $c \rightarrow 0$ la cella fondamentale C_0 diventa rettangolo di lati a e b e gli ostacoli diventano punti e la probabilità (8.5) diventa la probabilità di Laplace:

$$P = \frac{2(a+b)l - l^2}{\pi ab}$$

Capitolo 6

Analisi della sicurezza e della qualità della rete ferroviaria

6.1 Lo studio delle variabili e la rappresentazione vettoriale del problema

I sistemi tecnologicamente avanzati per il controllo della marcia dei treni e per garantire nella massima sicurezza la mobilità promiscua sia dei convogli passeggeri che delle merci nella rete, non hanno mai fatto venir meno l'attenzione per il rispetto del comfort psicofisico del conducente e della connessa verifica puntuale del tracciato, anche sotto l'ottica delle possibili reazioni che si possono determinare durante il moto soprattutto

in punti singolari o critici per la circolazione. La necessità di garantire all'utenza un ottimale qualità del viaggio, implica l'esigenza progettuale di un approccio integrato al problema dell'analisi di rete, per affrontare compiutamente i problemi che hanno riflesso sulla sicurezza di esercizio. Tale approccio sistemico, per ogni ipotesi di lavoro considerata (variazione di elementi geometrici, diverso coordinamento plano-altimetrico, particolari materiali impiegati, specifiche configurazioni delle opere d'arte, nodi-stazione, etc.), consente di valutare in modo integrato il complesso degli effetti positivi e negativi generati sia nel contesto della rete interessata (archi, nodi, etc.), sia nelle interazioni tra l'uomo ed il sistema "veicolo - infrastruttura - ambiente", onde pervenire agevolmente alla scelta della migliore soluzione progettuale in studio.

A ciascuna alternativa compatibile (cioè rispettosa dei vincoli economico - finanziari, ambientali, etc.) potrà, così, essere associato un apposito indicatore di utilità globale U_g che sinteticamente esprima, per l'intero sistema formato dall'uomo, dal veicolo, dalla rete ferroviaria e dall'ambiente, la specifica qualità globale relativa per la i -esima opzione in esame. Tale indicatore può essere opportunamente costruito sulla base dei flussi di utilità attualizzati² associati alla specifica alternativa di azione progettuale, rapportati all'ipotesi neutra, cioè al "non intervento" (variazioni degli standard di sicurezza nella rete, di affidabilità degli

² In particolare, nel caso di effetti indotti su talune risorse ecosistemiche non risulta possibile fare riferimento all'usuale indicatore di scarsità e di utilità rappresentato dal prezzo di mercato; inoltre, nel caso di impatti (positivi o negativi) permanenti non è neanche applicabile il criterio classico dell'attualizzazione, basato sul ricorso alla nota formula dell'interesse composto. In tali circostanze, sarà pertanto necessario ricorrere ad appositi criteri "suppletivi del mercato", fondati sulle diverse teorie per il calcolo delle "esternalità".

itinerari, di qualità ambientale nel sito e nell'area vasta, del costo generalizzato del trasporto, del comfort di viaggio e della sicurezza percepita dall'utente, etc).

I sistemi tecnologici avanzati per il controllo della marcia dei treni e per garantire nella massima sicurezza la mobilità promiscua (oltre che eterotachica) sia dei convogli passeggeri che delle merci nella rete, non hanno comunque fatto mai venir meno l'attenzione per il rispetto del comfort psicofisico del conducente e della connessa verifica puntuale del tracciato, anche sotto l'ottica delle probabili reazioni che durante il moto si possono determinare soprattutto in punti singolari o critici per la circolazione. La necessità, poi, di garantire in ogni circostanza all'utenza un'ottimale qualità del viaggio, implica l'esigenza progettuale di un approccio integrato al problema dell'analisi di rete, per affrontare compiutamente i molteplici aspetti (di diversa entità e natura) che hanno influenza sulla sicurezza d'esercizio. Occorre, cioè, analizzare assieme allo studio dell'equilibrio dinamico del mezzo ed alle caratteristiche della linea anche il cosiddetto "fattore uomo", onde effettuare scelte ingegneristiche tali da determinare opportuni standard di sicurezza e comfort globale d'esercizio.

Certamente nella tematica della migliore qualità della soluzione progettuale intervengono altri elementi tecnici non trascurabili, comprese le caratteristiche della sezione trasversale, la tipologia ed i flussi di traffico previsti, la velocità dei convogli, le condizioni meteo-climatiche prevalenti, quelle orografiche e geologiche del territorio, l'incidenza dei costi, etc.

La ricerca della soluzione ottimale, quindi, non può essere indicata da una formula matematica, più o meno complessa, ma va individuata caso per caso, considerando una o più macro soluzioni alternative, per ciascuna delle quali potrà svolgersi uno studio puntuale delle condizioni offerte e procedere, poi, eventualmente, a correzioni ed adattamenti specifici successivi, onde riuscire ad individuare le scelte di progetto globalmente più confacenti.

Dal punto di vista metodologico, si può, comunque, procedere costruendo un opportuno modello interpretativo delle interazioni fra il fenomeno circolatorio (binomio "uomo-veicolo"), la componente di rete interessata (ramo, nodo, impianto, etc.) e l'ambiente, al fine di descrivere compiutamente le relazioni esistenti fra le diverse variabili caratterizzanti sia l'affidabilità del sistema nel suo complesso, che le compatibilità con il territorio, l'efficienza e l'economicità in esercizio della rete interessata, per potere, così, valutare preventivamente la qualità globale dell'intervento programmato.

Operativamente, denominando con Δb_{ij} gli incrementi di utilità globalmente riscontrati per il generico componente j-esimo della rete (fra gli m complessivamente analizzati), per l'i-esimo elemento dell'insieme K dei fattori k_i (supposti in tutto pari a n) caratterizzanti il problema di ottimizzazione in studio e con Δc_{ij} le rispettive variazioni negative di utilità, il ricercato indicatore di *utilità globale* (comfort d'esercizio, sicurezza, economie gestionali, impatti ambientali, etc.) assume l'espressione:

$$U_g = \sum_{j=1}^m u_{gj} \quad (1.6)$$

essendo u_{gi} l'utilità globale relativa (con il proprio segno algebrico) associata ad ogni specifico elemento j-esimo della rete, con:

$$U_{gi} = \sum_{i=1}^n (\Delta b_{ij} - \Delta c_{ij})$$

Dal punto di vista vettoriale, la (1), costruito il *vettore colonna* (di ordine n):

$$\vec{U}_{ji} = \begin{pmatrix} u_{g1} \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{gi} \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{gn} \end{pmatrix}$$

è formata dall'insieme degli m *vettori componenti*:

$$\vec{U}_g = \{ \vec{u}_{gj} \}_{j=1}^m \quad (1'.6)$$

Sotto il profilo metodologico, per l'analisi del problema, il concetto di "comfort globale" in esercizio, correlato intrinsecamente a quello di "sicurezza percepita", può essere qualitativamente rappresentato considerando una particolare condizione psico-fisica dell'uomo durante il viaggio, tale che si sia verificata la sussistenza di uno stato di

soddisfazione nei riguardi del rapporto intrattenuto con l'ambiente (sistema "veicolo-strada ferrata").

Secondo tale impostazione, il modello di studio a cui risulta possibile matematicamente riferirsi per la caratterizzazione del problema consiste in un sistema operativo O atto a definire il rapporto funzionale esistente fra le grandezze tipicizzanti il trinomio infrastruttura – veicolo - ambiente, le quali si configurano come stimoli per l'utente, e la condizione di comfort globale registrato; quest'ultimo, a sua volta, rappresenta l'output del sistema analizzato nel suo complesso.

Lo schema di analisi proposto può, così, essere rappresentato in fig. 6.1 dove:

- \vec{V}_s è il vettore delle grandezze stimolanti ovvero delle grandezze tipicizzanti il problema dell'interazione tra infrastruttura – veicolo - ambiente;
- O è il sistema operativo atto a definire il rapporto funzionale tra \vec{V}_s e \vec{S} che ci permette di ottenere l'output del problema e nello specifico caso in esame è un codice di calcolo denominato TrainDy di cui si parlerà in maniera più diffusa nel corso della presente trattazione;
- \vec{S} è l'insieme degli output ottenuti attraverso l'applicazione del software TrainDy che restituisce la che è in grado di simulare il comportamento dinamico longitudinale di un convoglio ferroviario nelle più diverse condizioni di moto cui esso è sottoposto consentendo di determinare alcune grandezze di interesse quali quelle cinematiche e le forze longitudinali che si trasmettono mediante respingenti e tiranti e quelle che

ciascun veicolo scambia con le rotaie, e porta a definire quindi la condizione di comfort globale registrata.

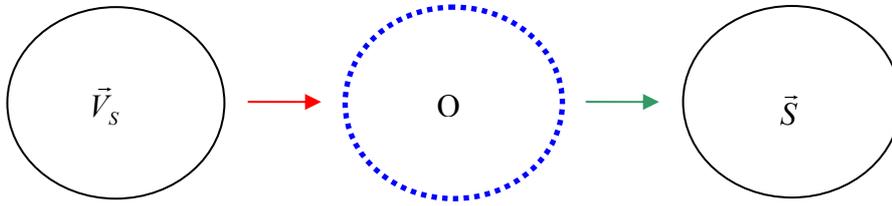


Fig. 6.1: Schema operativo del vettore algebrico \vec{V}_s delle grandezze stimolanti e quello \bar{S} rappresentativo della sensazione indotta

Poiché uno stato privo di malessere è determinato da quelle grandezze caratterizzanti il trinomio "veicolo – infrastruttura - ambiente" che presentano valori ricadenti nel *dominio di tolleranza biologica* dell'utente, ne consegue che lo stato di assenza di malessere è individuato dalla non esplicitazione, durante il viaggio, di azioni volontarie di protezione da parte del soggetto interessato.

Pertanto, l'insieme degli stati di soddisfazione per gli standard di qualità del viaggio da parte dell'uomo, si configura come un particolare sottoinsieme C^* degli stati di comfort da egli registrati durante lo spostamento AB effettuato; discende, dunque, che condizione necessaria perché durante la marcia si verifichi uno stato di comfort è che non si generi malessere. Se, allora, con I si indica l'insieme degli stati privi di malessere,

$$C^* \subset I$$

rappresenta il ricercato sottoinsieme delle configurazioni di comfort. Sotto il profilo econometrico, tuttavia, il comfort va correlato anche al costo c^* sopportato dall'utente per compiere lo spostamento desiderato (al crescere di c^* , più elevato sarà il valore del comfort atteso) ed al tempo t complessivamente impiegato.

Pertanto, la precedente relazione, introducendo un opportuno *fattore correttivo*

$$e = k(c^*, t)$$

che tenga conto anche degli aspetti economici sopra evidenziati, consente di pervenire ad un nuovo sottoinsieme C del *comfort relativo*, per lo specifico percorso AB considerato lungo la rete di trasporto esaminata:

$$C \subset C^*$$

di cui si ha una rappresentazione grafica in fig. 6.2:

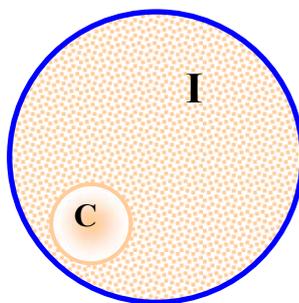


Fig. 6.2: I denota l'insieme degli stati privi di malessere, $C \subset I$ è il sottoinsieme delle configurazioni di comfort.

Il comfort può, comunque, configurarsi come una grandezza soggettiva del "sistema uomo", di tipo *logico*. In termini *booleani* risulta così possibile attribuire alle diverse interazioni che si realizzano in esercizio il valore 1 o 0 (cioè, lo stato di confort esiste, ovvero non esiste)³.

L'uomo può, in tale contesto, essere assimilato ad un particolare sistema **S** rappresentabile per mezzo di opportune coordinate nello spazio \mathfrak{R}_d per tale sistema, però, la coesistenza degli equilibri che si realizzano (meccanico, chimico, termico, etc.) è condizione necessaria ma non sufficiente a determinare una situazione di equilibrio globale; infatti, l'osservazione di variabili del *sistema ambiente* **A**, possono ad esempio indurre nell'uomo sensazioni psicoemotive tali da dar luogo a sue azioni di tipo reattivo e, quindi, per la definizione dell'equilibrio del rapporto interattivo, occorre considerare un idoneo modello interpretativo della realtà in studio.

A tal fine, si consideri una opportuna variabile v che tenga conto delle azioni di adattamento e modifica comportamentale dell'utente, a seguito delle sue interazioni con il predetto sistema **A**.

Dette allora $z_1, \dots, z_h, \dots, z_n$ le varie sensazioni (visive, acustiche, termiche, igrometriche, etc.) che svolgono il ruolo di variabili indipendenti del sistema **S**, esisteranno delle funzioni f ed f' tali che

$$v = f(z_1, \dots, z_h, \dots, z_n); \quad (2.6)$$

³ Da quanto precede è possibile osservare che in materia di comfort si può solo definire una scala di valutazione e non un unità di misura. Inoltre, va evidenziato come la condizione di "comfort globale" sarà conseguentemente desumibile per mezzo di un prodotto logico e sarà legata alla contemporanea esistenza degli stati di benessere relativi ad ogni singolo organo sensoriale interessato durante il viaggio.

$$v = f'(\alpha_1, \dots, \alpha_h, \dots, \alpha_m); \quad (3.6)$$

essendo $\alpha_1, \dots, \alpha_h, \dots, \alpha_m$, le variabili indipendenti del sistema *veicolo – infrastruttura - ambiente*.

Da quanto precede, considerando la (1.6) e la (3.6), si ha:

$$F(z_1, \dots, z_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = 0 \quad (4.6)$$

La (4.6) dimostra che l'insieme *BS* delle variabili di stato dell'utente che affronta il viaggio e quello *BA* caratterizzante il trinomio *veicolo – infrastruttura - ambiente* sono formati da elementi che danno luogo ad un sottoinsieme intersezione *V*.

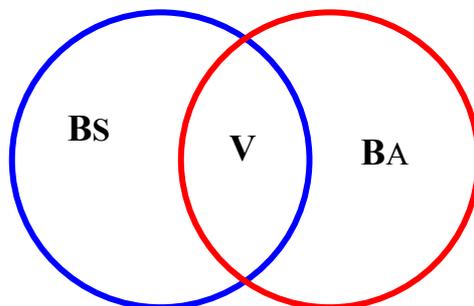


Fig. 6.3: l'insieme *BS* delle variabili di stato dell'utente e quello *BA* caratterizzante il trinomio *veicolo – infrastruttura - ambiente* sono formati da elementi che danno luogo ad un sottoinsieme intersezione *V*

A titolo esemplificativo, può farsi riferimento nello studio delle azioni dinamiche tra veicolo ed infrastruttura, soprattutto per le linee con rilevante traffico merci, anche alle modificazioni indotte sull'insieme degli indicatori di stato BA, relativi al sistema *veicolo – infrastruttura – ambiente*, al particolare fenomeno dei sobbalzi dei carri a vuoto. Ciò, valutata l'incidenza che la problematica può rivestire per la sicurezza d'esercizio e, dunque, per il ruolo che può assumere negli studi di ottimizzazione delle interazioni durante il moto fra tale sistema complesso e l'uomo.

Il sobbalzo dei carri a vuoto genera azioni sull'armamento, con gravosi effetti sul sistema della risposta della piattaforma, dovuto anche a situazioni di *stress dinamico*.

Tale fenomeno risulta peraltro recentemente maggiormente problematico in ambito UE, perché incentivato, tra l'altro, dalle seguenti circostanze verificatesi nell'esercizio ferroviario (in assenza, ancora oggi, di idonei *sistemi smorzanti* sui carri per il contenimento delle forze ruota - rotaia):

1. incremento UE velocità massima e commerciale;
2. aumento del rapporto carico/asse da 22,5 t/asse a 25 t/asse ÷ 30 t/asse;
3. incremento del rapporto carico/vuoto (con soluzioni atte a ridurre la massa del carro).

Esso può costituire, dunque, un elemento di potenziale criticità, da affrontare e risolvere opportunamente da parte dell'Ingegnere ferroviario, onde assicurare sempre adeguati standard di sicurezza e qualità di marcia; ciò, soprattutto in presenza in linea di convogli passeggeri ad elevata velocità.

Ciò premesso, osserviamo, ora, i domini $Z = (z_1, \dots, z_h, \dots, z_n)$ e $A = (\alpha_1, \dots, \alpha_h, \dots, \alpha_m)$ sui quali sono definite le funzioni f ed f' sopra considerate; le molteplici interazioni che si verificano in esercizio fra i due sistemi S ed A , posto

$$Z = Z_v \cup Z_t \cup Z_a \cup Z_i \dots$$

ove i simboli posti al pedice v, t, a, i, \dots , indicano, rispettivamente, le interazioni visive, termiche, acustiche, igrometriche, etc., si perviene alla relazione:

$$Z \rightarrow V^4$$

In virtù di quanto precede, a sua volta, l'insieme:

$$A = \alpha_v \cup \alpha_t \cup \alpha_a \cup \alpha_i \dots$$

deve dare luogo ad una specifica variabile v caratterizzante il sistema A , con

$$v_i \subset V$$

⁴ Tale corrispondenza univoca tra le predette grandezze è fornita dalla funzione f della (2)

6.2 La rappresentazione geometrica del problema in un iperspazio \mathfrak{R}_d

Le relazioni esistenti fra gli elementi del quadrinomio *uomo – veicolo – infrastruttura - ambiente* definiscono nell'iperspazio \mathfrak{R}_d delle variabili $z_1, \dots, z_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ gli stati di comfort complessivamente apprezzati dall'utente durante il viaggio.

Mediante un'opportuna operazione di partizione, tale spazio (omogeneo) \mathfrak{R}_d può considerarsi composto da una famiglia di sottospazi S_j fra loro disgiunti la cui unione è l'intero \mathfrak{R}_d .

Si perviene, così, alla relazione $\mathfrak{R}_d = S_a + \dots + S_j + \dots + S_v$, essendo, rispettivamente, S_a il sub spazio ridotto, formato dalle proprietà relative alle relazioni acustiche, etc.; risulta in tal modo possibile ricercare ogni singola componente vettoriale dello stato di benessere caratterizzante ogni relazione j-esima:

$$\vec{c}_j \in S_j$$

Il raggiungimento di una qualsivoglia delle sensazioni psicofisiche di benessere c_j (comfort caratteristico) comporta che sia verificata la relazione

$$c_{ji} < c_j < c_{js}$$

avendo indicato con l'apice i la soglia inferiore dello stato di comfort e con s quella superiore, nell'ipotesi di assumere per ogni *classe sensoriale j-esima* esaminata un idoneo intervallo $\Delta = (s - i)$ che caratterizzi il campo di esistenza del predetto stato di *comfort caratteristico* (associato all'indicatore j) in esercizio.

Ad esempio, esaminando il contributo fornito al comfort di marcia ed alla stessa sicurezza d'esercizio percepita dall'utente dal complesso di azioni attribuibili al sistema *ruota-rotaia*, si dovranno, tra l'altro, prendere in esame gli effetti delle sollecitazioni sull'armamento ferroviario indotte dal transito dei veicoli passeggeri e merci nella linea e valutare, per data tipologia di convoglio, i particolari sistemi di smorzamento di cui è dotato. Occorrerà, così, analizzare anche le azioni del mezzo in corsa sul binario trasmesse dal sistema *rodiggio e carrelli*, con riferimento, a titolo esemplificativo, ai seguenti elementi caratterizzanti il problema:

1. sospensioni (verticali, trasversali, longitudinali);
2. caratteristiche sede ed armamento ferroviario;
3. sforzi tangenziali e verticali generati dal transito del mezzo;
4. imperfezioni e irregolarità (micro e macro) della via.

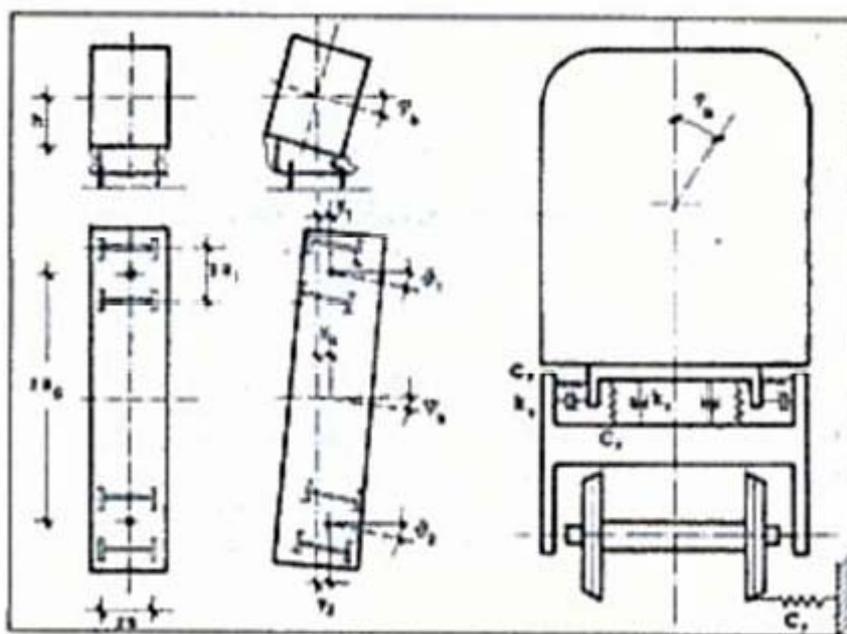


Fig. 6.4: Schema-tipo utilizzato per lo studio modellistica della dinamica di marcia

Tali indicatori, come si evince anche dal semplice schema-tipo riportato in fig. 6.4 per lo studio modellistico della dinamica di marcia di un veicolo su rotaia, ammettono sempre un determinato range di valori $\Delta = (s - i)$ entro cui è verificata (sia pur con diverso livello di qualità e di percezione della stessa) l'esistenza dello stato di comfort per l'utente ferroviario.

Applicando, ora, le risultanze della geometria euclidea alle grandezze caratterizzanti il problema in studio, risulta possibile analizzare contestualmente le interazioni fra i diversi sistemi di variabili sopra enucleate e superare così la loro differente natura, compresa la relativa eterogeneità delle rispettive unità di misura.

Considerato che, durante il viaggio, la variazione del valore dell'intensità della grandezza stimolante comporta una variazione dello stesso segno nell'intensità della sensazione indotta nell'utente ferroviario, l'insieme Z sopra definito risulta formato da elementi $z_h = f(t, s^*)$ dipendenti dal particolare istante t considerato nel moto e dalla posizione s^* del veicolo che si muove lungo la tratta AB considerata, con $s^* = l \cdot s$, dove l è il fattore caratteristico delle condizioni puntuali della linea, in S.

Ordinando Z per mezzo di una corrispondenza biunivoca con l'insieme \mathfrak{R} dei numeri reali, si può considerare il livello di sensazione z_h come *grandezza analogica* e, pertanto, la si può esprimere in cifre. In simboli, il legame di corrispondenza fra l'insieme A e quello Z è espresso dalla relazione:

$$A \rightarrow Z$$

assumendo, così, A il ruolo di *dominio* e Z quello di *codominio*.

Mediante un'opportuna trasformazione delle coordinate dei punti dello spazio \mathfrak{R}_d indicando con

$$\lambda h = \frac{(zh - zhi)}{(zhs - zhi)}$$

e con

$$\mu h = \frac{(\alpha h - \alpha hi)}{(\alpha hs - \alpha hi)}$$

si può individuare una particolare *ipersfera* di equazione:

$$\lambda_1^2 + \dots \lambda_h^2 + \dots + \mu_1^2 + \dots \mu_h^2 + \dots = 1 \quad (5.6)$$

Con tale impostazione geometrica del problema, il livello di soglia inferiore di comfort corrisponde all'origine O degli assi, mentre i punti P_s relativi alla soglia superiore appartengono alla sua frontiera.

Pertanto, risulta possibile definire il vettore $\vec{\beta}$ *benessere specifico*, individuato dai seguenti vettori componenti

$$\vec{\beta} \equiv \vec{\lambda}_1 + \vec{\lambda}_h + \dots + \vec{\mu}_1 + \dots + \vec{\mu}_h + \dots \quad (6.6)$$

Dall'espressione (6.6) sopra riportata, inoltre, deriva che l'assenza di malessere durante il viaggio deve comportare il verificarsi della condizione matematica:

$$|\vec{OP}|_{\max} \leq 1$$

Infine, nell'iperspazio di riferimento considerato, risulta anche possibile caratterizzare geometricamente l'esistenza del raggiungimento della sensazione di *comfort relativo* a tutte le n sensazioni ($t =$ termiche, ..., $a =$

acustiche), complessivamente percepite durante lo spostamento in treno; ciò, mediante il calcolo dei rispettivi *coseni direttori* b_1, \dots, b_a :

$$b_1 = \left| \frac{\vec{\beta}_1}{|\vec{\beta}|} \right|, \dots, b_a = \left| \frac{\vec{\beta}_a}{|\vec{\beta}|} \right|$$

6.3 La metodologia applicata

Dal momento che il modello di studio a cui risulta possibile matematicamente riferirsi per la caratterizzazione del problema consiste in un sistema operativo \mathcal{O} atto a definire il rapporto funzionale esistente fra le grandezze tipicizzanti il trinomio infrastruttura – veicolo - ambiente, le quali si configurano come stimoli per l'utente, e la condizione di comfort globale registrato operativamente fissiamo un insieme di input del problema che opportunamente inseriti nel codice di calcolo TrainDy ci permetteranno di pervenire alla soluzione del problema.

É opportuno far presente che la risposta dinamica di un convoglio ferroviario in marcia è influenzata da numerosi fattori, proprio in base all'analisi di tali fattori e delle sempre più stringenti esigenze in termini di sicurezza intrinseca di marcia richieste ai convogli ferroviari, nasce TrainDy e con l'ausilio di tale software, che è composto anche di un modulo pneumatico, con il quale si possono simulare i dati di pressione ai cilindri freno ed in condotta generale, è possibile determinare efficacemente le modalità ottimali di trazione, nonché la sequenza esatta degli input di frenatura da impartire ai singoli vagoni del convoglio, per evitare possibili condizioni di deragliamento o la rottura dei convogli in

corrispondenza dei ganci di trazione nelle più svariate condizioni di esercizio.

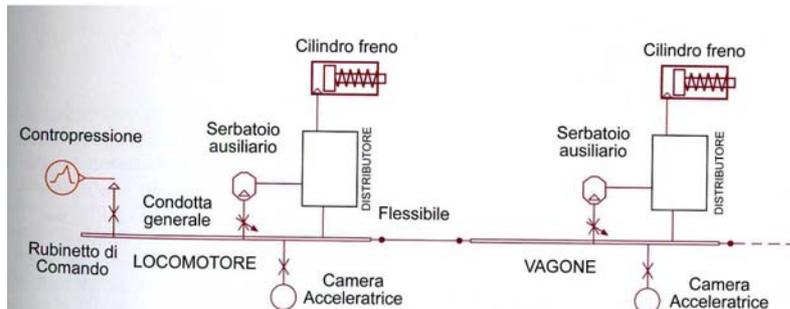


Fig. 6.5: Schema dei principali dispositivi modellati da TrainDy

Il codice di calcolo TrainDy è un codice Matlab, poiché è un linguaggio di programmazione che ben si presta al continuo sviluppo. Vediamo quali sono le variabili in input utilizzate per implementare il codice TrainDy e cominciamo a vedere quali forze agiscono su un veicolo in marcia:

- **Resistenze al moto:**

- resistenza di attrito al rotolamento $R_w = (1,1 + 0,00047 \cdot v^2)$

dove v è la velocità del treno espressa in m/s.

- Resistenza d'attrito ai perni che permette di calcolare la resistenza a

moto dell'attrito tra perno e cuscinetto $R_p = Pf \frac{D}{d}$ dove P è il peso gravante

sulle ruote del veicolo, f è il coefficiente d'attrito fusello – cuscinetto, d e D sono il diametro del perno e della ruota.

- Resistenza aerodinamica che fornisce un contributo consistente solo a partire da una velocità di 80 – 90 km/h e la cui espressione è la seguente

$R_a = \frac{1}{2} [\rho \cdot S \cdot C_x \cdot (v)^2]$ dove ρ è la densità dell'aria ($1,29 \text{ Kg}/\text{m}^3$), S è la superficie frontale del convoglio (per locomotive $S = 9 \text{ m}$, mentre per automotrici ed elettromotrici $S = 7 \text{ m}$), C_x è il fattore di forma per la superficie frontale (per rotabili non sagomati $C_x = 0,7 - 0,8$; per rotabili sagomati $C_x = 0,35 - 0,5$), v è la velocità in m/s.

- Resistenza in curva $R_c = \left(\frac{650,4}{R - 55} \right)$ in cui R è il raggio della curva

espresso in metri.

- Resistenza alle masse rotanti poichè la rotazione dell'assile determina una resistenza all'avanzamento del veicolo legata alla variazione della

quantità di moto dell'assile stesso, tale resistenza è pari a $R_{mr} = -\frac{I}{r^2} \cdot \frac{dv}{dt}$,

dove I è il momento di inerzia dell'assile, r è il raggio della ruota dell'assile, v è la velocità di traslazione dell'assile che è pari a quella di avanzamento del veicolo.

- Resistenza dovuta alla gravità che è una resistenza dovuta alla componente tangenziale al piano della rotaia e quindi in discesa è una forza acceleratrice, mentre in salita determina una resistenza al moto, pertanto

$R_g = i$ dove i assume un diverso segno a seconda se il veicolo percorre un tratto in salita o in discesa.

- **Forze di manovra:**

- Forza motrice $F_m = k \cdot \frac{P}{V}$ dove k è una costante caratteristica della

locomotiva, P è la potenza della locomotiva espressa in W e v è la velocità espressa in m/s.

- Forza frenante, per ciò che riguarda tale azione il codice TrainDy permette al treno di frenare sia utilizzando il freno pneumatico continuo e automatico e sia la frenatura elettrodinamica delle locomotive. Il sistema treno per quanto riguarda l'apparato frenante racchiude in sé svariate singolarità e funzionalità, per questo nel codice sono stati sviluppati tutti i modelli dei singoli componenti dell'apparato frenante.

Frenatura pneumatica continua ed automatica:

Ceppi $\sum Q = [(F_t \cdot i - i^* \cdot F_R) \cdot \eta_{Dym}]$ dove F_t è la forza netta al cilindro freno, i è il rapporto totale di timoneria, i^* è il rapporto di timoneria centrale, F_R è lo sforzo della molla del regolatore di timoneria e η_{Dym} è il rendimento medio di timoneria in marcia (generalmente pari a 0,83).

Dischi $\sum Q = (F_t \cdot i_d) \cdot \eta_d$ dove F_t è la forza netta al cilindro freno, i è il rapporto totale di timoneria, η_d è il rendimento di timoneria (generalmente pari a 0,9).

Frenatura elettrodinamica: Insieme alla frenatura pneumatica, la maggior parte delle locomotive attuali sono dotate anche di frenatura elettrodinamica. Questo tipo di frenatura viene utilizzata per effettuare rallentamenti del treno senza quindi utilizzare il freno pneumatico. In TrainDy le locomotive possono essere dotate anche di una funzione di *interlock*, per cui quando la frenatura elettrodinamica non è più efficiente si attiva la frenatura pneumatica. Per aumentare l'efficienza frenante dell'intero convoglio, è possibile frenare la locomotiva o le locomotive con la frenatura elettrodinamica e contemporaneamente i vagoni con quella pneumatica. Per il gradiente di variazione limite e per la

limitazione in potenza della frenatura elettrodinamica si applicano le stesse considerazioni introdotte per la forza motrice.

La frenatura elettrodinamica seguirà il seguente andamento:

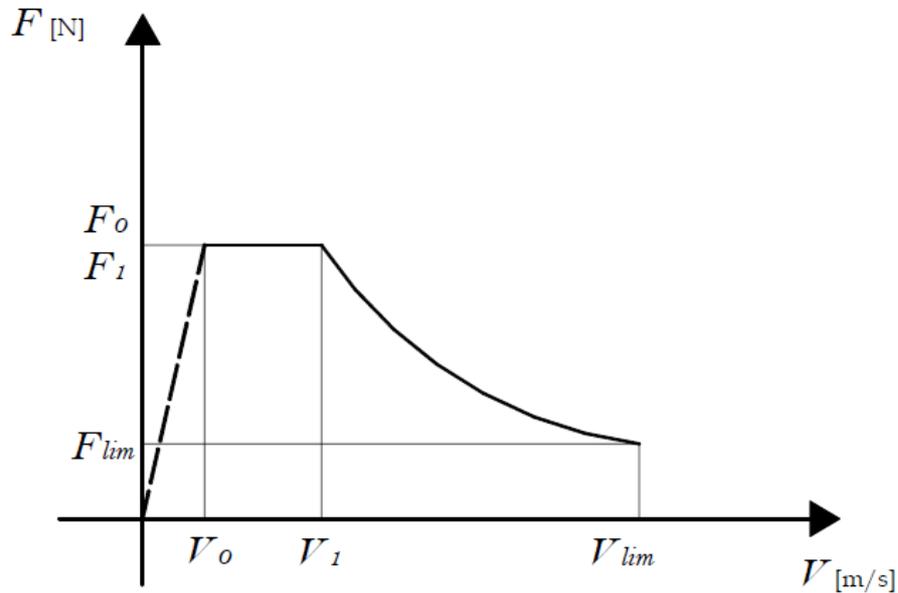


Fig. 6.6: Curva caratteristica limite di frenatura elettrodinamica

In TrainDy per definire l'andamento del coefficiente d'attrito tra ruota e rotaia al variare della velocità viene ricostruita punto per punto la curva caratteristica a partire dall'inserimento di coppie di punti (f, V) dall'utente come dati in input. A tal proposito si riporta la formula di Muller:

$$f = \frac{K}{(1 + 0,011 \cdot V)}$$

Dove K è il coefficiente di attrito a velocità nulla che dipende dalle condizioni della rotaia ($K = 0,33$ asciutto, $K = 0,25$ umido), V è la velocità del veicolo in km/h.

Dal momento che possono essere inserite diverse curve caratteristiche il database che ne viene fuori permette di tenere in conto diversi andamenti del coefficiente di attrito ruota- rotaia al variare della velocità e delle condizioni della rotaia.

La scelta del coefficiente d'attrito ruota-ceppi è sicuramente uno degli aspetti di maggior variabilità che bisogna considerare nel fenomeno di frenatura e che influisce in maniera sensibile sugli spazi di arresto e sul valore delle forze frenanti durante la manovra, e di conseguenza sulla dinamica longitudinale. Il coefficiente d'attrito ruota-ceppi μ è funzione della velocità di avanzamento, del tipo di suola (singola o doppia), della pressione specifica e della temperatura sulle superfici di contatto. Di seguito viene riportata la formula implementata in TrainDy:

$$\mu(V, p) = 0,49 \frac{\frac{875}{g} p + 100}{\frac{2860}{g} p + 100} \cdot \frac{\frac{10}{3,6} V + 100}{\frac{35}{3,6} V + 100}$$

Dove V è la velocità del veicolo espressa in km/h, F è la forza premente sul ceppo in KN, p è la pressione specifica sul ceppo in N/mm^2 e g è l'accelerazione di gravità.

- **Forze di interazione tra i veicoli:**

TrainDy considera respingenti e tiranti contigui che presentano caratteristiche diverse. Nel caso tipico di un accoppiamento formato da due respingenti ed un tirante per il calcolo delle forze d'interazione complessivamente agenti tra veicoli consecutivi si deve risolvere un semplice sistema non lineare. Per ricavare la curva caratteristica dell'accoppiamento nel suo complesso, è necessario calcolare la serie delle rigidezze dei respingenti e dei tiranti, quindi, eseguire il parallelo delle rigidezze dei respingenti. Focalizzando l'attenzione sui respingenti, detti x_{R1} e x_{R2} i vettori delle corse e f_{R1} e f_{R2} i corrispondenti valori delle forze agenti (desunti graficamente dalle curve caratteristiche), il vettore della corsa equivalente c_{Req} e quello della forza equivalente f_{Req} dell'accoppiamento i , si determinano, punto per punto, risolvendo il seguente sistema non lineare:

$$\begin{cases} c_{Req}^i = x_{R1}^i + x_{R2}^i \\ f_{R1}(x_{R1}^i) = f_{R2}(x_{R2}^i) \end{cases}$$

È ovvio che l'applicazione del sistema lineare è indispensabile solo quando nel convoglio ferroviario i veicoli montano respingenti e tiranti diversi tra loro; altrimenti, la curva equivalente si ricava semplicemente considerando che le deformazioni dei due respingenti sono uguali e quindi:

$$\begin{aligned} x_{R1}^i &= x_{R2}^i = x_R^i \\ c_{Req}^i &= 2 \cdot x_R^i \\ f_{Req}(2 \cdot x_R^i) &= f_R(x_R^i) \end{aligned}$$

Il comportamento dinamico non lineare degli elementi di accoppiamento, unito alle sollecitazioni che provengono dal tracciato e dal tipo di manovra (le quali possono fornire al sistema una sollecitazione ad elevata frequenza) richiedono che, per ridurre i tempi complessivi di calcolo, il passo temporale non possa essere scelto all'inizio della simulazione solo considerando le proprietà inerziali e di rigidità del sistema, ma sia calcolato durante la simulazione in funzione delle particolari sollecitazioni a cui è sottoposto il convoglio. Il metodo numerico utilizzato per integrare le equazioni del moto, *Algoritmo delle Differenze Centrali a Passo Variabili*.

Il tracciato viene definito individuando le caratteristiche plano-altimetriche su tre piani distinti: le curvature nel piano orizzontale (P.O.), le sopraelevazioni nel piano trasversale (P.T.) e le inclinazioni nel piano verticale (P.V.). In funzione dell'ascissa curvilinea S , vengono ricavate le coordinate x , y della linea media e l'angolo di imbardata ψ (dal P.O.), l'angolo di rollio θ (dal P.T.) nonché le quote verticali z e l'angolo di inclinazione φ (dal P.V.).

Il codice *TrainDy*, oltre a risolvere la dinamica longitudinale utilizzando un modello a un grado di libertà per veicolo, permette di effettuare la sotto-modellazione dei veicoli nel convoglio; in questo modo è possibile valutare in maniera più approfondita le forze che nascono al contatto ruota-rotaia.

Il modello fluidodinamico della condotta generale risolve le equazioni di continuità di massa, di bilancio della quantità di moto e di conservazione dell'energia considerando un condotto circolare a sezione variabile dal quale è possibile spillare o nel quale è possibile insufflare una portata massica. L'equazione che permette la completa ed univoca risoluzione del problema è quella di stato dei gas perfetti.

6.4 Conclusioni

Obiettivo fondamentale della progettazione di una strada ferrata è quello di assicurare, mediante appropriate caratteristiche geometriche e prestazionali da conferire all'infrastruttura (comprese adeguate opere di arredo, segnaletica, etc.), il soddisfacimento della domanda di mobilità di persone e merci, garantendo una marcia regolare e sicura del flusso di traffico, in ogni condizione d'esercizio.

Nella progettazione di un'opera ferroviaria, in particolare, si deve poi tenere conto di numerosi fattori quali ad esempio l'innovazione tecnologica, l'interoperabilità, il miglioramento della qualità globale in esercizio (promiscuità passeggeri-merci, eterotachicità dei convogli, etc.), l'ottimizzazione di assi, linee, nodi e molti altri parametri ancora.

A tale scopo è indispensabile effettuare preliminarmente un'analisi delle diverse alternative progettuali sotto i profili economico, tecnico e ambientale e solo successivamente esplicitare gli obiettivi da perseguire.

Da un punto di vista tecnico l'affidabilità del sistema ferroviario dipende, in particolare, dall'affidabilità dei suoi componenti e, in particolar modo, di quelli preposti alla circolazione dei treni anche all'interno dei nodi stazione dove vengono eseguite le manovre più complesse.

La ricerca scientifica nel settore delle infrastrutture viarie, in tema di sicurezza e qualità del deflusso, ha in generale sempre più suggerito di porre il comportamento dell'utente al centro delle scelte tecniche di progetto, sia per le nuove opere che per l'attuazione di interventi sulla rete esistente (riqualificazione funzionale, miglioramenti prestazionali, etc.).

Lo studio del sistema “uomo – veicolo - infrastruttura” svolto nel presente lavoro, ha consentito di pervenire alla definizione di un apposito modello matematico per l’analisi integrata delle molteplici componenti che caratterizzano la qualità di marcia per l’utente e che influenzano la stessa sicurezza d’esercizio.

L’impostazione matematica del problema proposta, permette un’opportuna interpretazione geometrica in un iperspazio di dimensioni “ d ” e ben si presta pure alle elaborazioni computerizzate.

Infatti si è avuto modo di apprezzare nel corso dello svolgimento del presente dottorato come grazie ad un potente codice di calcolo denominato TrainDy e attualmente in uso in tutta Europa, sia possibile prevedere quale sia la risposta dinamica del convoglio in marcia e quindi pervenire alla soluzione del problema, quasi in maniera deterministica, poiché dalla previsione della risposta dinamica di un veicolo in marcia sarà possibile definire la condizione di benessere o meno dell’utente che viaggia su un veicolo in marcia, stabilendo se tale condizione appartiene all’insieme I degli stati privi di malessere o, come ci si auspica all’atto della progettazione, al sottoinsieme di quest’ultimo C che denota uno stato di comfort.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tesoriere G., Lo Bosco D. (1984-85), *Le caratteristiche geometriche da assegnare alle strade secondarie ed il coordinamento piano altimetrico dei tracciati*, Atti dell'Accademia di S.L.A. di Palermo Serie V, vol. IV, parte I.
- [2] Marchionna A., Farnaci M. (1986), *Durata residua delle pavimentazioni flessibili basata sulla valutazione del livello di degradazione degli stati legati ottenuto con il F. W. D.*, Cagliari 6/86.
- [3] Lo Bosco D. (1988), *Visione interna ed anomalie ottiche dei tracciati stradali costituenti la viabilità secondaria*, Selezione tecnica, n. 9, Settembre.
- [4] CNR (1988), *Norme tecniche – Istruzioni sulla manutenzione della pavimentazione stradale*, BU 125/88.
- [5] Agostinacchio M. (1989), *La manutenzione delle pavimentazioni stradali*, Giornata di studio – Università della Basilicata, 11/89.
- [6] Gatti G. (1990), *Caratteristiche di affidabilità di un itinerario stradale*, XXI Convegno nazionale stradale, Trieste.
- [7] Boscaino G., *La manutenzione programmata della rete viaria*, Giornata di studio – Cagliari 4/90.
- [8] Consiglio di Corso di laurea di Ingegneria Civile Università di Palermo, Atti (1991) della giornata di studio sul tema *La manutenzione programmata delle pavimentazioni stradali*, Agrigento, 23 Febbraio.

-
- [9] Corriere F. (1992), *Affidabilità, efficienza e vulnerabilità del sistema dei trasporti: criteri e metodi per la programmazione degli interventi*, Selezione tecnica - Aprile.
- [10] Di Mino G., Lo Bosco D. (1993) *La progettazione integrata delle infrastrutture viarie*, Le strade, anno XCV, n. 1295, Luglio/Agosto.
- [11] Stoka M. (1994), *Calcolo delle probabilità e statistica*, Ed. Cedam
- [12] Lo Bosco D., *Studio del binomio "strada-ambiente"*, Autostrade, anno XXXVII, n. 1, Gennaio/Marzo,
- [13] Atti della Giornata di Studio (1997) "*La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali*", Roma 20- 21 Febbraio.
- [14] Zhou M., Sisiopiku V.P. (1997), *Relationships between Volume-to-capacity ratios and accident rates*, Transportation Research Record n. 1581, pp. 47-52.
- [15] Crotti A. (1997), *La valutazione della sinistrosità autostradale*, Le strade, Novembre-Dicembre.
- [16] CNR (1998), *Criteri per la classificazione della rete delle strade esistenti ai sensi dell'art. 13 comma 4 e 5 del nuovo codice della strada* Roma, 27 Febbraio.
- [17] Caliendo C. (1998), *Analisi di incidentalità sulle strade per le quali sono previsti interventi migliorativi*, Ministero dei lavori pubblici "Per restare in Europa: le infrastrutture fisiche", vol. 5 Allegato 2 pp. 55-75.
- [18] Corona G., Pau M., Piras M., (1999), *Studio delle correlazioni tra indici di sinistrosità e caratteristiche geometriche e funzionali di una rete stradale regionale*, Sistemi di trasporto n.1.
- [19] Atti del IX Convegno Nazionale SIV (1999) sul tema: *Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e*

- aeroportuali. Cagliari, 28 - 29 Ottobre.
- [20] Atti dell'Accademia Nazionale di Scienze, Lettere ed Arti (1999), Classe di scienze, I semestre, parte II.
- [21] Caroti L., Lanceri F., Losa M., Branca L. (2000), *La sicurezza stradale: condizioni ambientali e parametri dell'infrastruttura*, Strade e Autostrade, n. 2 Marzo/Aprile.
- [22] Atti del X Convegno Nazionale SIIV (2000) sul tema: Infrastrutture viarie del XXI Secolo, Catania 26 - 28 Ottobre 2000.
- [23] F. Corriere, R. Biondo, G. Sciumè, "The choice between Alternative Solutions in Uncertain Conditions: the Use of a Suitable Fuzzy Methodology as a tool for the project optimization of the railway junction" , Atti della V conferenza internazionale "Geometria stocastica corpi convessi misure empiriche & applicazioni alle scienze ingegneristiche, mediche e della terra", Palermo, 6 – 11 Settembre 2004.
- [24] A. Duma ,M. Stoka , "Geometric Probabilities for non Convex Lattices" Ann. De l'IUSP, vol.XXXXIV,fasc.1, pp. 35-46, 2000.
- [25] F. Corriere, D. Lo Bosco, "Pianificazione e gestione d'infrastrutture ferroviarie ed aeroportuali" , Atti del IX Convegno nazionale SIIV (Società Italiana d'Infrastrutture Viarie), Cagliari 1999.
- [26] F. Corriere, D. Lo Bosco "L'optimisation du projet d'un noeud ferroviarie complete: la proposition d'un modèle mathématique", Memoire de l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles – Lettres de Toulouse (France), 1998;Seminarberichte aus dem Facbereich Mathematik und informatik, FernUniversitat Hage, Deutschland, Band 65,1998.

- [27] H.Mabrouk, A. Stuparu, B.Charreton, “Exemple de typologie d’accidents dans le domaine des transports guides”, *Revue Générale des Chemins de Fer* n.3 1998, pagg. 17-25.
- [28] F. Corriere, D. Lo Bosco, F.G. Praticò, “The Project Optimization of Transportation: the Research of the Least Dimension of the Representation Space of the Synthetic Indicators”, *Seminarberichte aus dem Fachbereich matematik und Informatik, FernUniversität Hagen, Deutschland, Band 58, 1997.*
- [29] H.J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and its Applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston / Dordrecht / London, 1994.
- [30] M. Stoka, *Calcolo delle probabilità e statistica*, Ed. Cedam, 1994.
- [31] L. Florio, G. Malavasi, E. Salvini: “Analisi dei ritardi e verifica d’un nodo ferroviario complesso”, *Ingegneria ferroviaria*, agosto 1985.
- [32] F. Corriere, “Potenzialità e regolarità d’esercizio delle linee ferroviarie”, *Ingegneria ferroviaria*, gennaio – febbraio 1984.
- [33] J.C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, New York, 1981.
- [34] Caristi G. and Stoka M., *A Laplace type problem for a regular lattice with obstacles*, *Atti Acc. Sci. Torino.*