



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

Tesi di Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti

Ciclo XXIV

Curriculum Ingegneria Ferroviaria

Sicurezza e capacità della circolazione ferroviaria:  
ruolo delle norme regolamentari

Tutore  
Prof. Ing. Gabriele Malavasi

Dottorando  
Ing. Francesco Sorace

Febbraio 2012

## Indice dei contenuti

<b>Indice dei contenuti .....</b>	<b>2</b>
<b>Indice delle figure .....</b>	<b>4</b>
<b>Indice delle tabelle .....</b>	<b>6</b>
<b>Acronimi .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>9</b>
<b>I. Inquadramento, obiettivi e percorso della ricerca.....</b>	<b>10</b>
I.1 Inquadramento della ricerca.....	10
I.2 Definizione degli obiettivi.....	12
I.3 Articolazione delle attività svolte .....	12
I.4 Sintesi dei risultati raggiunti.....	14
<b>II. Ricerca bibliografica.....</b>	<b>16</b>
II.1 Pubblicazioni, studi e dati.....	16
II.2 Normativa comunitaria e Legislazione nazionale .....	17
II.3 Norme tecniche europee .....	18
II.4 Altri atti rilevanti.....	18
<b>PARTE I - MACRO SETTORI DEL SISTEMA FERROVIARIO .....</b>	<b>19</b>
<b>1. La regolamentazione dell'esercizio ferroviario.....</b>	<b>20</b>
1.1 Il sistema regolamentare .....	20
1.2 La progettazione regolamentare .....	24
1.3 Il fattore umano .....	27
1.4 Rappresentazioni e approfondimenti specifici .....	28
<b>2. La sicurezza della circolazione ferroviaria.....</b>	<b>29</b>
2.1 Identità della sicurezza della circolazione ferroviaria.....	29
2.2 Sicurezza deterministica e probabilistica.....	31
2.3 I fattori della sicurezza.....	33
2.4 I parametri del rischio.....	37
2.5 Metodologie e tecniche di analisi dei rischi.....	47
2.6 Il processo di gestione dei rischi e lo scenario normativo.....	49
<b>3. La capacità dell'infrastruttura ferroviaria.....</b>	<b>59</b>
3.1 Generalità .....	59
3.2 Stato dell'arte degli strumenti di valutazione della capacità: vincoli e limiti.....	65

---

3.3	Strategie per incrementare la capacità .....	68
3.4	Relazione tra capacità e regolarità .....	70
<b>PARTE II - SVILUPPO DELLA METODOLOGIA DI VALUTAZIONE .....</b>		<b>72</b>
<b>4.</b>	<b>Modelli per la quantificazione delle prestazioni.....</b>	<b>73</b>
4.1	Generalità .....	73
4.2	Analisi e valutazione della sicurezza .....	76
4.3	Analisi e valutazione della capacità.....	105
<b>5.</b>	<b>Introduzione al software di simulazione: OpenTrack® .....</b>	<b>106</b>
<b>PARTE III - APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA A CASI DI STUDIO.....</b>		<b>108</b>
<b>6.</b>	<b>Applicazione della metodologia agli impianti RTB.....</b>	<b>109</b>
6.1	Generalità .....	109
6.2	Definizione del sistema .....	113
6.3	Analisi della normativa ed elaborazione degli schemi procedurali.....	123
6.4	Individuazione dei possibili eventi pericolosi .....	126
6.5	Individuazione degli scenari critici .....	127
6.6	Analisi dei livelli di rischio dello scenario critico “svio” .....	131
6.7	Valutazione degli effetti sulla circolazione .....	132
6.8	Analisi di sensitività applicata al caso di studio .....	134
<b>7.</b>	<b>Sintesi dei risultati ottenuti .....</b>	<b>139</b>
<b>CONCLUSIONI.....</b>		<b>141</b>
<b>8.</b>	<b>Obiettivi raggiunti, applicazioni possibili, sviluppi futuri .....</b>	<b>142</b>
8.1	Obiettivi raggiunti e applicazioni possibili .....	142
8.2	Sviluppi futuri.....	143
<b>Glossario .....</b>		<b>145</b>
<b>Bibliografia .....</b>		<b>154</b>
<b>Webgrafia .....</b>		<b>161</b>
<b>APPENDICE.....</b>		<b>162</b>

---

## Indice delle figure

Figura 1.1	-	Architettura regolamentare.....	21
Figura 1.2	-	Il sistema regolamentare.....	22
Figura 2.1	-	Componenti fondamentali della sicurezza ferroviaria.....	29
Figura 2.2	-	La sicurezza probabilistica.....	32
Figura 2.3	-	I fattori della sicurezza.....	34
Figura 2.4	-	Relazione tra Sicurezza e Rischio.....	38
Figura 2.5	-	Spettro dei rischi.....	39
Figura 2.6	-	Curve di isorischio e interventi per la riduzione del rischio.....	40
Figura 2.7	-	Grafico del rapporto $R_{i,\alpha}/R_{i,\alpha}^0$ in funzione di $t$ per differenti valori di $\alpha$ ..	44
Figura 2.8	-	Grafico del rapporto $R_{i,\alpha}/R_{i,\alpha}^0$ in funzione di $\alpha$ per differenti valori di $t$ ..	45
Figura 2.9	-	Processo di gestione dei rischi.....	49
Figura 2.10	-	Procedimento di gestione dei rischi.....	52
Figura 3.1	-	Rappresentazione schematica del tempo di occupazione.....	61
Figura 3.2	-	Relazione tra grandezze relative alla capacità di una linea.....	63
Figura 3.3	-	Fattori che definiscono la Capacità teorica e pratica.....	64
Figura 3.4	-	Esempio di plotoni su linea a semplice binario.....	68
Figura 3.5	-	Lunghezza delle sezioni di blocco e tempi di occupazione.....	69
Figura 3.6	-	Correlazione tra ritardo medio per treno e numero di treni effettuati. ...	71
Figura 4.1	-	Diagramma a blocchi del modello.....	74
Figura 4.2	-	Schema logico di funzionamento del modello.....	75
Figura 4.3	-	Processo di gestione dei rischi.....	76
Figura 4.4	-	Fasi operative del modello di analisi e valutazione dei livelli di rischio.	77
Figura 4.5	-	Modello SHEL.....	78
Figura 4.6	-	Struttura dello schema procedurale.....	79
Figura 4.7	-	Classificazione degli incidenti.....	81
Figura 4.8	-	Diagramma a blocchi del Modello di valutazione dei rischi.....	85
Figura 4.9	-	Diagramma a blocchi del Modello di valutazione dei rischi.....	86
Figura 4.10	-	Processo di determinazione delle Combinazioni di stati (teoriche).....	88
Figura 4.11	-	Processo di determinazione delle Combinazioni di stati (possibili).....	89
Figura 5.1	-	Principio di funzionamento e processi di OpenTrack®.....	107
Figura 6.1	-	Principio di funzionamento dell'impianto RTB.....	110

Figura 6.2	-	Gestione degli allarmi RTB.....	111
Figura 6.3	-	Definizione del sistema mediante l'applicazione del Metodo SHEL....	113
Figura 6.4	-	Caratteristica meccanica dell'ETR 500 AV.....	114
Figura 6.5	-	Rappresentazione di un tratto di linea con OpenTrack <sup>®</sup> .....	120
Figura 6.6	-	Finestra <i>Engines</i> e caratteristica meccanica dell'ETR 500 AV. ....	122
Figura 6.7	-	Programma MatriceStati – finestra di inserimento dati e output. ....	129
Figura 6.8	-	Grafico spazio-tempo di un treno che gestisce l'allarme Caldissimo..	133
Figura 6.9	-	Andamento di $N_{rit}$ e $R_{tot}$ in funzione della durata dell'avaria.....	134
Figura 6.10	-	Caso 1. Andamento della $P(I)$ in funzione della $P_{err\_umano}$ .....	135
Figura 6.11	-	Caso 2. Andamento della $P(I)$ in funzione della $P_{err\_umano}$ .....	136
Figura 6.12	-	Caso 3. Andamento della $P(I)$ in funzione della $P_{err\_umano}$ .....	136
Figura 6.13	-	Caso 4. Andamento della $P(I)$ in funzione della $P_{err\_umano}$ .....	137
Figura 6.14	-	Confronto tra i risultati dei casi trattati (SIL 4 e SIL 1). ....	138

## Indice delle tabelle

Tabella 1.1	- I parametri interni della regolamentazione dell'esercizio. ....	25
Tabella 2.1	- Definizioni di sicurezza intrinseca. ....	30
Tabella 2.2	- I fattori della sicurezza. ....	35
Tabella 2.3	- Matrice frequenza – conseguenze o Matrice dei rischi.....	54
Tabella 2.4	- Matrice dei rischi definita dalla Disposizione n. 15/2004 di RFI.....	58
Tabella 2.5	- Matrice dei rischi definita dalla Disposizione n. 51/2007 di RFI.....	58
Tabella 4.1	- Estratto della banca dati degli eventi pericolosi.....	82
Tabella 4.2	- Matrice delle dipendenze. ....	84
Tabella 4.3	- Tecnica empirica per la stima degli errori degli operatori (TESEO). ....	92
Tabella 4.4	- Livelli di Integrità della Sicurezza (SIL).....	95
Tabella 4.5	- Scala delle categorie di frequenza. ....	98
Tabella 4.6	- Scala dei livelli di gravità delle conseguenze. ....	100
Tabella 4.7	- Matrice quali – quantitativa dei livelli di rischio. ....	103
Tabella 4.8	- Livelli di rischio e azioni da intraprendere.....	104
Tabella 6.1	- Principali caratteristiche dell'ETR 500 AV. ....	115
Tabella 6.2	- Caratteristiche della linea AV/AC Roma – Napoli (Roma – PC C.).....	117
Tabella 6.3	- Caratteristiche della linea AV/AC Roma – Napoli (PC C. – PC P.).....	118
Tabella 6.4	- Caratteristiche della linea AV/AC Roma – Napoli (PC P. – Napoli). ....	119
Tabella 6.5	- Schema procedurale della gestione allarme Caldissimo. ....	124
Tabella 6.6	- Schema procedurale della gestione allarme Caldo - Caldissimo.....	125
Tabella 6.7	- Selezione del record “boccole calde” dal Registro eventi pericolosi... ..	127
Tabella 6.8	- Schema procedurale ridotto della gestione allarme Caldissimo. ....	128
Tabella 6.9	- Matrice delle conseguenze – scenario critico “svio”. ....	128
Tabella 6.10	- Matrice delle dipendenze e condizioni di combinazioni impossibili.....	129
Tabella 6.11	- Matrice scenario critico – responsabilità/funzionalità.....	130
Tabella 6.12	- Probabilità di accadimento delle combinazioni possibili. ....	131

## Acronimi

SIGLA	ACRONIMO
ANSF	Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie
ANSI	American National Standards Institute
AV/AC	Alta Velocità/Alta Capacità
BA/CC	Blocco Automatico a Correnti Codificate
CENELEC	Comité Européen de Normalisation en ELECTronique et en électrotechnique
CSI	Common Safety Indicators
CSM	Common Safety Methods
CST	Common Safety Targets
DB	Deutsche Bahn
DC	Dirigente Centrale
DCO	Dirigente Centrale Operativo
DM	Dirigente Movimento
ERA	European Railway Agency
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ETCS	European Train Control System
ETH	Institute for Transport Planning and Systems
FCL	Fascicolo Circolazione Linee
FS	Ferrovie dello Stato
FTA	Fault Tree Analysis
GSM-R	Global System for Mobile Communications Railway
ISA	International Society of Automation
LZB	Linienzugbeeinflussung
NSA	National Safety Authority
OT	OpenTrack
PB	Posto di Blocco
PC	Posto di Comunicazione
PC-RTB	Posto di Controllo RTB
PdA	Personale di Accompagnamento

SIGLA	ACRONIMO
PdC	Personale di Condotta
PdS	Posto di Servizio
PdT	Personale di Terra
PFD	Probability of Failure on Demand
PFH	Probability of Failure per Hour
PGOS	Prefazione Generale all'Orario di Servizio
PIR	Prospetto Informativo Rete
PI-RTB	Punto Informativo RTB
PL	Passaggio a Livello
PM	Posto di Movimento
PP	Posto Periferico
PR-RTB	Posto di Rilevamento RTB
PVB	Posto Verifica Boccole
RAMS	Reliability Availability Maintainability Safety
RCT	Regolamento per la Circolazione dei Treni
RFI	Rete Ferroviaria Italiana
RRF	Risk Reduction Factor
RS	Regolamento sui Segnali
RTB	Rilevamento Temperatura Boccole
SCC	Sistema di Comando e Controllo della Circolazione
SCMT	Sistema di Controllo Marcia Treno
SGS	Sistema di Gestione della Sicurezza
SHEL	Software Hardware Environment Liveware
SIL	Safety Integrity Level
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français
ST	Sistema di Trasmissione
STI	Specifiche Tecniche di Interoperabilità
TD	Train Descriptor
TESEO	Tecnica Empirica per la Stima degli Errori degli Operatori
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer

## INTRODUZIONE

*“Chi non applica nuovi rimedi  
dev’essere pronto a nuovi mali; perché  
il tempo è il più grande degli innovatori”*

(Sir Francis Bacon)

## I. Inquadramento, obiettivi e percorso della ricerca

La presente tesi è il risultato delle attività di studio e di ricerca svolte presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" nel corso dei tre anni del Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti (XXIV ciclo) – Curriculum Ingegneria Ferroviaria.

La tesi è strutturata in tre parti:

- Parte I – Macro settori del sistema ferroviario trattati;
- Parte II – Sviluppo della metodologia di valutazione;
- Parte III – Applicazione della metodologia a casi di studio.

Nelle Conclusioni, la tesi tratta i risultati raggiunti, le criticità emerse e le potenzialità scientifiche della ricerca ovvero le prospettive e i nuovi canali di ricerca emergenti.

Nei paragrafi che seguono, definito il contesto normativo europeo e l'ambito scientifico della ricerca, vengono sinteticamente descritti gli obiettivi della ricerca, le attività svolte e i risultati raggiunti.

### I.1 Inquadramento della ricerca

Il trasporto ferroviario europeo, a partire dall'ultimo decennio dello scorso millennio, è stato interessato da un processo di liberalizzazione e privatizzazione volto a razionalizzare il mercato e a introdurre elementi di concorrenza in un settore tradizionalmente caratterizzato da assetti monopolistici e da una forte presenza dell'operatore pubblico.

La stessa Commissione Europea aveva allora identificato i tre maggiori ostacoli allo sviluppo del trasporto ferroviario europeo:

- l'inadeguatezza dell'infrastruttura ferroviaria a fornire servizi transeuropei, a causa della carenza di collegamenti fra le reti nazionali;
- l'assenza di interoperabilità tra le diverse reti ferroviarie nazionali, storicamente sviluppatesi con caratteristiche tecnico-operative e procedure amministrative diverse;
- l'assenza di un mercato competitivo dei servizi transeuropei, riconducibile principalmente a ragioni storiche.

Le prime azioni di indirizzo dell'Unione Europea (UE) avevano avuto come obiettivo la garanzia della sicurezza, il potenziamento del trasporto merci su rotaia e la predisposizione dei primi tasselli del quadro della liberalizzazione.

A partire dal 2001, l'intera normativa concernente la materia è stata modificata con l'approvazione del complesso di norme che vanno sotto il nome di "*primo pacchetto ferroviario*" (Direttive 2001/12/CE, 2001/13/CE, 2001/14/CE, 2001/16/CE), diretto a sviluppare l'apertura del mercato alla concorrenza, a garantire l'accesso equo e non

discriminatorio alle infrastrutture e l'utilizzo ottimale delle stesse e a promuovere la sicurezza secondo standard e criteri di controllo comuni a livello europeo.

Nel 2004 è stato approvato il "secondo pacchetto ferroviario" (Direttive 2004/49/CE, 2004/50/CE, 2004/51/CE, Regolamento (CE) N. 881/2004), inteso ad approvare alcune modifiche alle direttive sull'interoperabilità, al fine di rendere le stesse coerenti con le altre misure previste dal medesimo, in particolare quelle sulla sicurezza e sulla costituzione della European Railway Agency<sup>1</sup> (ERA) e per rispondere all'esigenza di realizzare l'interoperabilità sull'intera rete in coincidenza con l'ulteriore liberalizzazione del mercato.

Nel 2007, allo scopo di completare il quadro legislativo comunitario in materia di trasporto ferroviario, è stato approvato il "terzo pacchetto ferroviario" (Direttive 2007/58/CE, 2007/59/CE, Regolamento (CE) N. 1371/2007), inteso a creare uno spazio ferroviario europeo integrato, con trasporti ferroviari competitivi e attraenti.

La Direttiva 2004/49/CE è stata recepita in Italia dal D.Lgs. 162/2007 che disciplina le condizioni di sicurezza per l'accesso al mercato dei servizi ferroviari, attribuendo le competenze in materia a un organismo autonomo di nuova istituzione, l'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie<sup>2</sup> (ANSF).

Lo stesso Decreto, con riferimento ai gestori dell'infrastruttura e alle imprese ferroviarie, afferma la responsabilità di ciascuno per la propria parte, compresa la fornitura di materiale e l'appalto di servizi, nei confronti di utenti, clienti, lavoratori interessati e terzi. I gestori dell'infrastruttura e le imprese ferroviarie sono dunque tenuti a elaborare, rispettivamente, il proprio Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS). Infine, con riferimento alla sicurezza, il Decreto istituisce l'Organismo investigativo permanente, responsabile di svolgere indagini a seguito di incidenti gravi o potenzialmente tali.

Nel 2009 è stato emanato il Regolamento (CE) N. 352/2009 allo scopo di istituire un metodo comune di sicurezza per la determinazione e la valutazione dei rischi ai sensi dell'Art. 6, paragrafo 3, lettera a) della Direttiva 2004/49/CE.

Il metodo comune, finalizzato a preservare e migliorare il livello di sicurezza delle ferrovie comunitarie quando e dove ciò sia necessario nonché ragionevolmente

---

<sup>1</sup> Tra i compiti istituzionali dell'ERA vi è quello finalizzato allo sviluppo della legislazione comunitaria per la definizione: degli obiettivi comuni di sicurezza (CST – *Common Safety Targets*), ovvero dei livelli di sicurezza che devono almeno essere raggiunti dalle diverse componenti del sistema ferroviario e dal sistema nel suo complesso espressi in criteri di accettazione del rischio; delle metodologie comuni di sicurezza (CSM – *Common Safety Methods*), al fine di valutare il raggiungimento degli obiettivi; degli indicatori comuni di sicurezza (CSI – *Common Safety Indicators*), attraverso i quali gli Stati membri possono acquisire le informazioni utili a un attivo monitoraggio dell'evoluzione della sicurezza. Il set di indicatori sviluppato ha una duplice finalità, misurare le prestazioni di sicurezza e stimare l'impatto economico degli incidenti sulla società.

<sup>2</sup> L'ANSF, pienamente indipendente dai gestori dell'infrastruttura e dalle imprese ferroviarie, ha tra le diverse responsabilità anche quella di emanare le norme tecniche e gli standard di sicurezza e di vigilare sulla loro applicazione; rilasciare l'Autorizzazione di sicurezza ai gestori dell'infrastruttura e il Certificato di sicurezza alle imprese ferroviarie; svolgere attività di studio, ricerca e approfondimento in materia di sicurezza del trasporto ferroviario; collaborare con l'ERA.

fattibile, agevolando l'accesso al mercato dei servizi di trasporto ferroviario, promuove l'armonizzazione:

- dei procedimenti di gestione dei rischi utilizzati per valutare il livello di sicurezza e la conformità ai requisiti di sicurezza;
- degli scambi delle informazioni riguardanti la sicurezza tra i vari operatori del settore ferroviario, al fine di gestire la sicurezza nei vari punti di interazione presenti nel settore;
- delle prove risultanti dal procedimento di gestione dei rischi.

A tal proposito, l'affinamento delle metodologie per misurare le prestazioni del sistema ferroviario soprattutto in termini di sicurezza è un interesse costante a livello internazionale.

E' in questo nuovo contesto normativo e scientifico europeo sinteticamente descritto, in costante e continua evoluzione, che si colloca la presente ricerca, il cui ambito riguarda tre grandi temi del sistema ferroviario: la *Regolamentazione dell'esercizio*, la *Sicurezza della circolazione* e la *Capacità dell'infrastruttura*.

## **I.2 Definizione degli obiettivi**

Sin dai primi passi della ricerca è emerso come primario obiettivo la messa a punto di uno strumento di tipo logico-matematico applicabile al sistema ferroviario.

La ricerca ha avuto come *obiettivo specifico* lo sviluppo di una metodologia di valutazione quantitativa delle prestazioni del sistema ferroviario in termini di sicurezza della circolazione e della capacità dell'infrastruttura nella definizione del ruolo delle componenti:

- umane (personale con proprie qualifiche, formazione e motivazione);
- tecnologiche (strumenti e apparecchiature);
- normative (procedure e metodi che definiscono i vari compiti).

L'*obiettivo generale* è stato quello di studiare se e come un evento o un processo che porti a una variazione del livello di sicurezza possa comportare una variazione della capacità e viceversa, da un punto di vista qualitativo e quantitativo.

L'approccio metodologico è stato coerente con gli obiettivi di un corso di Dottorato di Ricerca che deve fornire gli strumenti e i metodi per lo studio e l'apprendimento, da parte dei dottorandi, dei criteri e dei mezzi per lo sviluppo di strumenti di studio dei problemi piuttosto che la loro ripetitiva applicazione.

## **I.3 Articolazione delle attività svolte**

Per conseguire gli obiettivi esposti è stata organizzata e attuata una prima attività di studio e di ricerca tesa all'acquisizione degli strumenti necessari, nell'ambito dei tre temi trattati del sistema ferroviario.

A conclusione di tale fase è stata sviluppata la metodologia di valutazione quantitativa delle prestazioni del sistema ferroviario basata sullo schema procedurale riportato nella Figura 4.4 dal quale si evince la sua articolazione in fasi.

In particolare, le attività svolte nel corso del primo anno di Dottorato di Ricerca hanno riguardato la *ricerca bibliografica*; la ricostruzione dello *stato dell'arte*; lo *studio delle norme di riferimento* nell'ambito dei temi Regolamentazione, Sicurezza e Capacità; nonché la ricerca delle metodologie di analisi dei rischi e delle metodologie di verifica e calcolo della capacità.

L'analisi dei rischi, a cui si ricorre per valutare il livello di sicurezza, ha lo scopo di *“valutare le probabilità di accadimento di eventi incidentali preventivamente identificati unitamente alla valutazione di un indicatore della gravità delle conseguenze connesse all'evolversi degli stessi eventi”* (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 28 ottobre 2005 – Sicurezza nelle gallerie ferroviarie, Allegato III – Art. 2).

Nel corso del primo anno è stata altresì avviata l'attività di apprendimento e conseguente perfezionamento di utilizzo di alcuni software di simulazione della circolazione ferroviaria con lo scopo di schematizzare e rappresentare i processi dell'esercizio ferroviario a cui si applicano i regolamenti.

Infine, le attività del primo anno sono state indirizzate alla predisposizione di un programma di lavoro per il prosieguo degli studi.

Le attività svolte nel secondo anno hanno riguardato l'aspetto teorico-metodologico dello sviluppo della metodologia di valutazione quantitativa delle prestazioni del sistema ferroviario nonché l'individuazione e la selezione dei casi di studio pilota in termini di infrastruttura, tecnologia, materiale rotabile, regolamenti, comportamenti umani e modelli di esercizio del sistema ferroviario.

L'applicazione ad uno specifico caso pilota ha voluto verificare in modo diretto l'applicabilità ai temi specifici della ricerca.

Il terzo e conclusivo anno è quello che ha visto giungere al termine le attività avviate in precedenza e trarre dai risultati ottenuti, da una parte le conclusioni relative agli studi svolti e dall'altra le indicazioni emergenti per ulteriori prospettive di ricerca.

Nel corso del terzo anno, come risultato della ricerca metodologica, è stata sviluppata la metodologia di valutazione quantitativa delle prestazioni del sistema ferroviario in termini di sicurezza della circolazione e di capacità dell'infrastruttura nella definizione del ruolo delle componenti umane, tecnologiche e normative. La metodologia è stata calibrata sulla base dell'applicazione effettuata su uno specifico caso di studio e su determinate ipotesi di base.

A partire da avarie ipotizzate a una o più componenti del sistema ovvero da eventi pericolosi ipotizzati, sono stati analizzati i processi normativi, sono stati individuati gli

scenari critici, sono stati determinati i livelli di rischio nonché sono stati calcolati i valori di capacità dell'infrastruttura e altri parametri caratteristici dell'esercizio.

La fase conclusiva delle attività svolte nel terzo anno ha riguardato, oltre alla stesura della presente Tesi, l'elaborazione di proposte per l'applicazione della metodologia ad altri casi di studio più complessi nonché la completa ingegnerizzazione dei processi applicativi della metodologia stessa.

#### **1.4 Sintesi dei risultati raggiunti**

I risultati ottenibili attraverso l'applicazione della metodologia proposta possono risultare particolarmente utili nel momento in cui l'innovazione tecnologica sollecita conseguenti modifiche rilevanti del sistema regolamentare nonché della gestione del comportamento umano con l'instaurarsi della possibilità che si generino maggiori rischi per l'uomo, l'ambiente, la circolazione ferroviaria e in generale per il sistema ferroviario.

Lo sviluppo della metodologia di valutazione delle prestazioni del sistema ferroviario in termini di sicurezza e di capacità, ha riguardato:

- la regolamentazione dell'esercizio e la componente umana;
- le caratteristiche infrastrutturali e tecnologiche dell'infrastruttura;
- le caratteristiche del materiale rotabile;
- i modelli di esercizio e gli obiettivi di regolarità prefissati.

L'analisi dei dati relativi all'incidentalità è stata d'ausilio per l'applicazione del modello a casi concreti.

Sono stati individuati opportuni indicatori per la definizione delle prestazioni della sicurezza e della capacità, mettendo in evidenza gli effetti sul sistema soprattutto nelle situazioni di scarsa efficienza dei dispositivi tecnologici e di errato comportamento umano.

La metodologia sviluppata consente di:

- schematizzare la normativa applicabile ai casi di studio;
- valutare la possibilità che possano originarsi situazioni critiche per la sicurezza secondo scenari critici;
- stimare la probabilità di accadimento per ogni scenario critico e determinare il corrispondente livello di rischio;
- valutare, nei processi operativi, l'influenza dell'uomo e della tecnologia;
- valutare i possibili effetti sulla circolazione (ritardi, irregolarità, modifiche al modello di esercizio, ecc.).

Ulteriori sviluppi appaiono identificabili a partire dai risultati sin qui ottenuti. In prima analisi essi possono essere sintetizzati in:

- strumenti di ausilio per valutare situazioni di esercizio complesse;
- strumenti di ausilio per valutare l'influenza del fattore umano e della tecnologia;
- metodi di formalizzazione della logica e della struttura dei processi operativi;

- integrazione con sistemi esperti;
- confronto dei risultati con quelli di altri metodi sviluppati.

La formulazione della metodologia è tale da ipotizzare la completa ingegnerizzazione dei suoi processi.

## II. Ricerca bibliografica

La valutazione delle prestazioni del sistema ferroviario in termini di sicurezza e di capacità ha richiesto una fase di ricerca bibliografica.

A partire da tale esigenza e dopo aver ricostruito lo stato dell'arte, la ricerca è stata sviluppata concentrando l'attenzione sulle rappresentazioni e schematizzazioni utilizzate per i sistemi complessi nell'ambito dei tre temi: regolamentazione, sicurezza e capacità.

### II.1 Pubblicazioni, studi e dati

La ricerca è stata sviluppata a partire da testi generali quali "Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria" (De Palatis, 1995), "L'avvenire della sicurezza. Esperienze e prospettive" (De Palatis, 2000), "Tecnica della circolazione ferroviaria" (Bianchi e Rizzo, 1980), "Elementi generali dell'esercizio ferroviario" (Cesari, Lucchetti e Rizzo, 1999), "Organizzazione e tecnica ferroviaria" (Vicuna, 2001), "Impianti ferroviari" (Mayer, 2004), per proseguire con altri testi maggiormente specifici riguardanti:

- la regolamentazione dell'esercizio ferroviario;
- la sicurezza della circolazione ferroviaria;
- la capacità dell'infrastruttura ferroviaria;
- l'incidentalità ferroviaria;
- gli effetti dei comportamenti umani sulla sicurezza ferroviaria.

A titolo puramente indicativo, la documentazione consultata ha teso all'evidenziazione sia degli aspetti teorici sia degli aspetti applicativi quali "Elaborazione di una metodologia di analisi e verifica dei regolamenti di circolazione ferroviaria e sua applicazione comparata ai regolamenti FS, SNCF e DB" (Ricci, 1993) – Tesi Dottorale; "Studio di una metodologia di analisi e verifica dei regolamenti di circolazione ferroviaria applicata ai carrelli" (Razionale, 2002) – Tesi di Laurea; "La sicurezza nei sistemi di trasporto ferroviari" (Impastato, 2004) – Tesi Dottorale.

La ricerca è stata poi indirizzata verso metodologie specifiche atte alla definizione univoca del sistema in studio, alla schematizzazione del suo funzionamento e all'individuazione degli adeguati metodi, tecniche e strumenti operativi analitici o sintetici.

Parte del lavoro di ricerca bibliografica è stato orientato verso l'approfondimento delle tecniche e delle schematizzazioni funzionali proprie del sistema ferroviario e della circolazione in particolare.

In questo quadro si inserisce la consultazione di numerosi articoli scientifici pubblicati su alcune tra le più importanti riviste di settore a livello nazionale e internazionale.

Sono stati consultati i manuali di utilizzo di alcuni software di simulazione della circolazione ferroviaria nonché di tecniche di analisi dei rischi. Sono state apprese le principali funzionalità per poter svolgere test funzionali a casi applicativi.

Per quanto riguarda il tema della sicurezza della circolazione, la ricerca è stata condotta attraverso la documentazione utile a partire da testi specifici quali "An introduction to the basics of Reliability and Risk Analysis" (Zio, 2007), "Engineering Safety Management. Fundamentals and Guidance" (Yellow Book, 2007), "Quantitative risk analysis - Theory and model" (Santos, 2008).

Ulteriori approfondimenti hanno riguardato la possibile automatizzazione di alcuni processi dello strumento logico-matematico messo a punto mediante programmazione di uno specifico software.

Maggiori dettagli e ulteriori riferimenti bibliografici sono riportati nel capitolo di Bibliografia alla conclusione della presente Tesi.

## **II.2 Normativa comunitaria e Legislazione nazionale**

Si riporta di seguito l'elenco delle norme comunitarie e nazionali, ritenute maggiormente significative ai fini della ricerca proposta.

- Direttiva 2004/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 relativa alla sicurezza delle ferrovie comunitarie e recante modifica della Direttiva 95/18/CE del Consiglio relativa alle licenze delle imprese ferroviarie e della Direttiva 2001/14/CE relativa alla ripartizione della capacità di infrastruttura ferroviaria, all'imposizione dei diritti per l'utilizzo dell'infrastruttura ferroviaria e alla certificazione di sicurezza ("Direttiva sulla sicurezza delle ferrovie");
- Decreto Legislativo n. 162 del 10/08/2007 "Attuazione delle direttive 2004/49/CE e 2004/51/CE relative alla sicurezza e allo sviluppo delle ferrovie comunitarie";
- Decreto Legislativo n. 163 del 10/08/2007 "Attuazione della direttiva 2004/50/CE che modifica le direttive 96/48/CE e 2001/16/CE relative all'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo";
- Regolamento (CE) n. 352/2009 della Commissione del 24 aprile 2009 relativo all'adozione di un metodo comune di determinazione e di valutazione dei rischi di cui all'articolo 6, paragrafo 3, lettera a), della direttiva 2004/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio;
- Direttiva 2009/149/CE della Commissione del 27 novembre 2009 che modifica la Direttiva 2004/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda gli indicatori comuni di sicurezza e i metodi comuni di calcolo dei costi connessi agli incidenti;
- Regolamento (UE) n. 1158/2010 della Commissione del 09/12/2010 relativo a un metodo di sicurezza comune per valutare la conformità ai requisiti di ottenimento di certificati di sicurezza della rete ferroviaria.

### **II.3 Norme tecniche europee**

Nel presente paragrafo si riportano le norme tecniche europee considerate per condurre la ricerca.

- CENELEC EN 50126-1 “Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filotranviarie, metropolitane – La specificazione e la dimostrazione di Affidabilità, Disponibilità, Manutenibilità e Sicurezza (RAMS)” – Parte 1: Requisiti di base e processo generico;
- CENELEC EN 50126-2 “Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filotranviarie, metropolitane – La specificazione e la dimostrazione di Affidabilità, Disponibilità, Manutenibilità e Sicurezza (RAMS)” – Parte 2: Guida all’applicazione della Norma EN 50126-1 per la sicurezza;
- UIC Fiche 405 “Liens entre capacité des infrastructures ferroviaires et qualité de l’exploitation”;
- UIC Fiche 405-1 “Methode destinée à déterminer la capacité des lignes”;
- UIC Fiche 405-2 “Mesures en vue d’accroître la capacité des lignes à fort traffic”;
- UIC Fiche 406 R “Capacity”.

### **II.4 Altri atti rilevanti**

In questo paragrafo sono elencati altri atti rilevanti ai fini della ricerca.

- Regolamento per la Circolazione dei Treni (RCT) – Edizione 1962 dell’Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF) del 13/12/2009;
- Regolamento sui Segnali (RS) – Edizione 1947 dell’Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF) del 02/12/2009;
- Prefazione Generale all’Orario di Servizio (PGOS) – di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 07/09/2010;
- Disposizione n. 13/2001 della Divisione Infrastruttura delle Ferrovie dello Stato (FS) del 26/06/2001 “Requisiti per l’adozione, da parte delle Imprese Ferroviarie e della Divisione Infrastruttura, di un sistema di gestione della sicurezza - Safety Management System” e s.m.i.;
- Disposizione n. 15/2004 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 19/04/2004 “Modifiche alla Disposizione del Gestore dell’Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001”;
- Disposizione n. 51/2005 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 10/08/2005 “Normativa per l’esercizio degli impianti di Rilevamento Temperature Boccole (RTB) per Linee ad Alta Capacità/Alta Velocità (AC/AV), attrezzate con ERTMS/ETCS L2” e s.m.i.;
- Disposizione n. 51/2007 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 12/11/2007 “Modifiche alla Disposizione del Gestore dell’Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001 e successive modifiche”;
- Decreto n. 1/2009 dell’Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF) del 06/04/2009 “Attribuzioni in materia di sicurezza della circolazione ferroviaria”.

# PARTE I

## MACRO SETTORI DEL SISTEMA FERROVIARIO

*“Una norma è una disposizione  
che regola autoritariamente  
determinati comportamenti,  
prestabilendo cosa accadrà  
se essa verrà osservata  
e cosa se non lo sarà”*

(Massimo Corsale)

## 1. La regolamentazione dell'esercizio ferroviario

La normativa d'esercizio coinvolge tutti i settori che contribuiscono alla produzione di un servizio ferroviario, direttamente e indirettamente, e va vista come sistema funzionale e dinamico dell'intero complesso operativo della circolazione dei treni.

### 1.1 Il sistema regolamentare

La regolamentazione dell'esercizio ferroviario risponde all'esigenze della produttività di un servizio, tenendo presente i principi fondamentali che da sempre caratterizzano il servizio ferroviario stesso: la sicurezza e la regolarità (Cirillo, 1991).

Sin dalla sua nascita il servizio ferroviario è stato caratterizzato da una rigorosa normativa, che in modo imperativo regola il comportamento del personale a esso addetto e impone le modalità di utilizzazione dei mezzi all'utenza, che di esso si serve per le proprie esigenze di mobilità.

D'altra parte la caratteristica fondamentale del trasporto su rotaia (a guida vincolata richiedente notevoli spazi di frenatura) ha imposto da sempre regole severe sia per la progettazione dei mezzi e delle linee, che per il loro esercizio.

La circolazione dei treni, non regolabile a vista, deve perciò essere controllata e gestita a distanza per mezzo di segnali, opportunamente progettati e dislocati lungo la linea in punti determinati, con la funzione principale di trasmettere informazioni al personale di condotta dei treni (p.e. autorizzare il proseguimento della corsa oppure ordinare la fermata del treno per esigenze e motivi diversi).

Ne consegue che tutto il sistema, da cui dipende la circolazione dei treni, deve essere governato da normative rigide e nello stesso tempo semplici perché siano facilmente applicabili.

La regolamentazione dell'esercizio costituisce l'involucro, ordinato e coordinato, delle interrelazioni ed esigenze inerenti la produttività e la regolarità dell'esercizio in un quadro normativo definito.

Le norme sulla regolamentazione dell'esercizio sono racchiuse in pubblicazioni specifiche: i regolamenti; le disposizioni; le istruzioni e, gli ordini di servizio. Questi ultimi, assieme alle circolari, costituiscono i regolamenti d'esercizio (Figura 1.1).

I *regolamenti* propriamente detti sono il:

- Regolamento per la Circolazione dei Treni (RCT);
- Regolamento sui Segnali (RS).

L'RCT riporta i principi generali e le regole indispensabili a vigilare la circolazione dei treni; l'RS comprende i principi generali e le regole necessarie al segnalamento

ferroviario. Le apparecchiature del segnalamento ferroviario consentono, al personale operante a terra, di trasmettere al personale di macchina, gli ordini dei mezzi in movimento.

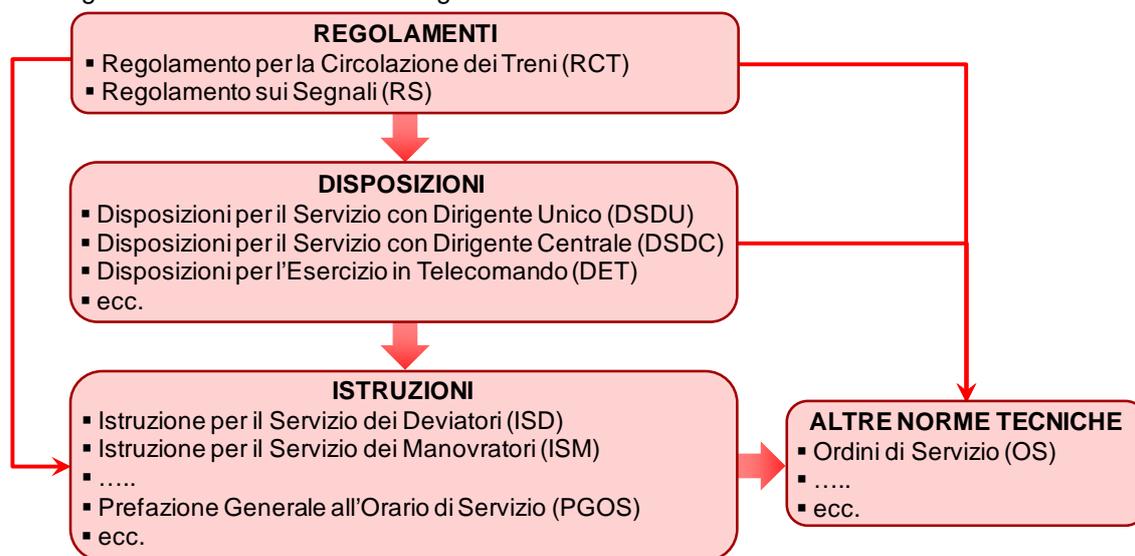
Le *disposizioni* sono previste dall'RCT e rappresentano le norme che regolano il comportamento del personale che opera nell'ambito di particolari sistemi d'esercizio.

Le *istruzioni* comprendono le norme di dettaglio che regolamentano il comportamento di specifiche categorie di operatori o in definiti settori complementari dell'esercizio, attraverso criteri e modalità. Le istruzioni sono collocate nelle norme generali previste dai regolamenti RCT e RS e non possono mai contravvenire a esse.

Gli *ordini di servizio* sono norme che fanno parte della regolamentazione e hanno la funzione di disciplinare particolari attrezzature e/o procedure. Possono derogare dal quadro normativo e, per la loro complessità e particolarità, sono pianificate a parte.

Le *circolari* sono norme emanate dagli organi aziendali per fornire chiarimenti o interpretazioni delle norme generali. Vengono utilizzate anche per disciplinare situazioni particolari o di emergenza.

Figura 1.1 - Architettura regolamentare.



Fonte: De Palatis P. – *Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1995.

Il sistema regolamentare è un sistema complesso. Esso è costituito da diversi componenti e relative correlazioni (Figura 1.2).

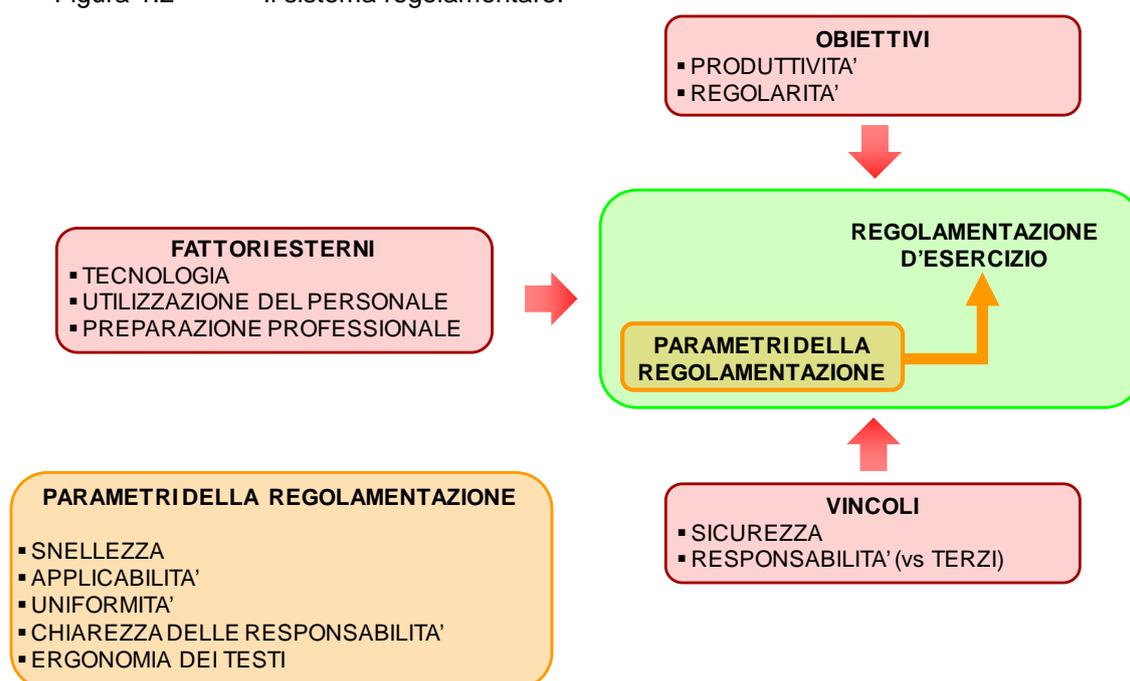
## OBIETTIVI

L'obiettivo primario della regolamentazione dell'esercizio è quello di contribuire alla progettazione di un servizio ferroviario funzionale attraverso regole e procedure di sicurezza che utilizzino in modo ottimale le risorse disponibili. Il grado di funzionalità della regolamentazione è misurabile attraverso la produttività e la regolarità.

La *produttività* si può definire sinteticamente come la quantità di risorse umane impiegate per ogni unità di traffico prodotto. Quantità di risorse e unità di traffico possono essere riferite a specifici settori dell'esercizio e possono essere misurate attraverso diversi indicatori, quali: numero di agenti, ore/uomo, treni/km, ecc.

La *regolarità* della circolazione, cioè la puntualità dei treni rispetto agli orari prestabiliti, rappresenta uno dei parametri della qualità del trasporto maggiormente gradito e auspicato dalla clientela. Pertanto, è uno degli obiettivi più importanti da considerare.

Figura 1.2 - Il sistema regolamentare.



Fonte: De Palatis P. – *Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1995.

Le cause che possono determinare un deterioramento della regolarità del servizio si possono distinguere in due tipologie:

- le cause interne, dovute a guasti del materiale rotabile e delle attrezzature di sicurezza di linea o di stazione nonché agli errori da parte degli operatori nel regolamentare il traffico;
- le cause esterne, imputabili a situazioni che non rientrano nelle disfunzioni organizzative, come ad esempio calamità naturali, proteste da parte dei cittadini che occupano gli impianti ferroviari, ecc.

In particolare, tra le cause interne vanno annoverate le cause di tipo sistematico determinate da procedure troppo complicate che rallentano la regolarità o da inadeguatezza degli impianti rispetto all'intensità dei flussi della circolazione.

Assicurare una buona regolarità nell'esercizio ferroviario vuol dire riuscire ad avere benefici anche in termini di sicurezza. Infatti, quando il traffico è perturbato, si ricorre a procedure regolamentari specifiche che impongono particolari tipi di avvisi e

accertamenti che determinano un ulteriore aggravio di lavoro e, pertanto, un incremento delle possibilità di commettere errori con conseguenti ripercussioni sulla sicurezza.

#### VINCOLI

La regolamentazione dell'esercizio è un sistema dinamico in quanto varia nel tempo e nello spazio in base ai mutamenti che si verificano nel contesto in funzione dei periodi storici e che orientano gli obiettivi da perseguire. La sicurezza è una componente dell'esercizio fondamentale che spesso viene erroneamente annoverata fra gli obiettivi da perseguire, ma che, invece, non ne condivide le caratteristiche di variabilità.

La *sicurezza* rappresenta un vincolo più che un obiettivo poiché condizione costante e inderogabile da perseguire indipendentemente dagli obiettivi. Essa va garantita in ogni caso indipendentemente dalle condizioni politiche sociali ed economiche in cui si versa. Possiede cioè le caratteristiche di valore assoluto anche se presenta diversi livelli di gradualità: esistono diversi livelli di sicurezza.

In base a quanto detto finora, la sicurezza si può allora definire: un insieme complesso di mezzi tecnici, organizzativi e normativi, che si realizzano con l'obiettivo di garantire la circolazione dei treni.

L'altro vincolo da tenere in considerazione nella trattazione della materia regolamentare è quello relativo alla *responsabilità verso terzi*, ovvero del complesso di mezzi tecnici, organizzativi e normativi, che vengono messi in atto per garantire l'incolumità di terzi, siano essi viaggiatori o utenti in genere della ferrovia, siano essi utenti esterni ma che interagiscono con la sede ferroviaria.

#### FATTORI ESTERNI

Nel campo del sistema regolamentare ricoprono un ruolo importante i fattori esterni della regolamentazione che rappresentano quegli elementi che ne costituiscono l'ossatura. Essi sono: la tecnologia; l'utilizzazione del personale; la preparazione professionale del personale.

La *tecnologia* è un fattore strategico in quanto consente, per mezzo della meccanizzazione e dell'automazione, di rendere più funzionale l'esercizio, di ridurre l'intervento umano e i suoi possibili errori garantendo una maggiore sicurezza, e di snellire le procedure.

Gli aspetti fondamentali della tecnologia sono la:

- consistenza;
- omogeneità;
- affidabilità.

La consistenza è importante perché insufficienze negli impianti fissi (armamento, opere civili, apparati centrali di sicurezza, attrezzature, ecc.) e degli impianti mobili inficiano la funzionalità del servizio e, di conseguenza, gli standard di sicurezza.

L'omogeneità delle tecnologie e, in particolar modo l'attrezzatura della rete, si deve prestare alle suddivisioni e alle distinzioni normative di cui occorre tener conto nella formulazione dei testi regolamentari. L'ultimo aspetto fondamentale della tecnologia, è l'affidabilità. Assume grande importanza l'affidabilità degli impianti in quanto influisce sulla regolamentazione degli esercizi. Quando si verifica un guasto, la regolamentazione degli interventi risulta delicata e onerosa poiché oggigiorno si dispone di impianti che sono sempre più complessi.

In base a quanto detto finora si può comprendere l'importanza della tecnologia, la quale, anche se è un fattore esterno alla regolamentazione, ne rappresenta un aspetto fondamentale.

L'*utilizzazione del personale* e i cambiamenti di esso (ampliamento mansioni, trasferimenti, introduzione nuovi profili) hanno ripercussioni sulla regolamentazione dell'esercizio in quanto richiedono nuove procedure operative e nuove norme regolamentari. Le variazioni dei criteri di utilizzazione del personale, delle abilitazioni e dei modelli di esercizio rappresentano anch'esse un fattore esterno alla regolamentazione.

Un altro fattore importante della regolamentazione dell'esercizio è la *preparazione professionale* del personale. Anche se la tecnologia si è perfezionata determinando un minor impiego di risorse umane, non si potrà eliminare la presenza di un operatore in quanto occorre una persona che vigili e supervisioni gli apparati di sicurezza e che intervenga in situazioni di emergenza o di guasto. Il personale, pertanto, deve esser ben preparato per essere in grado di intervenire proficuamente sui sistemi operativi sempre più moderni e sofisticati.

#### PARAMETRI DELLA REGOLAMENTAZIONE

I parametri sono quegli aspetti facenti parte della regolamentazione indipendenti dai fattori esterni. Essi sono: la snellezza; l'applicabilità; l'uniformità; la chiarezza delle responsabilità; l'ergonomia dei testi (Tabella 1.1). La qualità dei parametri determinano la funzionalità della regolamentazione.

## 1.2 La progettazione regolamentare

La regolamentazione dell'esercizio ferroviario deve rispettare determinate esigenze di base. Anche in campo regolamentare si opera con una visione pianificatrice, poiché nei processi di ricerca delle soluzioni esiste un progetto che stabilisce gli obiettivi da conseguire, le linee strategiche da seguire, ecc.

Prima di elencare le suddette esigenze è opportuno accennare alle caratteristiche della regolamentazione ovvero a quegli aspetti invariabili della regolamentazione che non mutano al cambiare dei fattori né al trasformarsi dei parametri regolamentari. Essi sono: la complessità, la non esaustività, la ponderatezza, la stabilità e la limitatezza.

La prima caratteristica è rappresentata dalla *complessità*. La complessità dell'esercizio genera una regolamentazione complessa: la normativa dell'esercizio è un sistema composito in quanto le tecnologie impiegate nell'esercizio sono molteplici. Inoltre, occorre considerare che le nuove tecnologie si sovrappongono alle esistenti ingenerando una trasformazione che è graduale nei diversi settori dell'esercizio negli operatori e fra le varie componenti.

Tabella 1.1 - I parametri interni della regolamentazione dell'esercizio.

PARAMETRI INTERNI DELLA REGOLAMENTAZIONE
<p><b>SNELLEZZA</b></p> <p>La semplificazione e lo snellimento delle procedure regolamentari determinano: maggior facilità nell'applicare la normativa in modo corretto e senza errori o dimenticanze (garanzia di sicurezza); migliore razionalizzazione del personale che applica la normativa; maggior velocità nel compiere le operazioni (ripercussioni sulla regolarità della circolazione). Lo snellimento, quindi, ha ricadute positive nei riguardi della sicurezza e nella regolarità della circolazione. Per consentire la semplificazione, per esempio, è possibile eliminare quelle situazioni in cui il doppio controllo (controllo dell'uomo sull'uomo) non è indispensabile e non lede la sicurezza e sostituirlo con un apparato tecnologico che vigili sull'operato dell'uomo.</p>
<p><b>APPLICABILITA'</b></p> <p>L'applicabilità è un parametro simile alla snellezza, ma rappresenta un ulteriore aspetto della normativa. Infatti, una procedura normativa snella e chiara potrebbe non essere facilmente applicabile. E' importante utilizzare norme che tengano conto delle effettive esigenze e possibilità operative.</p>
<p><b>UNIFORMITA'</b></p> <p>L'uniformità è un aspetto essenziale dell'applicabilità della regolamentazione dell'esercizio. Utilizzare norme diverse per le stesse situazioni d'esercizio determina perplessità e indecisioni nel personale che potrebbe attuare comportamenti diversi nei medesimi contesti operativi con ricadute sulla rapidità dell'intervento e più in generale sulla sicurezza.</p>
<p><b>CHIAREZZA DELLE RESPONSABILITA'</b></p> <p>La chiarezza delle responsabilità consiste nell'attribuire al personale responsabilità chiare e disposizioni precise che rispondano alle situazioni pratiche dell'esercizio.</p>
<p><b>ERGONOMIA DEI TESTI</b></p> <p>I testi che costituiscono la regolamentazione dell'esercizio devono essere comprensibili e facilmente leggibili, consultabili e immediati (caratteristiche ergonomiche). I testi devono contenere soltanto le regole e le procedure sulla sicurezza.</p>

Fonte: In De Palatis P. – *Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1995.

Un'altra caratteristica della regolamentazione è l'*esaustività*. La regolamentazione non può essere esaustiva in quanto non può prevedere e disciplinare tutti gli infiniti casi che si introducono nell'esercizio.

La caratteristica della *ponderatezza* indica che la regolamentazione è il risultato di azioni congiunte e di contributi provenienti dai vari settori. Pertanto le norme devono dar conto alle diverse esigenze e perciò spesso sono il frutto di un compromesso accuratamente ponderato.

La *stabilità* è un'ulteriore caratteristica della regolamentazione. Un testo regolamentare non può essere modificato in tempi brevi, sia perché è necessario sperimentare le nuove procedure per un lasso di tempo, sia perché la nuova norma deve essere approvata seguendo un determinato iter.

Infine, riguardo alla *limitatezza*, determinati problemi non possono essere risolti solo con provvedimenti di natura regolamentare ma la loro soluzione andrebbe ricercata e affidata a strumenti di natura tecnica e organizzativa.

In generale, quindi, si può affermare che le esigenze a cui la regolamentazione risponde sono (Bianchi e Cesari, 1991):

- ispirarsi a criteri rigorosi;
- tenere in considerazione i risultati dell'esperienza;
- avere un'impostazione economicamente valida;
- essere esplicitata in testi di agevole comprensione;
- risultare di non difficile applicazione pratica.

Le spinte evolutive che determinano la progettazione della regolamentazione possono essere ricomprese in due gruppi significativi: spinte esterne e spinte interne.

Le spinte esterne provengono dai fattori della regolamentazione e in particolare dal progresso tecnologico. Le spinte interne, invece, provengono dall'esperienza dell'esercizio ferroviario e traggono origine dal cosiddetto "ritorno d'esperienza" come per esempio le mutate caratteristiche della circolazione, le difficoltà oggettive di applicazione della regolamentazione, le cause ricorrenti di incidenti, ecc.

Le fasi fondamentali del processo di progettazione dei regolamenti sono:

- l'analisi regolamentare;
- la sperimentazione;
- la standardizzazione;

al termine di queste precise fasi sequenziali c'è poi l'emanazione.

Stabilito l'obiettivo da raggiungere, l'*analisi regolamentare* consiste nella valutazione delle variabili che interferiscono nel campo regolamentare (altri obiettivi, fattori, vincoli, parametri) e nella scelta della soluzione regolamentare più valida tra quelle possibili che consentono di raggiungere lo stesso obiettivo.

L'attivazione di una nuova regolamentazione di sicurezza può avvenire attraverso due metodi diversi. Il primo è quello di approntare modifiche definitive nei testi regolamentari, diramarle preventivamente al personale operativo e quindi renderle operanti a mezzo di apposita disposizione a partire dall'ora 00.00 di un giorno X. Il secondo metodo, invece, rappresenta una prassi più lunga e onerosa attraverso l'introduzione graduale delle nuove disposizioni nella regolamentazione già vigente.

Tale metodo fa riferimento alla *sperimentazione*, la quale presenta degli indubbi vantaggi:

- la gradualità di applicazione da parte del personale;
- l'approfondimento di determinate questioni pratiche riscontrate negli esperimenti effettuati.

Terminata la fase sperimentale si possono ricavare le informazioni necessarie per procedere a una operazione di collaudo e validazione del progetto. Da questo momento inizia la fase di *standardizzazione* delle modifiche ai testi regolamentari, in quanto bisogna trasformare in articoli e commi i contenuti normativi, collaudati e validati, della sperimentazione. Si inizia così la formalizzazione delle modifiche regolamentari.

Terminata l'approvazione ai vari livelli, il progetto regolamentare viene varato attraverso la fase dell'*emanazione*.

### **1.3 Il fattore umano**

La prima necessità per trattare il tema della sicurezza della circolazione ferroviaria è quella di tener conto del fattore umano.

Bisogna essere consapevoli, innanzitutto, che l'uomo è fallibile. La sicurezza spesso dipende dal rispetto dei regolamenti da parte del personale. La circolazione dei treni, infatti, è fatta di operazioni in cui gli agenti che possono influire sulla sicurezza sono numerosi.

Da una parte il regolamento ha un carattere assoluto e deterministico, tende a essere il più esaustivo possibile, presuppone un'applicazione senza errori; dall'altra parte la dottrina della sicurezza deve riconoscere il fatto che l'inosservanza del regolamento è possibile e che essa è caratterizzata da una discreta probabilità. In base a quest'ultima concezione il perfezionamento del regolamento non può essere l'unico oggetto di investimento della sicurezza.

Se il regolamento agisce in modo forte sull'uomo, l'uomo deve rinforzare il suo legame col regolamento. In tal senso deve essere meglio sviluppato il ritorno dell'esperienza, degli incidenti o della realtà della pratica (De Palatis, 1995).

La redazione dei documenti regolamentari deve essere oggetto di particolare attenzione, in quanto i loro utenti sono da considerare veri e propri clienti interni. A tal proposito, i documenti vanno suddivisi a seconda dei vari mestieri, e devono essere per quanto possibile esaustivi, così da formare veri e propri testi unici.

## 1.4 Rappresentazioni e approfondimenti specifici

L'interpretazione e la rappresentazione del sistema ferroviario in tutte le sue componenti costituiscono un tema complesso che deve essere affrontato per consentire il corretto inquadramento della componente regolamentare all'interno del sistema stesso.

Il sistema ferroviario è definito quando sono definite le sue componenti, cioè gli oggetti, i loro attributi e le relazioni fra questi (Ricci, 1993).

Gli *oggetti* rappresentano i parametri del sistema che possono assumere diversi stati e definiscono in tal modo a loro volta uno stato del sistema.

Gli *attributi* costituiscono la manifestazione esterna dell'oggetto. Essi consentono di conoscere l'oggetto anche quantitativamente mediante l'assegnazione di un valore.

Le *relazioni* rappresentano i legami fra oggetti e attributi.

Nello sviluppo di queste relazioni si inserisce l'elemento umano che qualifica il sistema come *adattativo*, ossia caratterizzato da variabili a cui si debbano di volta in volta assegnare dei valori (attributi degli oggetti) in contrapposizione ai sistemi *meccanicistici* in cui l'elemento umano risulta confinato alla sola scelta della composizione del sistema (oggetti).

Il regolamento del sistema ferroviario risulta perciò in questa ottica *“uno strumento nelle mani dell'uomo per limitare i gradi di libertà dei componenti del sistema adattativo ferroviario e per ricondurlo il più possibile ad un comportamento meccanicistico, mediante la riduzione del suo grado di varietà”* (Ricci, 1993).

Va ricordato come la storia della regolamentazione sia fatta di successive approssimazioni di una struttura originaria che hanno condotto a forme estremamente complesse.

La progettazione regolamentare e quindi delle procedure operative dell'esercizio e della loro messa in atto, è il primo e più importante gradino della progettazione di un sistema complesso come quello ferroviario, poiché assicura che gli sforzi intrapresi nel campo della progettazione infrastrutturale e tecnologica non risultino vani.

L'evoluzione tecnologica è il motivo primario della necessità di uno strumento operativo razionale in grado di consentire alla componente regolamentare di adeguarsi a quest'ultima anche in termini prestazionali (Ricci, 1993).

Alla luce di quanto esposto in questo capitolo, è possibile ritenere che lo svolgimento della circolazione ferroviaria sia il risultato della cooperazione di una componente normativa costituita dai regolamenti e di una tecnica che comprende i componenti fisici: l'infrastruttura, gli impianti di sicurezza e segnalamento, il materiale rotabile.

## 2. La sicurezza della circolazione ferroviaria

Dal latino *sine cura* ovvero “assenza di preoccupazione”, il termine *sicurezza* è relativo al grado di conoscenza che quanto si pone in essere in un sistema non produrrà stati indesiderati e possibili conseguenti danni.

La scienza della sicurezza è la disciplina che studia il *rischio* nelle sue varie forme, dirette e indirette, e ne valuta la possibilità di riduzione al di sotto di soglie accettabili per l'uomo e per le attività produttive di suo interesse (Fedele, 2008).

La valutazione dei rischi è il processo progettuale che consente di identificare, analizzare e quantificare i rischi, in relazione ai pericoli presenti, nonché pianificare le misure necessarie a tenere sotto controllo la sicurezza, entro limiti di tollerabilità giudicati accettabili.

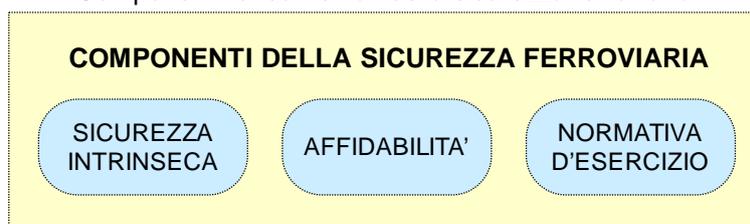
Obiettivo della sicurezza diviene, quindi, la valutazione dei rischi e l'assicurazione che essi rientrino all'interno di limiti accettabili.

### 2.1 Identità della sicurezza della circolazione ferroviaria

Dare una definizione precisa di sicurezza della circolazione ferroviaria non è facile. Storicamente, infatti, la sicurezza si è sempre basata sulla somma di tre componenti:

- la sicurezza intrinseca degli apparati;
- l'affidabilità delle attrezzature;
- la normativa d'esercizio.

Figura 2.1 - Componenti fondamentali della sicurezza ferroviaria.



Fonte: De Palatis P. – *Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1995.

Considerate singolarmente, queste tre componenti (Figura 2.1) possono essere analizzate come di seguito specificato.

#### SICUREZZA INTRINSECA

Alla sicurezza intrinseca appartengono essenzialmente gli impianti di sicurezza e segnalamento. Essa rappresenta l'insieme delle tecniche adottate per fronteggiare la globalità dei rischi; tali tecniche sono caratterizzate da un elevato grado di automazione e a esse è affidata la risoluzione sicura e razionale dei conflitti di circolazione e quindi la salvaguardia dell'integrità di cose e persone contro i rischi derivanti da movimenti incompatibili di veicoli. Della sicurezza intrinseca possono

essere date almeno tre definizioni (Bonfigli e Mazzeo, 1988; Rogione, 1988) come specificato nella Tabella 2.1.

Tabella 2.1 - Definizioni di sicurezza intrinseca.

Prima definizione
<p><i>La sicurezza intrinseca è la caratteristica di un sistema che garantisce che un guasto o mal funzionamento di un qualsiasi elemento interessante la sicurezza commuterà il sistema nello stato definito come sicuro.</i></p> <p>Nella definizione è insito il concetto che per un sistema sicuro deve potersi formulare l'esistenza di uno stato sicuro ove il sistema possa portarsi sempre, anche in caso di guasto. Qui vengono presi in considerazione solo gli eventi perturbatori che creano rischi derivanti da movimenti incompatibili di veicoli, e si ipotizzano due cose: che vi sia un regime di circolazione del tutto sicuro e che vi sia uno stato finale del sistema del tutto sicuro. La prima ipotesi è basata su logiche di circolazione e su apparecchiature che la realizzino: un solo guasto a queste ultime può creare rischi e un guasto qualsiasi porta il sistema a uno stato finale di sicurezza. La seconda ipotesi è che esista uno stato finale di sicurezza e che esso consista nell'arresto immediato di ogni movimento di veicoli in una certa area.</p>
Seconda definizione
<p><i>La sicurezza intrinseca può essere quella che un'apparecchiatura o un sistema per essere considerato di sicurezza deve avere un livello di ridondanza sufficiente per assicurare il rispetto dei limiti assegnati alla probabilità di eventi pericolosi.</i></p> <p>Questa definizione ha il pregio di introdurre il concetto di probabilità.</p>
Terza definizione
<p><i>La sicurezza intrinseca è la caratteristica di un sistema o di una apparecchiatura che realizza un'adeguata protezione da rischi definiti.</i></p> <p>Tale definizione cerca di mediare il concetto assoluto con quello di rischi definiti accettabili. Introduce, cioè, una considerazione più realistica dei limiti di applicabilità pratica di certi principi. Introdurre il concetto di rischi definiti ha il pregio di consentire al progettista di potersi limitare a considerare un ben preciso insieme di rischi che deve cercare di ridurre entro limiti di probabilità accettabili.</p>

Fonte: In De Palatis P. – Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria – CIFI, Roma, 1995.

## AFFIDABILITA'

L'affidabilità delle attrezzature è legata all'applicazione di tecniche che nel settore ferroviario riguardano le tecniche di sovradimensionamento, di manutenzione preventiva e di verifica.

All'area dell'affidabilità appartengono la grande maggioranza dei sottosistemi ferroviari, dai veicoli alle opere civili, dagli impianti di alimentazione a quelli di telecomunicazione. A questi impianti è affidata la salvaguardia da rischi derivanti da

inefficienza dei mezzi di trasporto e delle infrastrutture, dove l'intervento dell'operatore umano è essenziale.

Per affidabilità si intende in definitiva il grado di probabilità che nei componenti di un sistema non si verifichino guasti.

*“Un guasto di una apparecchiatura, sia negli impianti sia sui veicoli, infatti degrada sempre la sicurezza, anche se non è di per se rischioso. In particolare, un guasto agli impianti di sicurezza crea perturbazioni alla circolazione, e soprattutto, richiede la ripresa dell'esercizio in condizioni di sicurezza che sono inferiori e che in ogni caso non sono familiari agli operatori, i quali devono ricorrere a procedure inconsuete”* (Chiavacci, 1990).

#### NORMATIVA D'ESERCIZIO

La normativa d'esercizio si può definire come l'insieme delle norme organizzative e dei comportamenti stabiliti per mettere in relazione l'operatore dell'esercizio con i sistemi e i dispositivi tecnologici a disposizione per la circolazione ferroviaria, con il fine di rendere minime le probabilità di rischio derivanti da errori, dimenticanze, malintesi degli operatori medesimi.

## 2.2 Sicurezza deterministica e probabilistica

Le tre componenti fondamentali descritte nel § 2.1, sulle quali si è sempre basata la sicurezza ferroviaria, sono state però quasi sempre considerate settorialmente, in maniera a sé stante, mentre oggi è nata l'esigenza di orientarsi verso un concetto ampio e completo di sicurezza che è quello della sicurezza globale, come visione unitaria, omogenea e integrata di tutti i fattori di rischio, connessi con la sicurezza intrinseca, l'affidabilità e la normativa di esercizio.

*“E' subentrato il concetto di sicurezza globale che afferma il criterio della salvaguardia delle persone e delle cose nella missione del treno dall'origine alla destinazione. Questo concetto di sicurezza globale è molto di più della semplice somma della sicurezza intrinseca, dell'affidabilità e della normativa di esercizio”* (Rogione, 1988).

Tuttavia, la concezione integrata e funzionale della sicurezza può mettere in evidenza alcune contraddizioni.

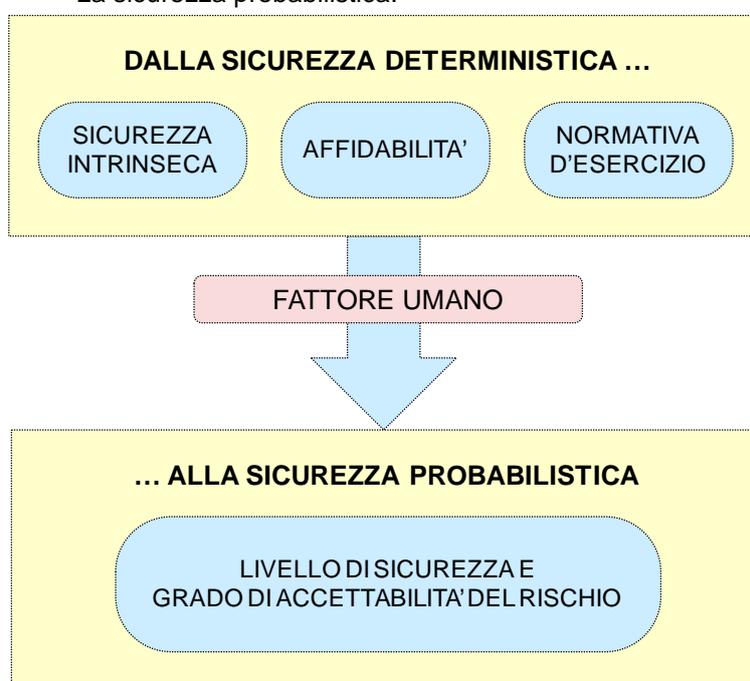
*“Infatti, per allontanare il rischio connesso a guasti pregiudiziali per la sicurezza dell'esercizio si è teso a sviluppare una tecnologia che rende questi eventi estremamente improbabili, a mezzo però di una notevole complicazione degli impianti. Per ridurre così la probabilità di tali guasti si sono introdotte ridondanze, aumentando di conseguenza la probabilità di guasti gestionali per l'operatore di esercizio, a cui si supplisce con procedure regolamentari basate sulla memoria e sull'attenzione dell'uomo. Non è detto che questo modo di procedere sia sempre a favore della sicurezza complessiva. Quando, infatti, in occasione di un guasto l'operatore deve intervenire ponendo in atto operazioni e accertamenti*

ordinariamente svolti dall'apparato si determina una situazione di emergenza che introduce una non trascurabile probabilità di errore umano. Quindi, se da un lato un'apparecchiatura maggiormente sofisticata può garantire una maggiore sicurezza in condizioni di regolare funzionamento, dall'altro la stessa apparecchiatura può determinare un maggiore scadimento del livello di sicurezza in caso di guasti' (Bonora, 1980).

Si deduce pertanto che un un'apparecchiatura maggiormente sofisticata e ridondata possa condurre ad un maggiore scadimento del livello complessivo della sicurezza.

A tutto quanto descritto sopra si può aggiungere che la sicurezza non può essere praticamente considerata assoluta e deterministica.

Figura 2.2 - La sicurezza probabilistica.



Fonte: De Palatis P. – *Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1995.

Analizzando le componenti della sicurezza (Figura 2.2), si può dedurre che:

- la sicurezza intrinseca è relativa (la logica di circolazione è concepita da esseri umani, che tengono conto di un certo numero di fattori di perturbazione e di rischio, e le apparecchiature sono in sicurezza intrinseca nella misura in cui è umanamente possibile concepirle);
- l'affidabilità è affetta dal limite di dover definire un ambiente standard e dal limite introdotto dal fattore umano (un guasto ha sempre alle spalle un errore umano: errori di concezione, di collaudo, di manutenzione dell'apparecchio);
- la normativa d'esercizio può essere affetta da rischi derivanti da errori dell'uomo (del progettista di un regolamento, dell'esecutore).

Si deduce, dunque, che nessuna delle componenti della sicurezza è totalmente sicura e soprattutto in tutte e tre è determinante il fattore umano.

Emerge, pertanto, un concetto di sicurezza non più deterministico ma probabilistico che è necessario quantificare valutando la probabilità che un sistema, un'organizzazione, un comportamento non determinino, in condizioni di esercizio definite e per un tempo prefissato, situazioni definite pericolose e stabilendo in definitiva un grado accettabile della probabilità di rischio.

Il grado di rischio accettabile determina il livello di sicurezza a cui fare riferimento.

Il livello di sicurezza equivale a stabilire la probabilità di errori che siamo disposti ad accettare. Poiché la sicurezza assoluta è irraggiungibile (infatti, quando ci si affida all'operatore umano, per quanti controlli si facciano, non è possibile essere certi che questi controlli vadano a buon fine), in ogni attività è insito un rischio, che può essere ridotto quanto si voglia ma non può essere eliminato. Tale rischio residuale ineliminabile costituisce la condizione preliminare e fondamentale di ammissibilità dell'attività.

*“All’origine la ferrovia nacque a doppio binario, in quanto il semplice binario era considerato pericoloso per gli incroci. Il pericolo tipico era considerato lo scontro e i metodi di regolamentazione degli incroci non erano giudicati sufficientemente cautelativi. Gli spostamenti di incrocio erano vietati sicché se il treno incrociante era in ritardo doveva essere atteso a tempo indeterminato. Con il progredire di sistemi di regolazione della circolazione dei treni, la linea a semplice binario venne accettata e ritenuta idonea all’esercizio ferroviario” (Piciocchi, 1981).*

### **2.3 I fattori della sicurezza**

Per un esame completo della sicurezza della circolazione ferroviaria occorre precisare quali sono i fattori che vi concorrono in modo significativo.

Tali fattori sono essenzialmente (Figura 2.3):

- la *tecnologia*;
- l'*affidabilità*;
- i *regolamenti d'esercizio*;
- l'*organizzazione*;
- la *formazione professionale*;
- la *sorveglianza*.

In particolare, il fattore *tecnologia* fa riferimento ai concetti di consistenza, affidabilità e omogeneità. Per quanto riguarda la consistenza, il concetto va analizzato sotto l'aspetto quantitativo e qualitativo: sotto l'aspetto quantitativo si considera importante la diffusione della tecnologia esistente e consolidata in quei settori dell'esercizio in cui la sicurezza è affidata per intero o in massima parte all'operato dell'uomo; sotto l'aspetto qualitativo, l'innovazione tecnologica deve essere finalizzata a quelle condizioni d'esercizio in cui l'operato dell'uomo è prevalente. Sull'affidabilità della tecnologia si fanno considerazioni specifiche relativamente al fattore *affidabilità*. L'omogeneità tecnologica è importante per evitare tutta quella fonte di casi, sottocasi ed eccezioni di eterogeneità che finiscono per complicare il quadro della sicurezza.

In definitiva, un intervento tecnologico sia di tipo estensivo sia di tipo innovativo deve essere progettato in maniera integrata, analizzando il livello tecnologico del contesto in cui si va a inserire, e ricercando il più possibile l'uniformità (De Palatis, 1995).

Il fattore *affidabilità* è una componente della sicurezza, in quanto certi guasti, pur non inficiando direttamente ma solo indirettamente la sicurezza, determinano situazioni d'esercizio degradate poco familiari all'operatore, a cui questi supplisce con procedure basate sull'esperienza e sulla manualità. Un'affidabilità non adeguata comporta la necessità di disciplinare molte situazioni di guasto che sono di per sé onerose e complesse, mentre la consapevolezza di un'affidabilità elevata fornisce la possibilità di snellire la regolamentazione dell'esercizio (De Palatis, 1995).

Figura 2.3 - I fattori della sicurezza.



Fonte: De Palatis P. – *Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1995.

Il fattore *regolamenti d'esercizio*, affrontato nel primo Capitolo della presente Tesi, fa riferimento ai parametri: snellezza, applicabilità, uniformità, chiarezza delle responsabilità ed ergonomia dei testi; cioè a quelle componenti interne della regolamentazione che possono essere regolate indipendentemente da vincoli e fattori esterni (De Palatis, 1995).

Il fattore *organizzazione* è presupposto imprescindibile della sicurezza: si possono distinguere due aspetti, quello della struttura organizzativa e quello della selezione del personale della sicurezza ai vari livelli (De Palatis, 1995).

Infine, i fattori *formazione professionale e sorveglianza*.

Nella Tabella 2.2 viene riportata l'analisi di ognuno dei suddetti fattori, chiarendone il nesso con la sicurezza.

Tabella 2.2 - I fattori della sicurezza.

<b>TECNOLOGIA</b>
<p><b>CONSISTENZA</b> La tecnologia, sostituendo o riducendo l'operato dell'uomo, ne evita o riduce la possibilità di errore, elevando gli standard di sicurezza. E' pertanto strategico migliorare costantemente la sua consistenza, perché insufficienze nel settore degli impianti fissi (armamento, sede, opere civili, apparati centrali di sicurezza, ecc.) e mobili (mezzi di trazione e veicoli) finiscono per incrinare la sicurezza del servizio e quindi gli standard di sicurezza.</p> <p><b>AFFIDABILITA'</b> La regolamentazione degli interventi in caso di guasto tende a divenire sempre più delicata e onerosa, man mano che si passa a disporre di impianti più perfezionati e complessi, e ciò anche in relazione al forte divario esistente tra una situazione di impianto efficiente e una situazione di impianto guasto. Per tale motivo assume estrema rilevanza il raggiungimento di elevati livelli di affidabilità degli impianti.</p> <p><b>OMOGENEITA'</b> E'altrettanto importante l'omogeneità delle tecnologie. L'attrezzatura della rete si presta alle suddivisioni e distinzioni normative perché presenta un campionario di impianti di vario tipo. Si pensi, ad esempio, ai vari tipi di materiali esistente nel parco rotabili, da cui derivano procedure diversificate per la chiusura delle porte, o ai PL. L'obiettivo è quello di ottenere standard tecnologici uniformi nel tempo e nello spazio.</p>
<b>AFFIDABILITA'</b>
<p><b>GUASTI CRITICI</b> Guasti potenzialmente molto pericolosi (rottura dell'asse o del cerchione, cedimento di un ponte, chiusura delle barriere di un PL) che possono incidere direttamente sulla sicurezza della circolazione e determinare, ad esempio, lo svio di un treno oppure scontri. Sono guasti statisticamente molto contenuti e a monte del loro verificarsi ci possono essere errori progettuali, o carenze manutentive, o omissioni di verifiche e controlli.</p> <p><b>GUASTI IN SICUREZZA</b> Guasti considerati non pericolosi. Sono sostanzialmente quelli relativi agli impianti di sicurezza e segnalamento e il loro verificarsi determina l'arresto dei treni. Vi rientrano tutti quei guasti che determinano la disposizione a via impedita di un segnale, evento questo che non ha carattere di eccezionalità nell'esercizio ferroviario. I guasti in sicurezza sono frequenti e determinano un degrado dello standard di circolazione dei treni. Infatti, sebbene tali guasti non siano considerati critici per definizione di sicurezza intrinseca della tecnologia, lo divengono di fatto dal punto di vista della sicurezza globale.</p>
<b>REGOLAMENTI D'ESERCIZIO</b>
<p>Una normativa agile, facilmente applicabile, uniforme, chiara nell'attribuzione delle responsabilità degli operatori, di facile consultazione viene più facilmente applicata e riduce la probabilità che possa essere distorta o aggirata. In considerazione di ciò, la sicurezza può essere migliorata anche mediante la regolamentazione dell'esercizio, attraverso l'ottimizzazione dei parametri della stessa.</p>

## ORGANIZZAZIONE

### STRUTTURA ORGANIZZATIVA

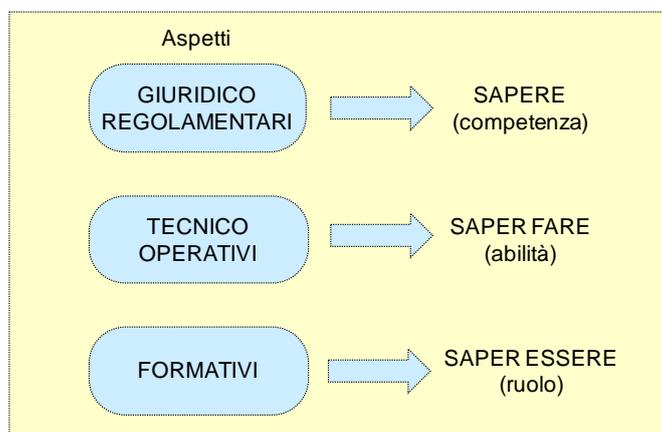
Per struttura organizzativa si intende l'insieme di quegli organismi strutturati ai vari livelli in cui confluiscono le attività di indirizzo e quelle operative inerenti la sicurezza. Per la sicurezza sono indispensabili la coerenza d'insieme, la chiarezza dei ruoli, l'ordine procedurale e operativo. E' estremamente importante che la sicurezza abbia una ben marcata connotazione strutturale ai diversi livelli, in base alla quale sia ben definito il chi fa che cosa.

### SELEZIONE DEL PERSONALE

Reclutamento (capacità di vigilanza in situazioni monotone e di adattamento a orari variabili e a turni di lavoro notturno). Avanzamento di carriera.

## FORMAZIONE PROFESSIONALE

Indirizzata per sviluppare nel personale il sapere, il saper fare e il saper essere.



## SORVEGLIANZA

Complesso di azioni per verificare se le procedure applicate nella pratica dell'esercizio sono complete e corrette.



Fonte: In De Palatis P. – Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria – CIFI, Roma, 1995.

## 2.4 I parametri del rischio

Nella terminologia specialistica, la sicurezza è considerata come quello stato del sistema in cui è esclusa la possibilità di incidenti (o di danni). Nel linguaggio usuale, la sicurezza è definita come il fatto di essere protetti da qualsiasi pericolo, mentre il rischio<sup>3</sup> è la possibilità di essere in pericolo. Se si prendono in considerazione i sensi di questi termini, è possibile definire la sicurezza come lo stato del sistema in cui il rischio di un pericolo è nullo. Come risultato, la sicurezza e il rischio sono due nozioni astratte, si escludono a vicenda.

A causa delle caratteristiche di ogni sistema, un carattere assoluto della sicurezza non può essere raggiunto. Infatti, non esiste un sistema in cui il potenziale incidente può essere completamente escluso, esiste sempre un rischio “residuo”, anche solo per l'imprevedibilità dell'azione umana.

L'eliminazione del rischio, pertanto, è concettualmente impossibile perché le variabili correlate sono numerose e non sempre quantificabili in modo compiuto; per questo motivo si parla di riduzione del rischio. Il rischio residuo rappresenta la quota parte di rischio che non si riesce ad annullare.

Di conseguenza, i sistemi possono essere caratterizzati da “livelli di sicurezza”, e rispettivamente “livelli di rischio”, come indicatori quantitativi degli stati binomio di sicurezza e di rischio.

Definita la Sicurezza ( $S$ ) e il Rischio ( $R$ ) esiste una funzione che lega i due:

$$S = \frac{1}{R}$$

da cui si evince che un sistema è più sicuro quando il livello di rischio è più basso, e viceversa. Così, se il rischio è tendente a zero, dal rapporto tra le due variabili risulta che la sicurezza tende verso l'infinito, mentre se il rischio tende verso l'infinito, la sicurezza tende a un valor nullo (Figura 2.4).

In questo contesto, deve essere considerato sia un livello di rischio minimo ovvero un livello di rischio diverso da zero sufficientemente basso per considerare che il sistema è sicuro, sia un livello di rischio massimo equivalente a un livello di sicurezza così basso tale che le operazioni del sistema non dovrebbero essere più consentite.

Il rischio è classificato, in letteratura, in funzione della sua formalizzazione teorica.

Una prima classificazione si basa sulle modalità del verificarsi del danno:

- rischio da guasto, ovvero rischio correlato al verificarsi di un comportamento anomalo nel funzionamento di un sistema tecnico e/o nell'attuazione del processo produttivo realizzato da quel sistema tecnico;
- rischio da esposizione, ovvero rischio correlato all'esposizione di una persona, per un dato tempo, a un agente tossico o nocivo per la sua salute.

---

<sup>3</sup> Sul piano terminologico e normativo, è opportuno considerare la distinzione che esiste fra rischio e pericolo, usati impropriamente come sinonimi, infatti, per pericolo deve intendersi la circostanza oggettiva del rischio.

Una seconda classificazione del rischio è relativa ai fenomeni sottesi e potenzialmente dannosi:

- rischio dovuto all'organizzazione;
- rischio fisico, strutturale, meccanico, chimico, elettrico;
- rischio legato al fattore umano<sup>4</sup>.

Una terza classificazione del rischio si riferisce all'ambito di riferimento:

- rischio locale;
- rischio per l'ambiente.

Figura 2.4 - Relazione tra Sicurezza e Rischio.



In base alla classificazione suddetta, il rischio assume il significato di una grandezza quantificabile correlata ai fenomeni potenzialmente dannosi e che può essere fatta oggetto di analisi, sulla base di misurazioni fisiche, di dati storico-statistici, di riferimenti normativi e di valutazioni logiche e di esperienza. Sul piano della formalizzazione analitica esistono metodi di analisi (analitici, sintetici, parametrizzati, qualitativi, quantitativi ecc.) nei quali generalmente si combina la probabilità del verificarsi di un evento con l'impatto che tale evento potrebbe avere (danno).

Conseguentemente, esistono diverse definizioni della grandezza rischio che dipendono dalle applicazioni e dal contesto. In generale, ogni indicatore di rischio è proporzionale al danno atteso e alla sua probabilità di accadimento (Fedele, 2008).

La definizione matematica del rischio dipende dal modello utilizzato per determinarlo. In un modello bidimensionale i parametri che costituiscono il rischio sono:

- la probabilità o la frequenza ( $f$ ) dell'evento incidentale con possibili effetti (magnitudo o gravità delle conseguenze);
- la magnitudo o gravità delle conseguenze ( $g$ ) dell'evento incidentale.

<sup>4</sup> Da un punto di vista concettuale, la maggior parte degli incidenti sono riconducibili all'elemento umano [Heinrich, *Industrial accident prevention: a safety management approach*, 1980].

Il rischio ( $R$ ) può essere valutato mediante alcune tecniche di rappresentazione:

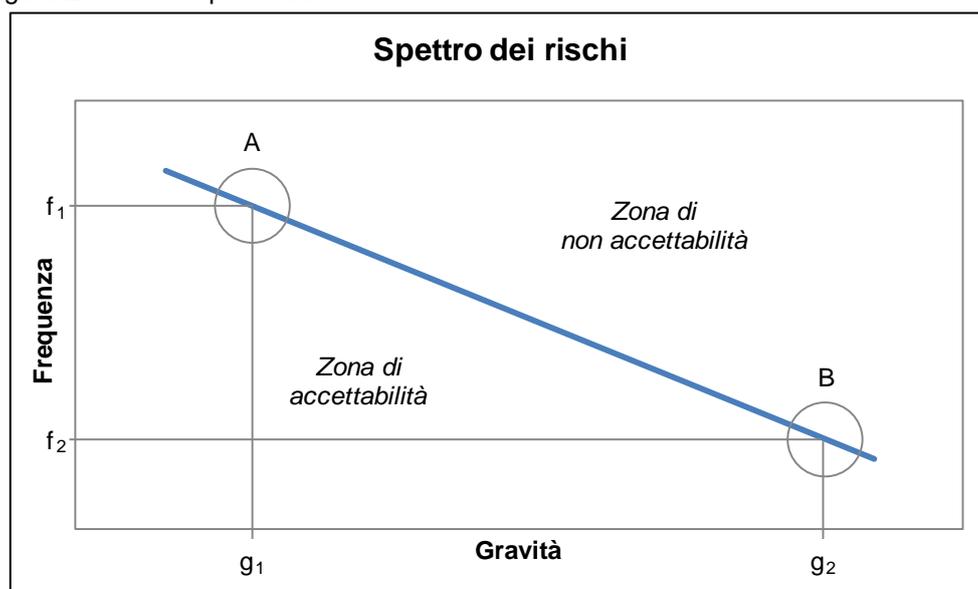
- tracciando le *curve di isorischio*  $R(f,g) = cost.$  che forniscono un'indicazione significativa del livello di rischio, inteso come probabilità che un individuo posizionato in un qualsiasi punto fisico di coordinate  $(f,g)$  rispetto alla sorgente del rischio stesso, coincidente con l'origine degli assi di riferimento, subisca gli effetti di un incidente originato dal sistema in studio;
- tracciando il diagramma che riporta lo *spettro dei rischi* in cui, a ciascun evento considerato, viene associata la probabilità secondo cui esso può verificarsi, nonché l'entità del danno.

Nel diagramma suddetto, il rischio è espresso tramite la relazione<sup>5</sup>:

$$R = f * g$$

dalla quale si evince che lo stesso valore di rischio si può ottenere in corrispondenza di un alto valore di  $f$  e di un basso valore di  $g$  oppure in corrispondenza di un basso valore di  $f$  e un elevato valore di  $g$ , come evidenziato nella Figura 2.5 ove i valori di  $f$  sono posti in ordinate e i valori di  $g$  sono posti in ascisse.

Figura 2.5 - Spettro dei rischi.



Fonte: FEDELE L. – Progettare e gestire la sicurezza – McGraw-Hill Companies, 2008.

Nella Figura 2.5 sono altresì evidenziate due zone distinte:

- *zona A*, caratterizzata da elevata frequenza del verificarsi di eventi dannosi, di gravità modesta;
- *zona B*, caratterizzata da modesta frequenza del verificarsi di eventi dannosi, di gravità elevata.

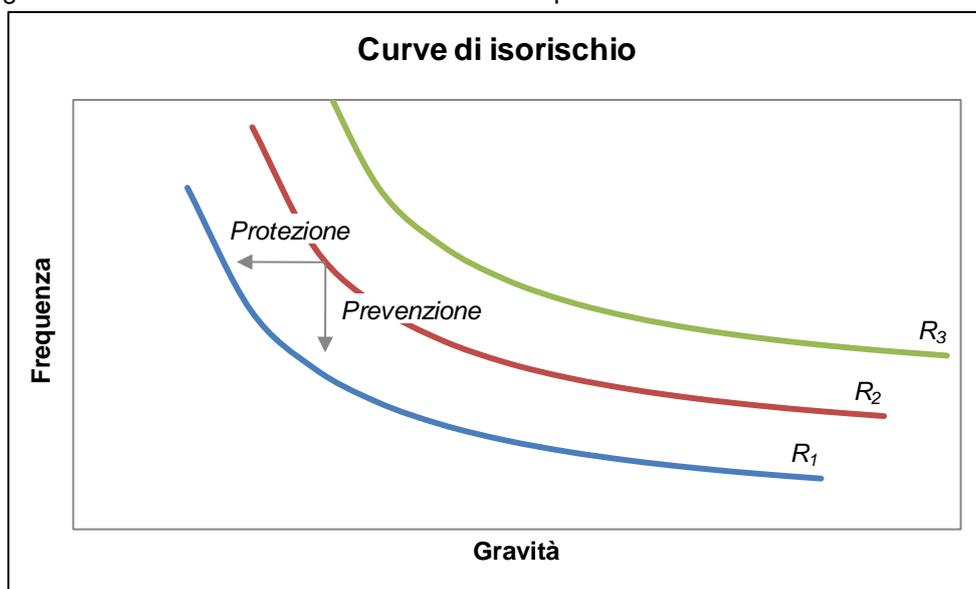
<sup>5</sup> Nei casi pratici, frequentemente la percezione del rischio è tale che si tende ad attribuire una rilevanza maggiore alle conseguenze di un possibile incidente, rispetto alla frequenza o alla probabilità di accadimento dell'evento:  $R = f * g^k$  con  $k > 1$  [Zio, *An introduction to the basics of reliability and risk analysis*, 2007].

All'interno dello spettro dei rischi è possibile individuare le linee di isorischio le quali si avvicinano progressivamente all'origine degli assi del diagramma, ordinate secondo valori decrescenti del rischio (Figura 2.6).

Queste considerazioni portano ad affermare che i tipi di intervento che si possono attuare per salvaguardare la sicurezza (diminuendo proporzionalmente il rischio) sono essenzialmente di due tipi:

- *prevenzione*, cioè riduzione della frequenza dell'evento che può produrre un danno;
- *protezione*, ovvero limitazione degli effetti negativi di un evento dannoso.

Figura 2.6 - Curve di isorischio e interventi per la riduzione del rischio.



L'obiettivo dell'ingegneria della sicurezza è quello di ridurre il rischio entro limiti accettabili (cioè lo spostamento da una curva di isorischio a un'altra caratterizzata da un valore inferiore del parametro  $R$ , ad esempio da  $R_2$  a  $R_1$  con  $R_1 < R_2$ ) operando da un lato sulla frequenza di accadimento (prevenzione) e, dall'altro, sulla gravità delle conseguenze (protezione), ovvero sulla combinazione delle due azioni.

In un modello tridimensionale i parametri che costituiscono il rischio sono:

- la probabilità o la frequenza ( $f$ ) dell'evento incidentale con possibili effetti;
- la magnitudo o gravità delle conseguenze ( $g$ ) dell'evento incidentale;
- l'area di impatto ( $A$ ) interessata dagli effetti.

In un modello multidimensionale, l'equazione del rischio ( $R_i$ ) relativo a un evento incidentale ( $i$ ) dipende dalla frequenza ( $f$ ) dell'evento incidentale, dalla gravità delle conseguenze ( $g$ ), dall'area di impatto ( $A$ ) interessata dagli effetti, dal coefficiente del livello di sicurezza ( $\alpha$ ) e dal tempo ( $t$ ), secondo la seguente funzione:

$$R_i = f(f, g, A, \alpha, t) \quad [1]$$

L'equazione algebrica [1] che mette in relazione il rischio ( $R_i$ ) di ogni evento incidentale ( $i$ ) con i parametri suddetti è definita "equazione dinamica del rischio" (Santos, 2008).

I parametri  $f$ ,  $g$ ,  $A$ , e  $\alpha$  non dipendono direttamente dal tempo ma possono variare con il tempo, invece i parametri  $f$ ,  $g$ ,  $A$ , sono direttamente dipendenti dal coefficiente del livello di sicurezza del sistema. Se  $\alpha$  dovesse variare nel tempo, allora anche  $f$ ,  $g$ ,  $A$ , cambierebbero seguendo la variazione del coefficiente del livello di sicurezza.

Il coefficiente del livello di sicurezza ( $\alpha$ ) rappresenta la capacità di un sistema di controllare e prevenire ogni tipo di rischio che potrebbe derivare da un evento. Esso può essere determinato mediante la seguente espressione:

$$\alpha = \frac{1}{N} * a_i$$

dove

$N$  è il numero totale delle misure di sicurezza supportate dal sistema di sicurezza;  
 $a_i$  è un valore assegnato per ogni misura di sicurezza (varia da 0 a 1).

Se  $n$  è il numero delle misure di sicurezza per un rischio specifico o evento ( $n \leq N$ ), allora:

$$\alpha = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n a_i$$

L'insieme delle possibili misure di sicurezza supportate dal sistema riguardano:

- la politica di sicurezza;
- il processo di gestione dei rischi compresa l'analisi dei rischi;
- la conformità alle normative;
- i dispositivi di protezione individuale;
- la supervisione del team di sicurezza;
- le ispezioni, recensioni e sondaggi;
- le revisioni periodiche interne ed esterne;
- la registrazione dei dati delle attività;
- i programmi di formazione;
- i piani di emergenza;
- le squadre di emergenza;
- l'assistenza medica e sanitaria;
- il certificato di sicurezza.

In un certo istante di tempo ( $t$ ), per un determinato evento incidentale ( $i$ ) e un coefficiente del livello di sicurezza ( $\alpha$ ), l'equazione dinamica del rischio [1] è data dalla seguente espressione:

$$R_{i,\alpha} = \frac{f * g * A}{\alpha} \quad [2]$$

Considerando che l'equazione [2] è una funzione del tempo, è possibile rappresentare il rischio mediante la seguente equazione differenziale:

$$R_{i,\alpha}(t) = \frac{dR_{i,\alpha}}{dt}$$

L'equazione dinamica del rischio è esclusivamente una funzione dei parametri di rischio ed è indipendente dal tipo di sistema in cui si manifesta il rischio. Tuttavia, poiché le proprietà dei parametri possono variare con la posizione e il tempo, l'equazione a sua volta può variare da punto a punto con il tempo. Pertanto, in presenza di un possibile evento incidentale ( $\delta$ ), l'equazione dinamica del rischio può essere scritta mediante la seguente espressione, che indica la conservazione del rischio con il tempo:

$$R_{i,\alpha}(t) = \frac{dR_{i,\alpha}}{dt} = \delta * R_{i,\alpha} = (1 - \alpha) * R_{i,\alpha} \quad [3]$$

ove

$R_{i,\alpha}$  è il rischio variabile;  $\delta$  è il coefficiente del livello di rischio ( $\delta = 1 - \alpha$ ).

La suddetta equazione mostra come il rischio cambia con il tempo.

Definiti:

$R_{i,\alpha}^0$  il rischio iniziale al tempo iniziale ( $t_0$ );

$R_{i,\alpha}$  il rischio al tempo ( $t$ );

e integrando l'equazione [3] tra  $R_{i,\alpha}^0$  e  $R_{i,\alpha}$ ,

$$\int_{R_{i,\alpha}^0}^{R_{i,\alpha}} \frac{dR_{i,\alpha}}{R_{i,\alpha}} = \delta \int_{t_0}^t dt$$

si ottiene,

$$[\ln(R_{i,\alpha})]_{R_{i,\alpha}^0}^{R_{i,\alpha}} = \delta * [t]_{t_0}^t$$

ovvero, risolvendo l'equazione,

$$\ln(R_{i,\alpha}) - \ln(R_{i,\alpha}^0) = \delta * (t - t_0)$$

semplificando e sostituendo  $\delta$  con  $(1 - \alpha)$ ,

$$\ln\left(\frac{R_{i,\alpha}}{R_{i,\alpha}^0}\right) = \delta * t = (1 - \alpha) * (t - t_0)$$

e infine riordinando, si ottiene l'espressione finale dell'equazione dinamica del rischio in funzione del tempo,

$$\left(\frac{R_{i,\alpha}}{R_{i,\alpha}^0}\right) = \exp[(1 - \alpha) * (t - t_0)] = e^{[(1-\alpha)*(t-t_0)]} \quad [4]$$

ovvero,

$$R_{i,\alpha} = R_{i,\alpha}^0 * \exp[(1 - \alpha) * (t - t_0)] = R_{i,\alpha}^0 * e^{[(1-\alpha)*(t-t_0)]}$$

Supponendo che il tempo iniziale è zero ( $t_0 = 0$ ) si ottiene,

$$\left(\frac{R_{i,\alpha}}{R_{i,\alpha}^0}\right) = \exp[(1 - \alpha) * t] = e^{[(1-\alpha)*t]}$$

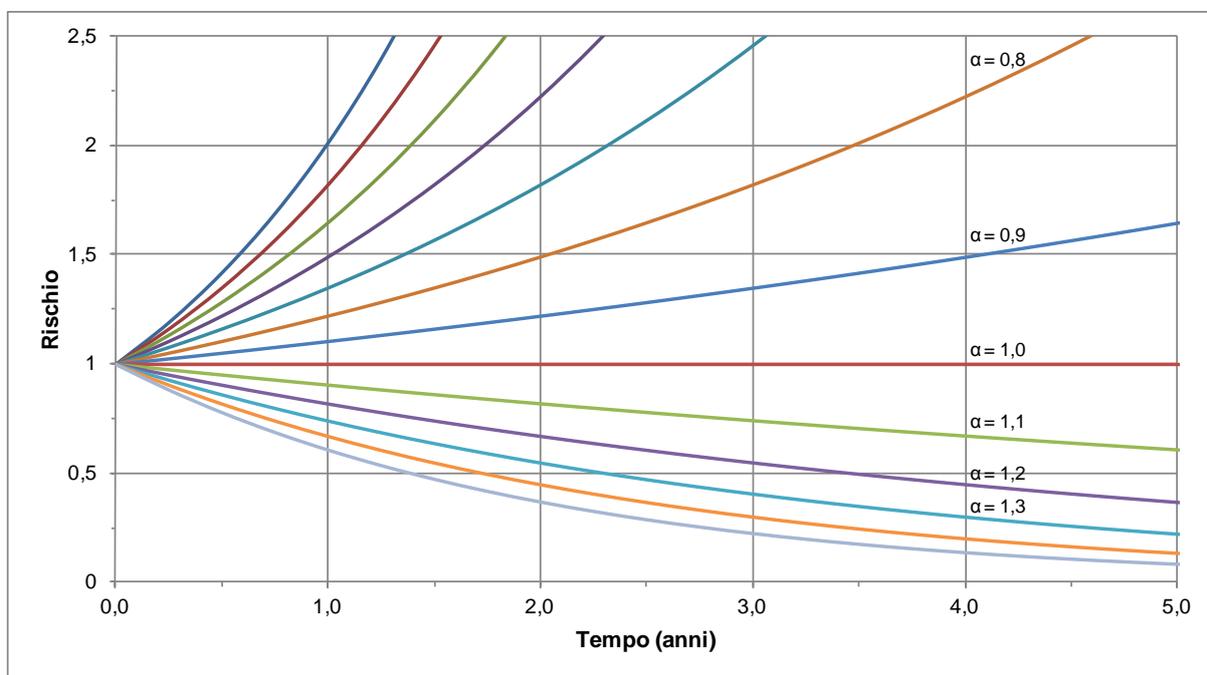
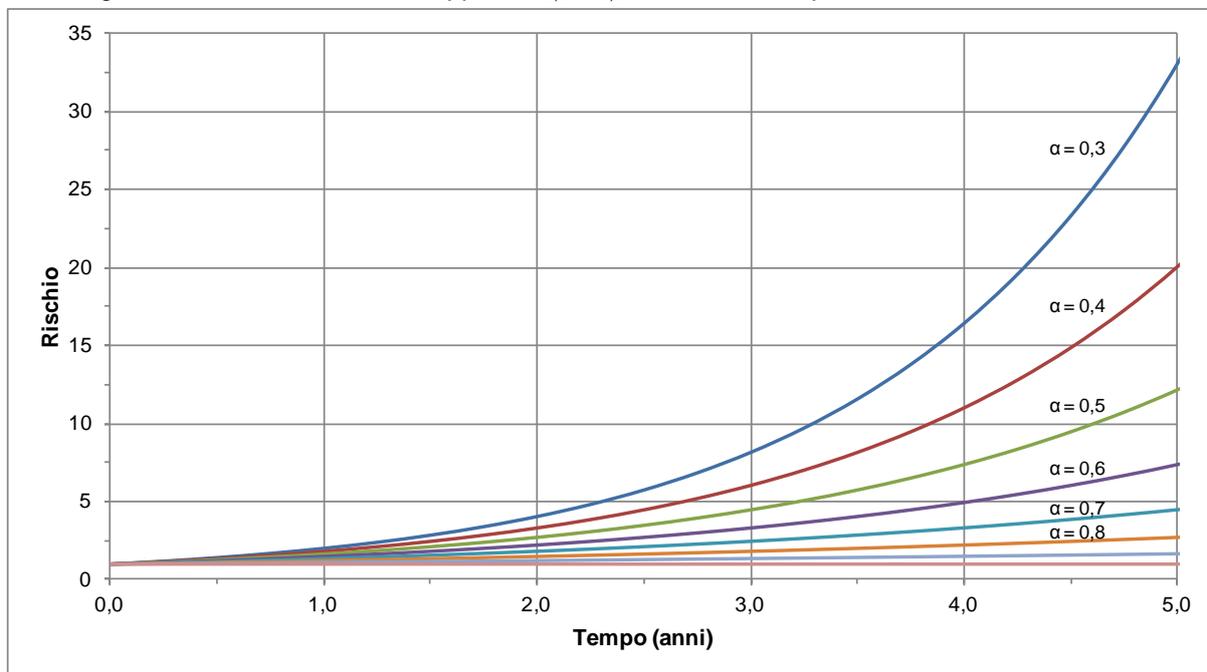
La suddetta espressione dell'equazione dinamica del rischio evidenzia il rapporto tra il rischio in un certo istante di tempo ( $t$ ) e il rischio iniziale ( $t_0$ ).

Posto  $t_0 = 0$  l'equazione dinamica del rischio è rappresentata graficamente nella Figura 2.7 in funzione del tempo ( $t$ ) per differenti valori del coefficiente del livello di sicurezza ( $\alpha$ ) e nella Figura 2.8 in funzione di ( $\alpha$ ) per differenti valori di ( $t$ ).

Semplificando ulteriormente l'equazione si ottiene,

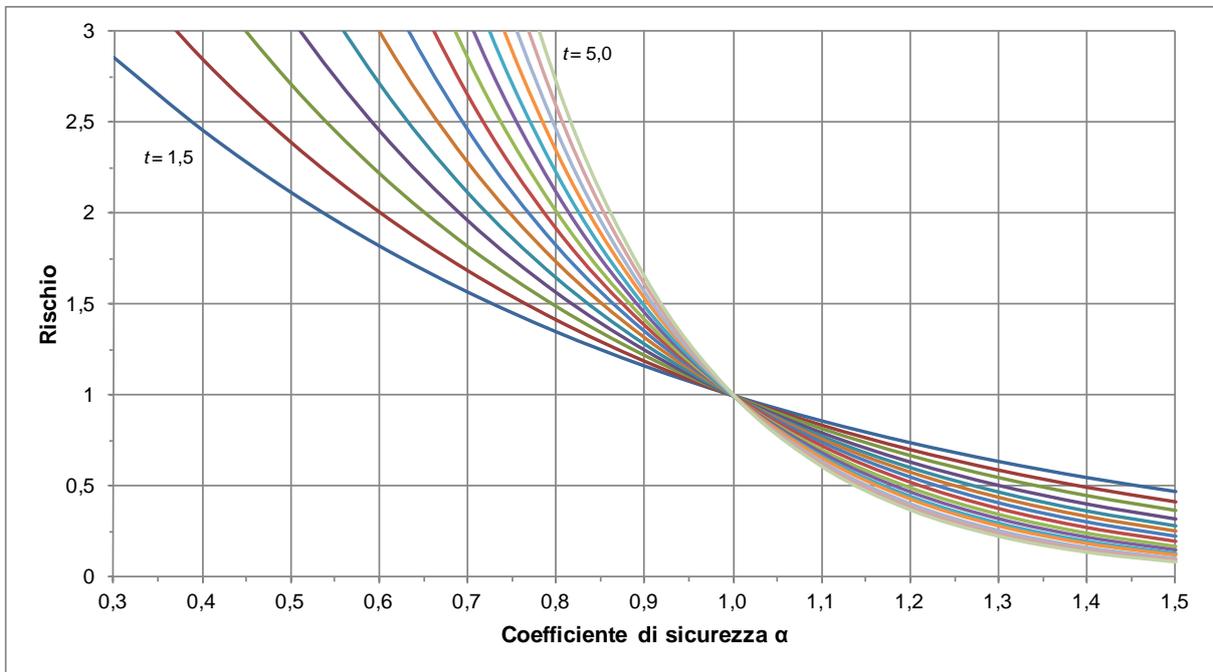
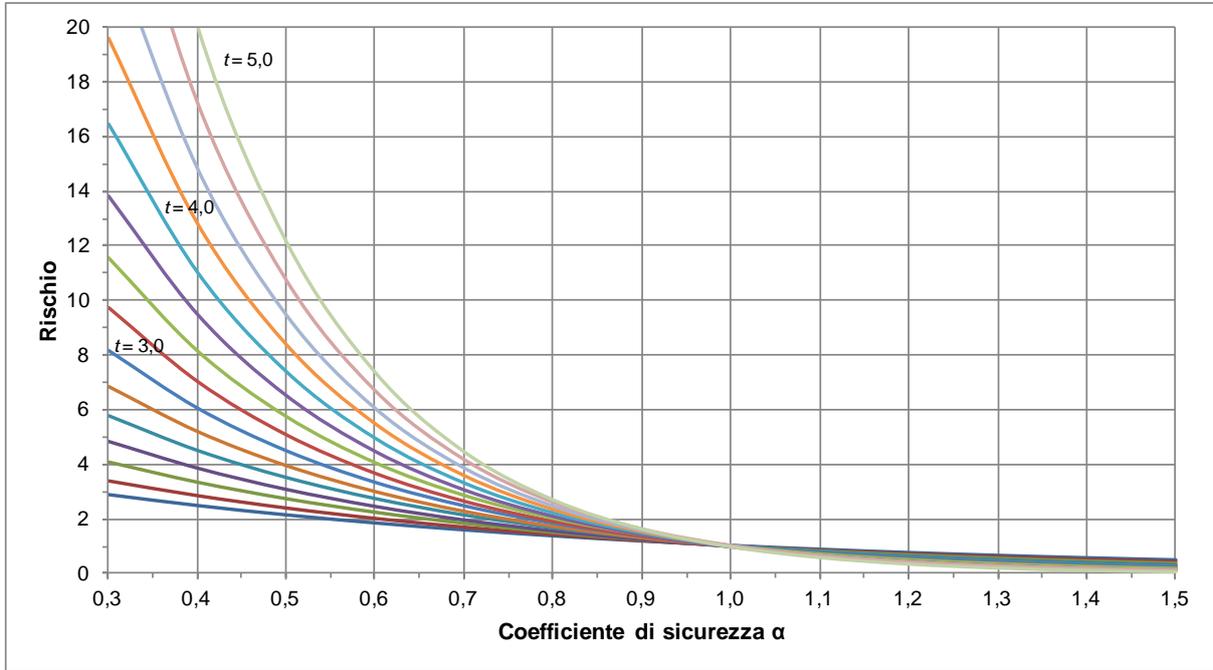
$$R_{i,\alpha} = R_{i,\alpha}^0 * \exp[(1 - \alpha) * t] = R_{i,\alpha}^0 * e^{[(1-\alpha)*t]}$$

Figura 2.7 - Grafico del rapporto  $R_{i,\alpha}/R_{i,\alpha}^0$  in funzione di  $t$  per differenti valori di  $\alpha$ .



Fonte: SANTOS J.L. – Quantitative risk analysis – Theory and model.

Figura 2.8 - Grafico del rapporto  $R_{i,\alpha}/R_{i,\alpha}^0$  in funzione di  $\alpha$  per differenti valori di  $t$ .



Fonte: SANTOS J.L. – Quantitative risk analysis – Theory and model.

Analizzando i grafici è possibile notare che per coefficienti del livello di sicurezza inferiore a 1 ( $\alpha < 1$ ) il rapporto  $R_{i,\alpha}/R_{i,\alpha}^0$  aumenta con il tempo, al contrario, per coefficienti del livello di sicurezza superiore a 1 ( $\alpha > 1$ ) il rapporto  $R_{i,\alpha}/R_{i,\alpha}^0$  diminuisce con il tempo al di sotto dell'unità. Questo significa che i costi impliciti del sistema di sicurezza nei casi di coefficienti del livello di sicurezza superiore all'unità sono inferiori ai casi con coefficienti del livello di sicurezza al di sotto dell'unità.

Volendo determinare il coefficiente del livello di sicurezza ( $\alpha$ ), ipotizzando che siano noti i valori del rischio corrente al tempo  $t$  ( $R_{i,\alpha}$ ) e del rischio iniziale al tempo  $t_0$  ( $R_{i,\alpha}^0$ ), basta risolvere l'equazione dinamica del rischio [4] rispetto alla variabile  $\alpha$ .

La soluzione dell'equazione offre, per un tempo iniziale diverso da zero ( $t = t_0$ ), la seguente espressione per  $\alpha$ :

$$\alpha = 1 - \left( \frac{1}{t - t_0} \right) * \ln \left( \frac{R_{i,\alpha}}{R_{i,\alpha}^0} \right)$$

La stessa espressione, per un tempo iniziale pari a zero ( $t = t_0 = 0$ ), diventa:

$$\alpha = 1 - \left( \frac{1}{t} \right) * \ln \left( \frac{R_{i,\alpha}}{R_{i,\alpha}^0} \right)$$

E' possibile stabilire la relazione tra due rischi diversi con differenti coefficienti del livello di sicurezza. Supposto che il primo rischio sia:

$$(R_{i,\alpha_1})_1 = (R_{i,\alpha_1}^0)_1 * e^{[(1-\alpha_1)*(t-t_0)]}$$

ove  $(R_{i,\alpha_1}^0)_1$  è il rischio iniziale e  $\alpha_1$  è il coefficiente del livello di sicurezza.

Supposto che il secondo rischio sia rappresentato da un'analogia espressione:

$$(R_{i,\alpha_2})_2 = (R_{i,\alpha_2}^0)_2 * e^{[(1-\alpha_2)*(t-t_0)]}$$

ove  $(R_{i,\alpha_2}^0)_2$  è il rischio iniziale e  $\alpha_2$  è il coefficiente del livello di sicurezza.

La relazione tra il primo e il secondo rischio può essere determinata come rapporto tra le equazioni che rappresentano i due rischi:

$$\frac{(R_{i,\alpha_1})_1}{(R_{i,\alpha_2})_2} = \frac{(R_{i,\alpha_1}^0)_1 * e^{[(1-\alpha_1)*(t-t_0)]}}{(R_{i,\alpha_2}^0)_2 * e^{[(1-\alpha_2)*(t-t_0)]}}$$

che vale per ogni istante di tempo ( $t$ ) e un tempo iniziale ( $t_0$ ).

## 2.5 Metodologie e tecniche di analisi dei rischi

L'attività di sicurezza considera non tanto il singolo componente, quanto il sistema integrato in cui l'interazione tra i vari componenti comporta la possibilità che, oltre alle condizioni operative previste, si manifestino condizioni anomale di diversa gravità. Da qui discende la necessità di prendere in considerazione metodologie che trattino eventi nel campo dell'incerto, quindi basate sul calcolo probabilistico.

Lo strumento di cui ci si avvale per valutare il grado di sicurezza di un sistema, è l'*Analisi dei rischi* che viene a configurarsi come uno strumento decisionale dalle cui risultanze si evidenziano eventuali adeguamenti strutturali o gestionali.

L'analisi dei rischi può essere definita come raccolta ed elaborazione sistematica di informazioni, fatta allo scopo di fornire supporto alle decisioni.

Le metodologie e gli strumenti di analisi dei rischi sono numerosi, anche limitando la ricerca a quelli applicabili in ambito ferroviario.

In base al metodo adottato, l'analisi dei rischi può essere distinta nelle seguenti categorie:

- qualitativa;
- quantitativa;
- semi-quantitativa (o semi-qualitativa);
- multicriteria.

Il primo approccio prevede la determinazione del rischio su scala qualitativa (p.e. alto, medio, basso).

Il secondo approccio, invece, riconduce la determinazione a un valore numerico puntuale, spesso inteso come la perdita di vite umane e di danni di natura economica derivanti dal verificarsi del rischio. Si tratta di un approccio più difficile e oneroso del primo perché costringe a censire e a valorizzare le perdite che si avrebbero in caso di incidente.

Il terzo approccio è un compromesso fra i primi due, nel quale la determinazione del rischio è effettuata in termini qualitativi e, successivamente, trasformata in numeri per poterla elaborare attraverso algoritmi di calcolo, come se si trattasse di una valutazione quantitativa.

Il quarto approccio considera contemporaneamente diversi fattori, attraverso la formulazione del problema decisionale in una struttura gerarchica.

Tutte le metodologie e gli strumenti analizzati, sinteticamente riportate nell'Appendice A della Tesi, sono riconducibili ad approcci su scala qualitativa o semi-quantitativa.

Attraverso l'analisi comparata dei concetti che ciascuno di essi utilizza è possibile identificare gli elementi riconosciuti come parte integrante dell'analisi dei rischi e che, quindi, devono essere considerati nel momento in cui si effettua un'analisi dei rischi.

Nella suddetta Appendice A (a cui si rimanda), sono descritti i principali concetti comuni, nonché quelli specifici, così come emersi dall'analisi delle metodologie e degli strumenti di analisi dei rischi a disposizione.

Gli strumenti messi a disposizione dalle metodologie hanno la funzione di guidare gli analisti in ogni stadio del processo, fornendo un collettore per raccogliere, valutare, interpretare le informazioni. Compiere attività quali la modellizzazione, la valutazione delle variabili che contribuiscono al grado di esposizione al rischio, la scelta delle metriche e la stima degli scostamenti rispetto agli obiettivi attesi o sperati, fornendo altresì una rappresentazione sintetica del tutto, richiede senza strumenti uno sforzo non indifferente. Non bisogna tuttavia attendersi da tali strumenti l'impossibile.

È fuor di dubbio che sarebbe interessante conoscere ogni anno quanto accantonare come spesa in sicurezza per i rischi concernenti il sistema ferroviario. Ma per poter ottenere tale risultato si dovrebbero raccogliere le valutazioni dell'impatto dei rischi in termini quantitativi, partendo da una valorizzazione degli asset minacciati (p.e. calcolando il costo di ripristino, la mancanza di produttività del personale, e così via).

Il pericolo di attribuire valutazioni soggettive, ma percepite come oggettive in quanto quantitative, è in questi ambiti concreto e ha evidenti ripercussioni sulla qualità dei risultati ottenibili.

Le metodologie qualitative o semiquantitative hanno il vantaggio di essere snelle e di rappresentare in tempi ragionevoli scenari di rischio di sistemi complessi, senza escludere in linea di principio forme di integrazione con altri risultati.

Per contro la principale limitazione dell'approccio qualitativo e semi-quantitativo è rappresentato dalla necessità di considerare con cautela i risultati di analisi condotte su sistemi diversi o, sullo stesso sistema, in tempi diversi.

Indipendentemente dal tipo di approccio adottato, sia esso qualitativo o quantitativo, bisogna considerare che metodi e strumenti di analisi hanno lo scopo di raccogliere e sistematizzare conoscenze distribuite tra diversi attori.

In generale, le tecniche di analisi dei rischi trovano applicazione nell'ambito dei sistemi complessi. Dallo studio delle metodologie di derivazione affidabilistica è possibile affermare che non è possibile una distinzione precisa tra le metodologie per lo studio del rischio e quelle per lo studio dell'affidabilità<sup>6</sup>, dal momento che:

- rischio potenziale e affidabilità possono essere spesso l'uno causa dell'altro; è evidente, infatti, che un comportamento non affidabile del sistema può provocare non solo danni economici ma anche danni fisici;
- tutte le tecniche di analisi sono estremamente adattabili a ogni scopo (p.e. una FTA può essere implementata sia per investigare le cause di un comportamento fuori progetto del sistema, sia per predisporre le azioni correttive atte a evitare il verificarsi di incidenti).

---

<sup>6</sup> L'affidabilità è una grandezza quantificabile su base probabilistica; può essere valutata già durante la progettazione ed è mantenuta su livelli assegnati durante il funzionamento.

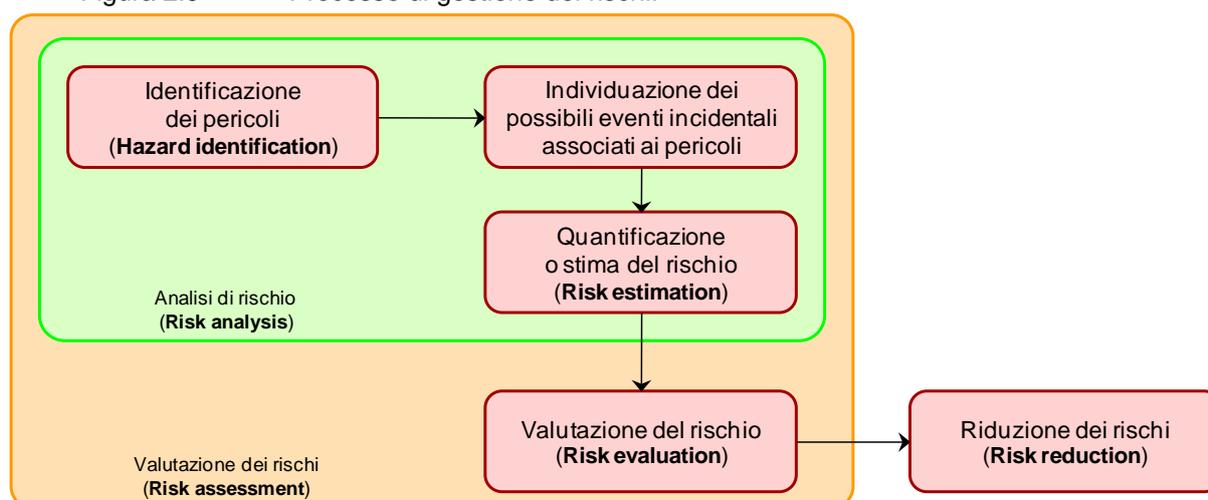
## 2.6 Il processo di gestione dei rischi e lo scenario normativo

Il processo di gestione dei rischi, inteso come valutazione dei rischi, analisi dei rischi, e miglioramento continuo della sicurezza, è un processo complesso che necessita della chiara definizione degli elementi che lo caratterizzano (Massacci, 2008).

L'espressione valutazione dei rischi (*risk assessment*) è utilizzata per indicare sinteticamente un processo che in realtà comprende più fasi distinte (Figura 2.9):

1. identificazione dei pericoli (*hazard identification*);
2. individuazione dei possibili eventi incidentali associati ai suddetti pericoli: talora si tratta di incidenti semplici, tal'altra di scenari incidentali<sup>7</sup> complessi costituiti da più eventi in sequenza;
3. quantificazione o stima del rischio (*risk estimation*), che a sua volta comporta la stima della probabilità di accadimento degli scenari incidentali individuati, la stima della gravità delle conseguenze associate a detti scenari e infine la quantificazione del rischio come combinazione della probabilità e della gravità delle conseguenze;
4. valutazione del rischio in senso stretto (*risk evaluation*), cioè confronto con criteri di accettabilità.

Figura 2.9 - Processo di gestione dei rischi.



Le fasi da 1 a 3 nel loro complesso costituiscono la fase di analisi di rischio (*risk analysis*). Il processo complessivo comprendente l'analisi di rischio e la valutazione di rischio in senso stretto (cioè la *risk analysis* e la *risk evaluation*) è la valutazione dei rischi in senso lato (*risk assessment*), eventualmente seguito dalla riduzione dei rischi (*risk reduction*).

La valutazione dei rischi, quindi, consente di individuare l'ordine gerarchico dei pericoli a seconda della loro dimensione e di assegnare efficientemente le risorse per le misure di sicurezza. La valutazione dei rischi implica l'identificazione di tutti i fattori

<sup>7</sup> Per scenario incidentale o sequenza incidentale si intende un evento o una sequenza di eventi non pianificati che danno luogo a conseguenze indesiderate.

di rischio all'interno del sistema in esame e la quantificazione della loro dimensione, basata sulla combinazione dei due parametri: frequenza (o probabilità) dell'evento e gravità del danno.

A livello normativo, l'eterogeneità delle diverse normative nazionali e dei requisiti in materia di sicurezza hanno spinto il legislatore europeo a formulare un approccio più integrato sulla questione della sicurezza ferroviaria.

Una tra le prime direttive europee a introdurre i concetti sulla sicurezza ferroviaria è stata la Direttiva 2001/14/CE che, nell'ottica di meglio definire le modalità di liberalizzazione del mercato, ha reso obbligatorio il possesso di un Certificato di sicurezza per le imprese ferroviarie.

La problematica è stata ripresa all'interno del "secondo pacchetto ferroviario" che ha dato origine ad una specifica direttiva, la 2004/49/CE recepita in Italia dal D.Lgs. 162/2007.

DIRETTIVA 2004/49/CE e s.m.i.

Per quanto riguarda la valutazione dei rischi connessi all'esercizio ferroviario, la Direttiva 2004/49/CE introduce gli "obiettivi comuni di sicurezza" (CST – *Common Safety Targets*) ovvero i livelli di sicurezza che devono essere raggiunti dalle diverse componenti del sistema ferroviario (p.e. il sistema ferroviario ad Alta Velocità, le gallerie ferroviarie lunghe, ecc.) e dal sistema nel suo complesso, espressi in criteri di accettazione del rischio. Per facilitare la valutazione dei CST, la Direttiva definisce gli "indicatori comuni di sicurezza" (CSI – *Common Safety Indicators*) attraverso i quali gli Stati membri possono acquisire le informazioni utili a un attivo monitoraggio dell'evoluzione della sicurezza. Al fine di valutare il raggiungimento degli obiettivi vengono elaborati "metodi comuni di sicurezza" (CSM – *Common Safety Methods*).

I CST definiscono i livelli minimi di sicurezza espressi in criteri di accettazione del rischio per:

- i rischi individuali a cui sono esposti i passeggeri, il personale (compreso quello delle imprese appaltatrici), gli utenti dei passaggi a livello e altri, e, fatte salve le vigenti norme nazionali e internazionali in materia di responsabilità, i rischi individuali cui sono esposte le persone non autorizzate presenti negli impianti ferroviari;
- i rischi per la società.

I CSI<sup>8</sup> consentono il monitoraggio dei CST adottando parametri misurabili per:

- gli incidenti;
- gli inconvenienti e "quasi incidenti";
- le conseguenze di incidenti;
- la sicurezza tecnica dell'infrastruttura e della sua realizzazione;
- la gestione della sicurezza.

---

<sup>8</sup> La Direttiva 2009/149/CE del 27 novembre 2009 modifica la 2004/49/CE per quanto riguarda gli indicatori comuni di sicurezza e i metodi comuni di calcolo dei costi connessi agli incidenti.

I CSM descrivono come sono valutati il livello di sicurezza, la realizzazione degli obiettivi e la conformità con gli altri requisiti in materia di sicurezza, elaborando e definendo:

- metodi di valutazione del rischio;
- metodi atti a verificare che i sottosistemi strutturali dei sistemi ferroviari trans-europei, convenzionale e Alta Velocità, siano gestiti e mantenuti conformemente ai requisiti essenziali loro applicabili.

La 2004/49/CE impone che elementi essenziali del Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS) siano le indicazioni di “*procedure e metodi da applicare nella valutazione del rischio e nell’attuazione delle misure di controllo del rischio ogniqualvolta un cambiamento nelle condizioni di esercizio o l’impiego di nuovo materiale comporti nuovi rischi per l’infrastruttura o per le operazioni*” (Allegato III – Paragrafo 2, lettera d).

Al fine di garantire che il sistema ferroviario applichi gli elementi pertinenti dei CSM, attui i CST, sia conforme alle norme di sicurezza, i gestori dell’infrastruttura e le imprese ferroviarie devono, quindi, elaborare un proprio SGS così come stabilito anche nell’Art. 13 e dettagliato nell’Allegato III del D.Lgs. 162/2007.

#### REGOLAMENTO (CE) N. 352/2009

Lo scopo del Regolamento è istituire un CSM per la determinazione e la valutazione dei rischi ai sensi dell’Art. 6, paragrafo 3, lettera a) della Direttiva 2004/49/CE. Il processo di gestione dei rischi si articola in tre fasi principali (Figura 2.10).

Le tre fasi schematizzano i processi di:

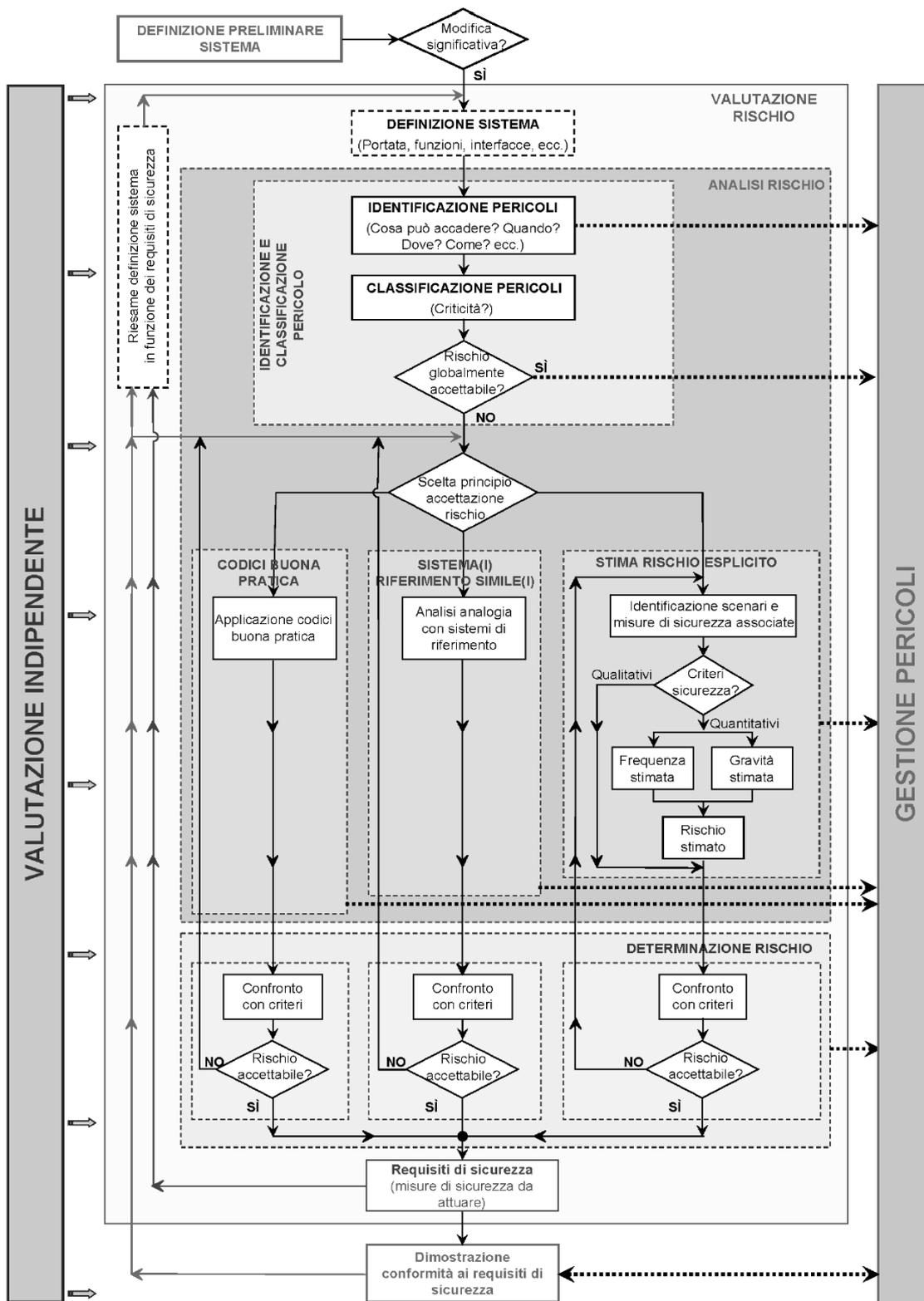
1. individuazione sistematica degli eventi pericolosi, sulla base della definizione del sistema da valutare, delle corrispondenti misure di sicurezza e dei requisiti di sicurezza derivanti;
2. analisi e determinazione dei rischi;
3. dimostrazione della conformità del sistema ai requisiti di sicurezza individuati.

Gli eventi pericolosi vengono individuati da un gruppo di esperti e inseriti in apposito registro detto “Registro degli eventi pericolosi”. La classificazione degli eventi pericolosi va effettuata in funzione dei rischi stimati da essi derivanti, al fine di focalizzare la valutazione dei rischi su quelli principali.

Per tale valutazione il CSM individua tre criteri di accettazione dei rischi da applicare durante la fase di analisi e determinazione degli stessi:

1. applicazione di *codici di buona pratica* (conformità alle Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI), alle norme nazionali e a quelle europee);
2. *confronto con sistemi analoghi* (uniformità tra il livello di sicurezza del sistema di riferimento e il sistema da valutare; gli elementi per i quali ciò non è verificato richiedono l’individuazione di ulteriori misure di sicurezza, applicando uno degli altri due criteri di accettazione dei rischi);
3. *stima accurata dei rischi* (stima dei rischi derivanti da eventi pericolosi sotto un profilo quantitativo o qualitativo).

Figura 2.10 - Procedimento di gestione dei rischi.



Fonte: Regolamento (CE) N. 352/2009.

## CENELEC EN 50126

La CENELEC EN-50126 riguarda le specifiche e la ratifica delle caratteristiche del sistema (RAMS) in tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto. RAMS è l'acronimo di:

- Reliability (Affidabilità);
- Availability (Disponibilità);
- Maintainability (Manutenibilità);
- Safety (Sicurezza).

In particolare, per quanto riguarda le specifiche sui Sistemi di Gestione della Sicurezza (SGS), la norma afferma che devono esistere procedure, processi e documenti fondamentali che l'operatore deve adottare e aggiornare per realizzare un SGS. Vengono quindi descritti tutti gli elementi chiave necessari per la creazione di un SGS; dalla politica di sicurezza, piani della sicurezza, registri dei rischi, verifiche interne, relazioni sui guasti, fino al processo di gestione dei rischi.

Nello specifico, è compito dell'operatore eseguire le analisi di rischio attraverso la definizione dei requisiti funzionali del sistema, l'identificazione degli eventi pericolosi e l'analisi delle conseguenze derivanti, così da assicurare che il rischio risultante sia tollerabile.

L'analisi del rischio deve essere svolta e documentata. Per ciascuna delle diverse fasi del ciclo di vita del sistema, la documentazione deve contenere:

- la metodologia dell'analisi;
- le ipotesi, le limitazioni e le giustificazioni della metodologia;
- i risultati dell'identificazione della situazione pericolosa;
- i risultati della stima del rischio e loro livelli di confidenza;
- i risultati degli studi di compromesso;
- i dati, le relative fonti e i livelli di confidenza;
- i riferimenti.

Le categorie della frequenza di accadimento di una situazione pericolosa e la loro descrizione in termini qualitativi, sono di seguito riportate:

1. *frequente*, probabile che accada frequentemente. La situazione pericolosa si presenterà continuamente;
2. *probabile*, accadrà parecchie volte. Ci si può aspettare che la situazione pericolosa si presenti spesso;
3. *occasionale*, probabile che accada parecchie volte. Ci si può aspettare che la situazione pericolosa si presenti parecchie volte;
4. *remoto*, probabile che accada qualche volta nella vita del sistema. Ci si può ragionevolmente aspettare che la situazione pericolosa si presenti;
5. *improbabile*, improbabile che accada ma possibile. Si può assumere che la situazione pericolosa possa presentarsi eccezionalmente;
6. *inverosimile*, estremamente improbabile che accada. Si può assumere che la situazione pericolosa possa non presentarsi.

Con riferimento ai casi specifici, le categorie, il loro numero e le scale numeriche da applicarsi, devono essere definite dall'Autorità ferroviaria. Per la stima dell'impatto probabile va adottata l'analisi delle conseguenze.

I livelli di gravità delle conseguenze e la loro descrizione in termini di danno alle persone, al sistema, all'ambiente e al servizio, sono di seguito riportati:

1. *catastrofico*, morti e/o parecchie persone gravemente ferite e/o danni maggiori all'ambiente;
2. *critico*, morte di una persona e/o lesione grave di una persona e/o importante danno all'ambiente; perdita di un sistema principale per quanto riguarda il servizio;
3. *marginale*, ferite leggere e/o importante minaccia per l'ambiente; danno grave al/ai sistema/i per quanto concerne il servizio;
4. *insignificante*, possibile ferita leggera; danno leggero al sistema per quanto riguarda il servizio.

Con riferimento ai casi specifici, i livelli, il loro numero e le relative conseguenze da applicarsi, devono essere definiti dall'Autorità Ferroviaria.

Per la valutazione dei risultati dell'analisi del rischio, dell'assegnazione della categoria al rischio, delle azioni per la riduzione del rischio o l'eliminazione di rischi intollerabili e per l'accettazione del rischio deve essere costruita una matrice "frequenza – conseguenze" (Tabella 2.3). Tale matrice permette di valutare il livello di rischio attraverso la combinazione della frequenza di accadimento della situazione pericolosa con la gravità delle conseguenze da essa generate.

Tabella 2.3 - Matrice frequenza – conseguenze o Matrice dei rischi.

FREQUENZA DI ACCADIMENTO DI UNA SITUAZIONE PERICOLOSA	LIVELLI DI RISCHIO			
	FREQUENTE	INDESIDERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE
PROBABILE	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE
OCCASIONALE	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE
REMOTO	TRASCURABILE	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE
IMPROBABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE
INVEROSIMILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE
	INSIGNIFICANTE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
	LIVELLI DI GRAVITA' DELLE CONSEGUENZE DELLA SITUAZIONE PERICOLOSA			

Fonte: CENELEC EN 50126.

Le categorie qualitative del rischio e le relative azioni da mettere in atto, sono:

- *intollerabile*, deve essere eliminato;
- *indesiderabile*, deve essere accettato solo quando la riduzione del rischio è impraticabile e con l'accordo dell'Autorità Ferroviaria;
- *tollerabile*, accettabile con controllo adeguato e accordo della stessa Autorità;
- *trascurabile*, accettabile senza alcun accordo.

L'Autorità Ferroviaria, quindi, è responsabile della definizione del principio da adottare, del livello di tollerabilità di un rischio e dei livelli che cadono nelle differenti categorie di rischio.

I concetti contenuti nella CENELEC EN 50126 (categorie della frequenza di accadimento di una situazione pericolosa, livelli di gravità delle conseguenze della situazione pericolosa, livelli di rischio e azioni da mettere in atto per ciascuno di essi, nonché matrice "frequenza – conseguenze") sono state ripresi dalla Disposizione n. 13/2001 della Divisione Infrastruttura delle Ferrovie dello Stato (attuale RFI) del 26/06/2001 "Requisiti per l'adozione, da parte delle Imprese Ferroviarie e della Divisione Infrastruttura, di un sistema di gestione della sicurezza – Safety Management System" e s.m.i.

DISPOSIZIONE N.13/2001 di RFI e s.m.i.

Lo scopo della Disposizione 13/2001 è quello di fornire le linee guida per la definizione, ai fini della sicurezza, dell'organizzazione interna di un'impresa ferroviaria che richiede il rilascio del Certificato di sicurezza.

Nel paragrafo 4.6 "Identificazione dei pericoli e minimizzazione dei rischi", sono contenuti un primo processo di individuazione dei pericoli e valutazione dei rischi e un secondo processo riguardante le azioni per la minimizzazione dei rischi.

Il primo processo richiede la documentazione di un approccio sistematico costituito da un'identificazione dei pericoli, una stima dei rischi e una classificazione di quest'ultimi, definendo, inoltre, la documentazione relativa all'analisi dei rischi, la frequenza di aggiornamento di tali analisi e i riesami periodici.

Per l'identificazione dei pericoli, la Disposizione 13/2001 indica le aree, le attività e i soggetti, per i quali è necessario individuare i pericoli che ne possono derivare. Nel caso di modalità operative consolidate le aree soggette al processo di valutazione dei rischi saranno identificate esaminando le indagini su incidenti e pericoli, la raccolta e l'analisi dei dati relativi alle prestazioni di sicurezza, le verifiche e gli audit.

Per la valutazione dei rischi, è stabilito che l'applicazione delle metodologie analitiche va fatta preventivamente nei casi di introduzione di nuove apparecchiature, sistemi e procedure.

Per la stima dei rischi si possono utilizzare i dati disponibili relativi a prestazioni di sicurezza e incidenti al fine di stimare la gravità e la frequenza di accadimento dei pericoli.

Per la stima della gravità e della probabilità di accadimento di un pericolo, la Disposizione 13/2001 riprende la valutazione secondo i livelli definiti dalla CENELEC EN 50126.

L'ultima fase dell'approccio sistematico è la classificazione del livello di rischio attraverso un processo di valutazione della significatività di quest'ultimo, così da individuare il rischio da considerare "trascurabile", "tollerabile", "indesiderabile" o

“intollerabile”. Una metodologia per tale classificazione può essere la risoluzione della Matrice dei rischi basata sulla gravità e la frequenza di accadimento degli eventi pericolosi considerati. Anche per tale fase la Disposizione riprende, per l’identificazione dei livelli di rischio, la matrice “frequenza – conseguenze” definita dalla CENELEC EN 50126.

Per quanto riguarda le azioni per la minimizzazione dei rischi, la Disposizione 13/2001 definisce le strategie per ricondurre il rischio classificato come “intollerabile”, “indesiderabile” e “tollerabile” alla categoria “trascurabile”. Strategie che possono focalizzarsi sull’eliminazione della situazione, della sostanza, della condizione o dell’attività che genera il rischio; sulla riduzione della probabilità di accadimento dell’evento pericoloso; sulla riduzione della gravità delle conseguenze.

Successive modifiche sono state apportate alla Disposizione 13/2001, dalle:

- Disposizione n. 15/2004 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 19/04/2004 “Modifiche alla Disposizione del Gestore dell’Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001”;
- Disposizione n. 51/2007 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 12/11/2007 “Modifiche alla Disposizione del Gestore dell’Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001 e successive modifiche”.

La Disposizione 15/2004 stabilisce che l’analisi di rischio deve dimostrare che per ogni pericolo individuato (hazard) siano state definite le misure e le cautele suggerite dalla tecnica e dalla pratica al fine di minimizzare il rischio di incorrere in eventi incidentali e relative conseguenze. Tale minimizzazione ha lo scopo di rendere trascurabile il rischio residuo dell’esercizio ferroviario.

La Disposizione 15/2004 definisce, inoltre, quando:

- il livello di rischio può essere definito “trascurabile”;
- la categoria della frequenza di accadimento può definirsi “inverosimile”;
- il livello di gravità delle conseguenze può definirsi “catastrofico”;

definizioni riprese e in parte modificate dalla successiva Disposizione 51/2007.

Per quanto riguarda la matrice dei rischi, la Disposizione apporta alcune modifiche ai livelli di rischio, come riportato nella Tabella 2.4.

In particolare, è stabilito che alle caselle contrassegnate con la lettera “X” possa essere attribuito uno dei livelli di rischio previsti dalla CENELEC EN 50126, ad eccezione del livello “trascurabile” che può essere attribuito solo alle caselle recanti la dicitura TRASCURABILE.

Infine, la Disposizione stabilisce che il rischio residuo è accettabile quando è classificato come “trascurabile”, o quando si dimostra di aver adottato tutte le misure e le cautele suggerite dalla tecnica e dalla pratica, atte ad evitare sinistri.

Le modifiche apportate dalla Disposizione 51/2007 riguardano, in particolare, le definizioni di trascurabilità e tollerabilità del rischio residuo.

E' "trascurabile" il rischio residuo connesso ad una categoria della frequenza di accadimento che sia:

- "inverosimile" e ne possa derivare un livello di gravità delle conseguenze classificato al più come "critico";
- "improbabile" e ne possa derivare un livello di gravità delle conseguenze classificato come "insignificante";

mentre è "tollerabile" se connesso ad una categoria della frequenza di accadimento:

- "inverosimile" con un livello di gravità delle conseguenze classificato come "catastrofico";
- "improbabile" con un livello di gravità delle conseguenze classificato come "marginale" o al più "critico";
- "remoto" con un livello di gravità delle conseguenze classificato come "insignificante".

I concetti contenuti nella CENELEC EN 50126 (categorie della frequenza di accadimento di una situazione pericolosa, livelli di gravità delle conseguenze della situazione pericolosa, livelli di rischio e azioni da mettere in atto per ciascuno di essi, nonché matrice "frequenza – conseguenze") sono ripresi dalla Disposizione 51/2007 apportando modifiche alla definizione di categoria della frequenza di accadimento "inverosimile" e alle definizioni dei livelli di gravità delle conseguenze.

Per quanto riguarda la matrice dei rischi, la Disposizione apporta alcune modifiche ai livelli di rischio, come riportato nella Tabella 2.5.

In particolare, è stabilito che alle caselle contrassegnate con la lettera "X" possa essere attribuito uno dei livelli di rischio previsti dalla CENELEC EN 50126 a eccezione dei livelli "trascurabile" e "tollerabile", che può essere attribuito solo alle caselle recanti la dicitura rispettivamente "TRASCURABILE" e "TOLLERABILE".

Tabella 2.4 - Matrice dei rischi definita dalla Disposizione n. 15/2004 di RFI.

PROBABILITA'	LIVELLI DI RISCHIO			
	FREQUENTE	X	X	X
PROBABILE	X	X	X	X
OCCASIONALE	X	X	X	X
REMOTO	X	X	X	X
IMPROBABILE	X	X	X	X
INVEROSIMILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	X
	INSIGNIFICANTE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
	GRAVITA'			

Fonte: Disposizione n. 15/2004 di RFI del 19/04/2004.

Tabella 2.5 - Matrice dei rischi definita dalla Disposizione n. 51/2007 di RFI.

PROBABILITA' O FREQUENZA	LIVELLI DI RISCHIO			
	FREQUENTE	X	X	X
PROBABILE	X	X	X	X
OCCASIONALE	X	X	X	X
REMOTO	TOLLERABILE	X	X	X
IMPROBABILE	TRASCURABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE	X
INVEROSIMILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TOLLERABILE
	INSIGNIFICANTE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
	GRAVITA'			

Fonte: Disposizione n. 51/2007 di RFI del 12/11/2007.

### 3. La capacità dell'infrastruttura ferroviaria

Con il termine “capacità” si intende il massimo numero di treni che può impegnare una determinata infrastruttura ferroviaria (p.e. tratto di linea, stazione, nodo ferroviario, impianto di smistamento, ecc.) in uno specifico intervallo di tempo (p.e. giorno, ora), fissato un determinato livello di servizio. L'infrastruttura individua, dunque, una capacità massima di traffico sostenibile nell'unità di tempo, superata la quale la circolazione ferroviaria si satura.

#### 3.1 Generalità

La capacità dell'infrastruttura ferroviaria è uno dei fattori fondamentali che qualifica le prestazioni di un sistema ferroviario. Essa è condizionata non solo da parametri tecnici, quali l'andamento plano-altimetrico, la velocità di linea, l'armamento, i sistemi di segnalamento e sicurezza, le interferenze d'itinerari, ma anche dal tipo di modello di esercizio scelto (eterogeneità dei servizi, ordine di successione dei treni e loro tipologia e prestazione) nonché dalla qualità del servizio che si vuole garantire (puntualità, velocità commerciale, cadenzamento).

La Fiche UIC 406 R al § 1.2 afferma che “*Capacity as such does not exist. Railway infrastructure capacity depends on the way it is utilised*”, ovvero la capacità di una infrastruttura ferroviaria, di per sé, non esiste perché dipende da come la si utilizza<sup>9</sup>. Risulta quindi evidente che soltanto dopo aver definito il programma d'esercizio è possibile comprendere il valore della capacità.

Il modello di esercizio “programmato” stabilisce la suddivisione dei servizi, il tipo di servizio commerciale, le caratteristiche prestazionali del materiale rotabile, il percorso del treno, le fermate, la successione dei diversi tipi di tracce orarie. Inoltre, determina l'assegnazione dei binari e degli itinerari nonché le periodicità e le soppressioni in specifici giorni dell'anno.

La circolazione “effettiva” può subire, talvolta, dei cambiamenti più o meno consistenti a causa dell'inserimento, della cancellazione o della sostituzione di alcuni servizi. L'offerta dei servizi dipende dalle caratteristiche infrastrutturali (le caratteristiche geometriche dell'infrastruttura influiscono sulla possibilità di effettuare determinati servizi) e dalla gestione dell'esercizio (le caratteristiche prestazionali possono rappresentare un limite per l'entità dei flussi). La conoscenza del modo in cui le suddette caratteristiche interagiscono fra loro è importante ai fini della progettazione dell'infrastruttura e della programmazione del modello di esercizio.

---

<sup>9</sup> “... attribuire ad una linea o ad un impianto ferroviario una potenzialità di  $x$  treni al giorno o all'ora equivale ad affermare che un tubo di assegnata lunghezza e diametro ha una certa portata di fluido. Nessuno farebbe un'affermazione del genere se non associando al tubo una prevalenza al suo inizio, le caratteristiche del fluido, la legge delle perdite di carico in funzione della velocità e la prevalenza residua di cui si deve disporre all'altro capo. In questo senso appare molto opportuno rinunciare all'uso del termine di potenzialità ed impiegare al suo posto quello di verifiche di circolazione ...” [Corazza G.R., Musso A. – *La circolazione ferroviaria e gli impianti di stazione. Lo stato dell'arte della metodologia per la verifica* – Ingegneria Ferroviaria, Luglio-Agosto 1991].

Dal punto di vista funzionale, ogni sistema ferroviario è costituito da tre elementi fondamentali (Florio, 1995):

- linee;
- nodi;
- binari di stazione.

La capacità di una linea è condizionata:

- dalla combinazione dei treni che compongono il traffico totale (treni lenti e treni veloci) (Bianchi, 1967; Bonora e Giuliani, 1982);
- dal distanziamento<sup>10</sup> minimo in linea tra i treni (Mayer, 1978; Delfino e Galaverna, 2003);
- da quei fattori che possono influenzare la marcia del treno (Piciocchi, 1981).

E' evidente che una stessa linea ha valori di capacità differenti in base alla combinazione di treni che compongono il traffico. Infatti, si hanno valori alti in presenza di bassi range di disomogeneità della velocità e valori bassi in presenza di forte eterotachicità. Questa osservazione vale sia riferita all'intera giornata ma ancor di più a porzioni di essa. In presenza di un regime di circolazione eterotachico, i treni viaggiando a diverse velocità, condizionano fortemente la capacità della linea (numero di treni che possono circolare nell'unità di tempo). Infatti, la presenza di un mix tra treni veloci e treni lenti porta alla necessità di effettuare "sorpassi" dei primi sui secondi, gestendo la circolazione ferroviaria attraverso l'adozione delle cosiddette "precedenze". Poiché, nella generalità dei casi, le precedenze fra treni vengono effettuate nelle stazioni piuttosto che in piena linea, la conseguenza più immediata di tale gestione è la riduzione della velocità commerciale dei treni più lenti ovvero dei treni merci.

La tipologia del distanziamento e la velocità di impostazione della linea condizionano la capacità di circolazione e la rendono suscettibile alle variazioni del modello di esercizio (Mayer, 1978; Corriere, 1984).

Il distanziamento minimo realizzabile in una linea con sistema di blocco fisso è funzione del *tempo di occupazione* del treno, che indica il tempo in cui una parte di binario, di solito una sezione di blocco, è occupata da un treno e quindi interdetta a qualsiasi altro convoglio. Tale tempo termina con la liberazione da parte della coda del treno del segnale a monte della sezione occupata, più un margine di tempo accessorio necessario per la predisposizione, da parte degli apparati di controllo e sicurezza, della libertà della sezione.

Il tempo di occupazione è più lungo del tempo di percorrenza della sezione da parte di un treno ed è composto da più parti, che sono (Figura 3.1):

- *tempo di formazione dell'itinerario*;
- *tempo di avvistamento*, da parte del macchinista, del segnale di avviso, dove presente;

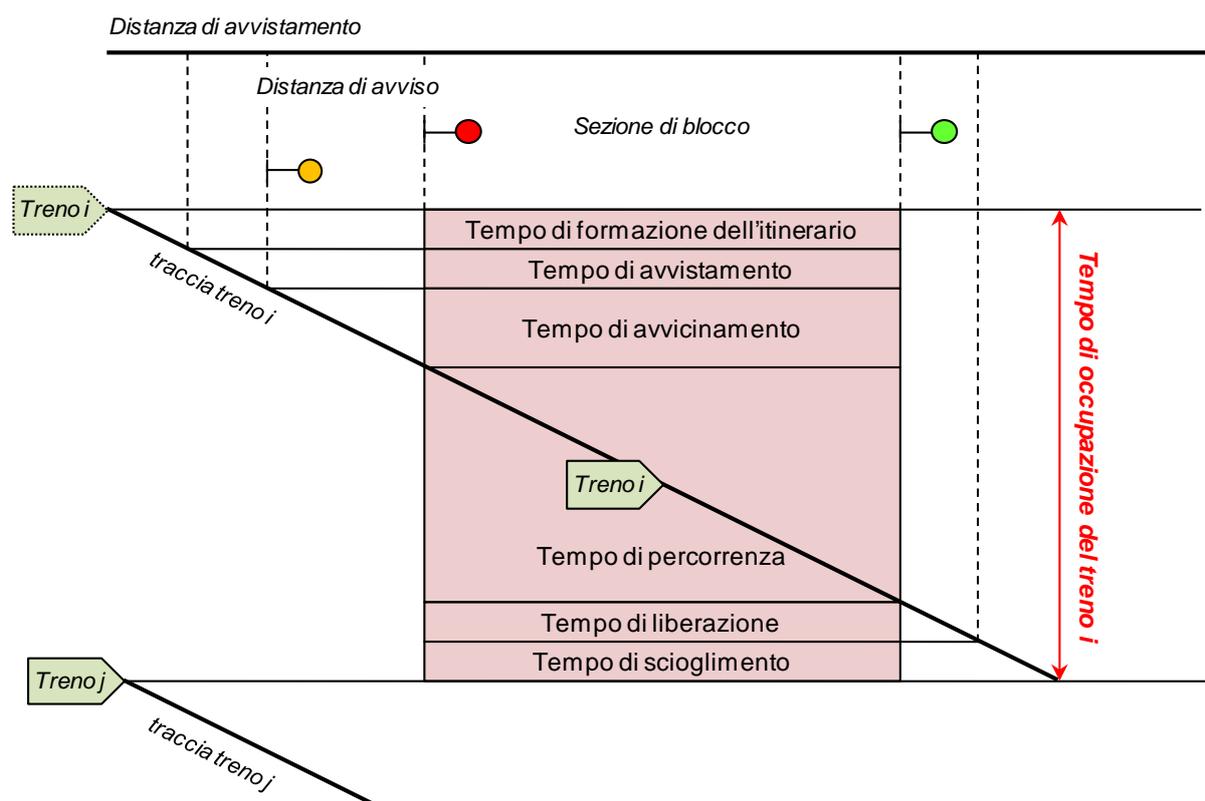
---

<sup>10</sup> Per *distanziamento* si intende il tempo che intercorre tra il passaggio di due treni successivi in uno stesso punto di una stessa linea. Può essere espresso come il tempo intercorso tra le partenze o tra gli arrivi di due treni.

- *tempo di avvicinamento*, ovvero tempo di percorrenza tra il segnale di avviso e il segnale di inizio della sezione di blocco;
- *tempo di percorrenza* della sezione di blocco;
- *tempo di liberazione* della sezione di blocco;
- *tempo di scioglimento* o riassetto delle apparecchiature.

Nei casi in cui si disponga di ripetizione dei segnali in linea, il tempo di avvicinamento è quello relativo alla distanza di frenatura, segnalata dal sistema stesso.

Figura 3.1 - Rappresentazione schematica del tempo di occupazione.



Fonte: In Longo G. – Un approccio per determinare il trade-off tra infrastruttura ed esercizio – MobilityLab, 2007.

Al distanziamento minimo realizzabile può essere aggiunto un *tempo cuscinetto* (*buffer time*) al fine di recuperare piccoli ritardi ed è la più piccola differenza di tempo tra due diagrammi di marcia di due treni. È differente dal tempo di recupero: quest'ultimo serve a ridurre gli eventuali ritardi maturati dal treno andando ad incrementare il tempo di percorrenza, il tempo cuscinetto serve invece a prevenire la trasmissione tra i treni di eventuali ritardi andando a ridurre il numero di tracce che possono essere inseriti.

Su linee con traffico misto, il distanziamento minimo dipende significativamente dalla differenza tra le velocità dei vari treni, mentre nel caso di circolazione omotachica, la sezione di blocco critica è di solito quella che include la fermata in stazione in quanto la sosta incrementa il tempo totale di occupazione della sezione che la include.

Nelle linee con sezioni di blocco mobile, la lunghezza delle sezioni è nulla, con conseguente annullamento del tempo di percorrenza tra i segnali ma non dei restanti tempi componenti il tempo di occupazione che, in alcuni casi, sono molto più estesi del tempo di percorrenza vero e proprio.

La capacità della linea è limitata, oltre che dalla tipologia di distanziamento, anche dalla distanza tra gli impianti di provenienza e di destinazione di un treno e dalla eventuale presenza di Posti di Movimento (PM).

La capacità di una stazione (nodo) è condizionata (Corazza e Florio, 1979; Florio e Malavasi, 1984; Florio, 1992):

- dalla configurazione topologica (Corazza e Musso, 1987);
- dal modello dell'offerta che scandisce i tempi di sosta (Giuliani, Malavasi e Ricci, 1989);
- dalla tecnologia dell'apparato centrale che controlla l'impianto.

Nella configurazione del piano del ferro, giocano un ruolo preminente la posizione dei binari di stazionamento (p.e. la dislocazione in fasci indipendenti permette la riduzione delle incompatibilità) e la presenza di incroci con linee principali. Il modello dell'offerta, ovvero il modo in cui viene gestita la circolazione all'interno dell'impianto condiziona le prestazioni del nodo. Poiché, nella realtà, i treni viaggiano in regime eterotachico ciò determina una diminuzione della capacità teorica anche quando l'esercizio è privo di conflittualità. Infine, anche il tipo di apparato centrale che governa la circolazione dei treni all'interno dell'impianto può ricoprire un ruolo preponderante per la capacità poiché permette la riduzione dei tempi di formazione e di distruzione dell'itinerario.

Per quanto concerne i *grandi nodi ferroviari*, intesi come insiemi di impianti ferroviari interconnessi da varie linee, parlare della capacità di un solo elemento (linea o impianto) è riduttivo poiché si corre il rischio di valutare l'intero sistema attraverso valori non compatibili con la capacità del più generale insieme. E' importante, quindi, capire da cosa dipende la capacità complessiva del sistema ferroviario.

In base a quanto detto per le linee e per i nodi, è possibile dedurre alcune considerazioni sulla capacità dei grandi nodi ferroviari (Florio, 1995):

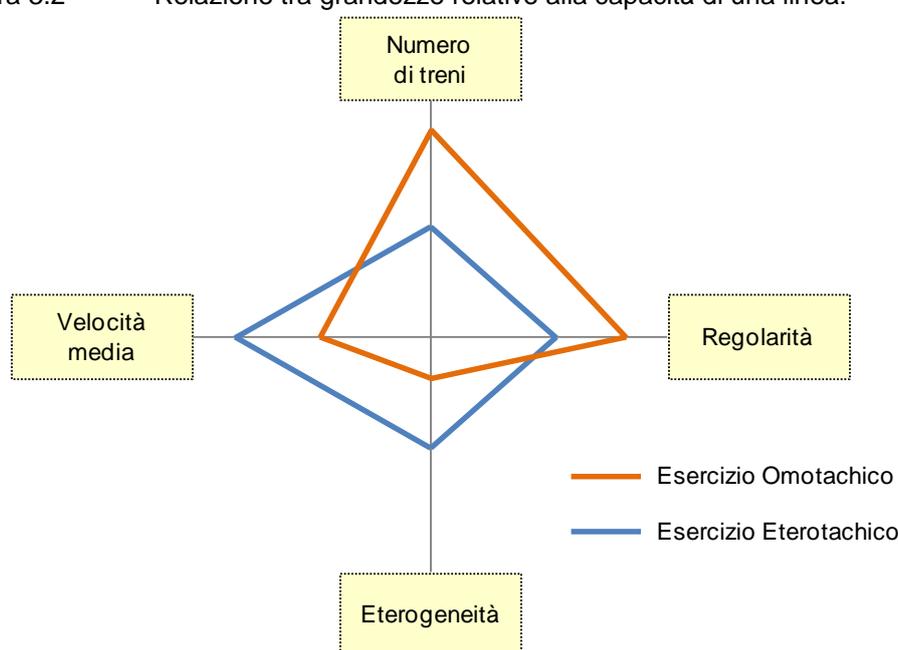
- è funzione della composizione del traffico ed è condizionata dalle regole di precedenza tra treni di diversa categoria;
- è determinata dall'intervallo temporale di riferimento;
- è influenzata dai ritardi dei treni;
- è in relazione ai possibili criteri di ottimo e al rispetto delle condizioni di vincolo imposte a priori (p.e. massimizzazione del numero dei treni nel complesso, minimizzazione dei ritardi, massimizzazione dell'occupazione dei binari di circolazione, ecc.).

Per quanto detto finora, le caratteristiche infrastrutturali e la corrispondente gestione dell'esercizio incidono sulla capacità e sulla qualità del servizio. La qualità del servizio può essere analizzata da diversi punti di vista. E' possibile considerare il livello di puntualità oppure il livello di stabilità dell'offerta, intesa come la tendenza a

ridurre le perturbazioni che interessano l'impianto anche se non sono originate da esso (i ritardi possono essere generati nella linea o nell'impianto).

La Fiche UIC 406 R al § 1.2 definisce le relazioni tra i principali parametri (*Capacity balance*) che concorrono alla capacità di un'infrastruttura. Nella Figura 3.2 è schematizzato un sistema di assi cartesiani a cui sono assegnati quattro grandezze diverse: Numero di treni (*Number of trains*); Velocità media (*Average speed*); Eterogeneità (*Heterogeneity*); Regolarità (*Stability*). La lunghezza della corda che collega i valori di tali grandezze rappresenta la capacità, il cui utilizzo è definito dalla posizione della corda sugli assi tale che a un aumento/diminuzione della capacità corrisponde proporzionalmente un aumento/diminuzione della lunghezza della corda.

Figura 3.2 - Relazione tra grandezze relative alla capacità di una linea.



Fonte: Fiche UIC 406 R.

Il migliore sfruttamento della capacità viene raggiunta nel caso in cui tutti i treni abbiano la stessa velocità di percorrenza (esercizio omotachico), come succede nelle linee di metropolitana e nei servizi ferroviari urbani. A tal proposito, è possibile notare che il suddetto esercizio (minore eterogeneità) è caratterizzato da un numero maggiore di treni a fronte di maggiore regolarità e minore velocità media di percorrenza rispetto a un esercizio piuttosto eterotachico (diversi livelli di velocità) evidenziato dalla corda di colore blu nella figura.

E' da notare che la distanza di frenatura (conseguentemente il distanziamento temporale fra treni) aumenta proporzionalmente con la velocità media e quanto più è elevata la differenza tra i tempi di percorrenza delle diverse tipologie di treni (maggiore grado di eterotachicità) tanto minore sarà, a parità di intervallo temporale, il numero di treni che potranno circolare sull'infrastruttura.

Nei riguardi della regolarità e del suo miglioramento, possono essere aggiunti margini di recupero (*recovery times*) ai tempi di percorrenza e tempi cuscinetto (*buffer times*) tra le tracce orarie per limitare il trasferimento di eventuali ritardi tra treni consecutivi; tale incremento del tempo complessivo di impegno dell'infrastruttura causa tuttavia una riduzione della capacità.

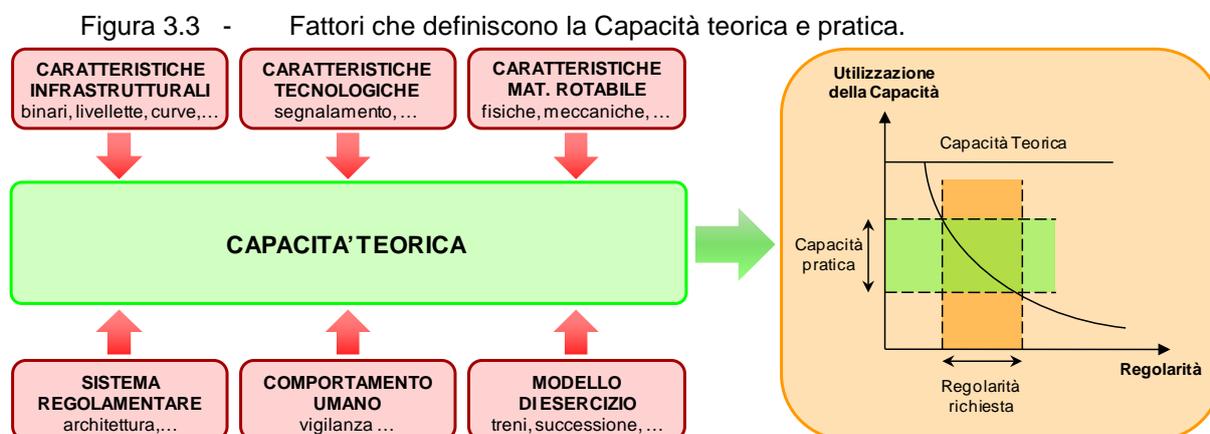
Si definiscono due tipi di capacità:

- *teorica (theoretical capacity)*, corrispondente al massimo numero di treni che possono teoricamente circolare col distanziamento minimo ammesso dagli impianti di controllo e segnalamento;
- *pratica (practical capacity)*, corrispondente al numero di treni che possono effettivamente circolare fissato un determinato livello di qualità di esercizio desiderato.

La capacità teorica viene determinata mediante relazioni matematiche<sup>11</sup> ed è un limite oltre il quale il sistema non può essere utilizzato; la capacità pratica è il limite pratico di traffico che può essere sopportato dal sistema e viene calcolata secondo ipotesi relative al livello di regolarità desiderato (Figura 3.3).

Determinata la capacità teorica, valore oltre il quale tecnicamente non si può andare, viene definita la capacità pratica (ossia effettivamente utilizzabile).

Nella Fiche UIC 406 R è specificato che la capacità pratica è quella che può essere garantita nelle ipotesi di normale esercizio ed è di solito considerata pari al 60-75% della teorica.



Come accennato precedentemente, il modello di esercizio gioca un ruolo fondamentale nella determinazione della capacità, facendola variare sensibilmente a parità degli altri fattori.

<sup>11</sup> Un valido metodo per il calcolo della capacità teorica di una linea consiste nel simulare un illimitato numero di treni in ingresso e calcolare il numero di treni in uscita: tale flusso è la capacità massima, intesa come rapporto tra il totale numero di treni usciti e quelli entrati. Con tale procedura è possibile stimare i ritardi generati p.e. per il singolo treno o per tutti i treni ritardati, i conflitti che si creano e la localizzazione (cioè la sezione di blocco critica) [Dicembre A. – *Studio della circolazione in linee e nodi complessi: l'esercizio dei corridoi ferroviari urbani* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2011].

In particolare, la scelta del numero di soste da programmare in un servizio e la relativa durata (tempo di sosta) influisce, ovviamente, oltre che sulla capacità anche sulla velocità commerciale di una linea, che è bassa nel caso di servizi con molte soste e aumenta al diminuire delle fermate effettuate (a parità di altri parametri). La velocità commerciale è inoltre, per definizione, maggiore nel caso di tempi di sosta minori e influenzata dalla velocità massima di linea nel momento in cui i servizi possono raggiungere tale velocità in quanto non effettuano fermate.

### **3.2 Stato dell'arte degli strumenti di valutazione della capacità: vincoli e limiti**

La capacità di un'infrastruttura ferroviaria, come è stato già scritto, è condizionata non solo da parametri tecnici ma anche dal tipo di modello di esercizio scelto nonché dalla qualità del servizio che si vuole garantire.

Lo scopo principale di valutare (nel senso stretto di verificare, analizzare) la capacità è quello di determinare il numero di treni che possono circolare sulla data infrastruttura in un determinato intervallo di tempo.

In letteratura, esistono diverse formulazioni empiriche o analitiche per la valutazione della capacità di linee e stazioni, esaminate in modo disgiunto per il semplice motivo che non è possibile (o quanto meno verosimile) determinare un valore unico riferito a una rete, in quanto la complessità e diversità delle parti che la compongono (linee, stazioni, ecc.) richiedono la definizione di un valore di capacità distinto per ognuna di esse.

Per quanto riguarda le linee si annoverano metodi di tipo *statico* (Bonora e Giuliani, 1982) e metodi *probabilistici* (tipo UIC e DB) che considerano le situazioni riscontrabili in esercizio in termini statistici.

Per i nodi esistono metodi *sintetici*, come quello di Potthoff (1965) che, mediante un'analisi quantitativa globale dell'impianto, determina il grado di utilizzazione dello stesso (tale metodo è stato ripreso anche nelle istruzioni tecniche delle ferrovie tedesche nel 1979); metodi *analitici*, tra cui quello di Muller (1960) che, mediante l'analisi dello schema funzionale dell'impianto e del programma di esercizio, definisce per ciascun ente interessato dal movimento dei treni un diagramma temporale con gli stati di occupazione e libertà.

Per determinare il grado di occupazione dei binari di stazione, esistono metodi *statistici* (Bianchi e Rizzo, 1980) che assimilano il funzionamento degli stessi a un sistema con più serventi in parallelo.

La verifica della capacità di linee e nodi può essere affrontata simultaneamente mediante metodi che si avvalgono di procedure di *simulazione*, queste ultime suddivise in *asincrone* e *sincrone*.

La simulazione asincrona rappresenta il problema in maniera astratta, con modelli in cui si svolgono processi dinamici con avvenimenti discontinui (p.e. ingressi e uscite dei treni dalle singole unità spaziali e temporali). In questo schema, le grandezze determinanti vengono integrate tra loro come fossero “scatole di montaggio” in cui non è necessaria esplicitare la relazione funzionale in termini analitici. La possibilità di aggiornare con continuità i singoli parametri consente di svolgere al meglio le analisi di sensibilità delle grandezze in questione.

La simulazione sincrona rappresenta un grado successivo perché riesce a riprodurre i processi parziali secondo la sequenza reale e fornisce quindi valori più simili alla reale situazione rispetto a quanto fornito dalla simulazione asincrona, con lo svantaggio però che il processo di programmazione vero e proprio (inteso come allocazione delle tracce orarie nei diversi slot temporali disponibili) non può venire riprodotto se non grazie ad appositi programmi per la gestione dell'orario. La capacità massima è calcolata direttamente simulando un numero crescente di treni in ingresso e misurando il corrispondente numero di treni in uscita: il valore massimo è quello per cui all'uscita della sezione il numero di treni non aumenta ulteriormente.

Nella letteratura tecnica, tra gli esempi di simulazione nel campo ferroviario, sono presenti sia studi che si basano sulla simulazione asincrona, sia studi che adottano quella sincrona.

Nel primo caso la marcia dei treni viene simulata solo nella fase di moto vario, mentre per le fasi a velocità costante, precedentemente memorizzate, vengono semplicemente richiamati i dati di marcia dalla memoria del calcolatore e non calcolati di volta in volta.

Nella simulazione sincrona la marcia dei treni viene simulata passo - passo (*step by step*) e in parallelo per tutti i treni, cioè i treni vengono fatti procedere simultaneamente e ne viene simulata la marcia.

Va tenuto presente che tutti i metodi legati alla simulazione risentono della sua specificità spaziale e temporale, e per questo motivo non può desumersi la generalità dei risultati per diverse situazioni di impianto. Al contrario, i metodi non simulativi descrivono la marcia dei convogli partendo dai dati riguardanti l'infrastruttura e l'orario di esercizio, ma non sono in grado di ricostruire le curve in funzione del tempo. Questa limitazione comporta che tali metodi vengono utilizzati nei casi di semplici situazioni o per analisi limitate (preliminari)<sup>12</sup>.

Si riporta di seguito una breve descrizione della metodologia, per la determinazione della capacità teorica e per la definizione della capacità pratica di una linea, sviluppata nell'ambito della Ricerca di Dottorato svolta dal dott. ing. Dicembre A. (2011) del Corso di Dottorato in Infrastrutture e Trasporti – Curriculum Ingegneria Ferroviaria – dell'Università degli Studi di Roma “La Sapienza”.

---

<sup>12</sup> Per ulteriori approfondimenti sulle metodologie analitiche e di simulazione per il calcolo della capacità consultare: Kontaxi E., Ricci S. – “*Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive di integrazione*” in Sicurezza ed Esercizio Ferroviario: sviluppi attuali e prospettive della ricerca, Aracne Editrice, Roma, 2009.

Per la determinazione della capacità teorica di una linea, in funzione dei vincoli imposti dall'infrastruttura e dal sistema di segnalamento e fissato un determinato materiale rotabile, la metodologia prevede, mediante l'ausilio di un programma di simulazione, la generazione nella linea di un numero infinito di treni con un distanziamento fittizio iniziale molto piccolo, ossia praticamente impossibile da realizzare. Con tale procedimento è possibile vedere come, dopo non molti treni simulati, il distanziamento tra di essi tenda a stabilizzarsi intorno a un valore che rappresenta il distanziamento minimo consentito dal sistema di segnalamento e controllo. Tale distanziamento è funzione sia dei tempi di sosta alle stazioni, sia della velocità di percorrenza delle tratte e varia in funzione del sistema di segnalamento adottato e della sezione di blocco più restrittiva, ossia quella con tempo totale di occupazione maggiore. Le perturbazioni non si affievoliscono con l'aumentare del numero di treni generati in quanto non sono previsti margini di recupero. I treni tenderanno ad avere, dopo un transitorio iniziale, un distanziamento tra di loro in uscita dalla linea costante. Se si usa tale valore di distanziamento come minimo teorico e si fa partire nuovamente la simulazione, si nota come le interferenze tra convogli siano così scomparse: in corrispondenza si ha il massimo valore di capacità. La capacità teorica della linea deriva di conseguenza come rapporto tra l'unità di tempo e il distanziamento tra treni (Dicembre, 2011).

La suddetta metodologia consente di diagrammare l'andamento della capacità teorica di una linea in funzione del tempo di sosta alle stazioni, parametrizzato di volta in volta in funzione della velocità di percorrenza. Inoltre, al variare della tipologia di segnalamento, ossia passando da un sistema a sezioni di blocco ravvicinate a un sistema con sezioni lunghe, il valore della capacità teorica diminuisce, in quanto il tempo di occupazione della sezione di blocco critica aumenta e aumenta quindi la distanza minima ammissibile tra convogli. La metodologia consente anche di diagrammare l'andamento della capacità teorica di una linea in funzione della velocità di percorrenza, parametrizzato di volta in volta in funzione del tempo di sosta.

La definizione della capacità come massima frequenza teorica fornisce un valore corrispondente al distanziamento minimo realizzabile dai sistemi di segnalamento e controllo ed è quindi *oggettiva*.

Per la definizione della capacità pratica la questione diventa *soggettiva*, in quanto dipende dal punto di vista secondo cui viene definita; se la si vuole determinare in maniera *tecnica*, essa dipende dalla volontà e dall'abilità di chi è responsabile della realizzazione dell'orario. La metodologia parte dalla determinazione della capacità teorica, valore oltre il quale tecnicamente non si può andare, e definisce il tempo di recupero da aggiungere a quello calcolato al massimo delle prestazioni dei convogli. Tale tempo è quantificato rispettando il vincolo che, ipotizzato che i tempi di ritardo delle soste abbiano una determinata distribuzione di probabilità, un'eventuale situazione di marcia perturbata non si ripercuota all'infuori della linea, ovvero che mediamente i ritardi endogeni generatesi durante la marcia nel corridoio non si protraggano oltre la linea stessa (Dicembre, 2011).

La novità della metodologia, proposta nella tesi dottorale del dott. ing. Dicembre A., risiede nella possibilità di valutare la circolazione in una data infrastruttura in base alla qualità del servizio desiderato in termini di puntualità, operazione che gli altri metodi consentono di norma in forma astratta o troppo pragmatica.

### 3.3 Strategie per incrementare la capacità

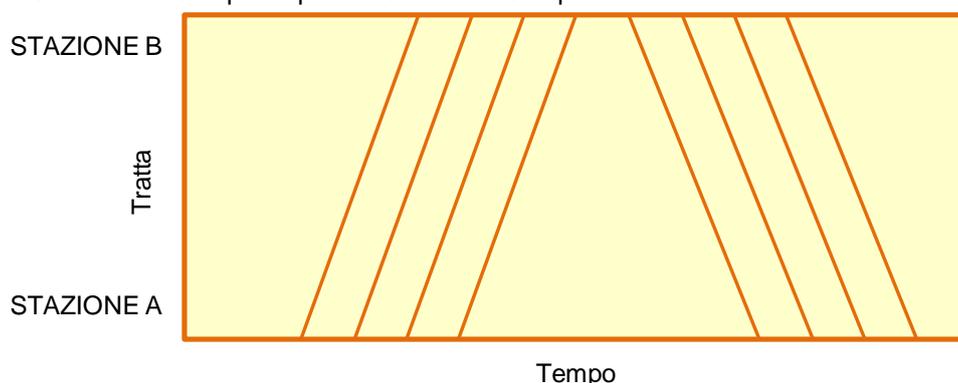
Le azioni che possono essere intraprese per incrementare la capacità di una linea, fanno riferimento a strategie di tipo gestionale (di più semplice e rapida applicazione) oppure di tipo infrastrutturale e tecnologico (programmabili a medio e lungo termine):

- modifiche alle procedure gestionali o all'orario (sequenza dei treni);
- rimozione delle sezioni a velocità ridotta;
- modifica del sistema di segnalamento;
- modifiche al layout infrastrutturale.

Nel primo punto rientrano modifiche ai percorsi, ad esempio, per spostare i treni in sezioni di linea meno congestionate, o la riorganizzazione della sequenza di inoltro dei treni, creando plotoni a velocità uniforme (*circolazioni eterotachiche*) che consentono la riduzione del distanziamento minimo di linea e quindi una maggiore capacità. Su linee a doppio binario la realizzazione dei plotoni può avvenire tramite la regolarizzazione della velocità, mentre nelle linee a singolo binario tramite creazione di plotoni per direzione, come mostrato in Figura 3.4. Tale procedura, che risulta favorevole per la circolazione in linea, può invece creare ritardi nelle stazioni o comunque per le coincidenze per il fatto che i treni pronti a partire sono obbligati a rimanere fermi fino all'orario di partenza del proprio plotone.

Anche l'azione su sezioni di blocco a velocità ridotta può comportare un incremento della capacità, in quanto un aumento della velocità di percorrenza consente di ottenere un minore tempo di occupazione, quindi di inoltrare i treni con un distanziamento minore.

Figura 3.4 - Esempio di plotoni su linea a semplice binario.



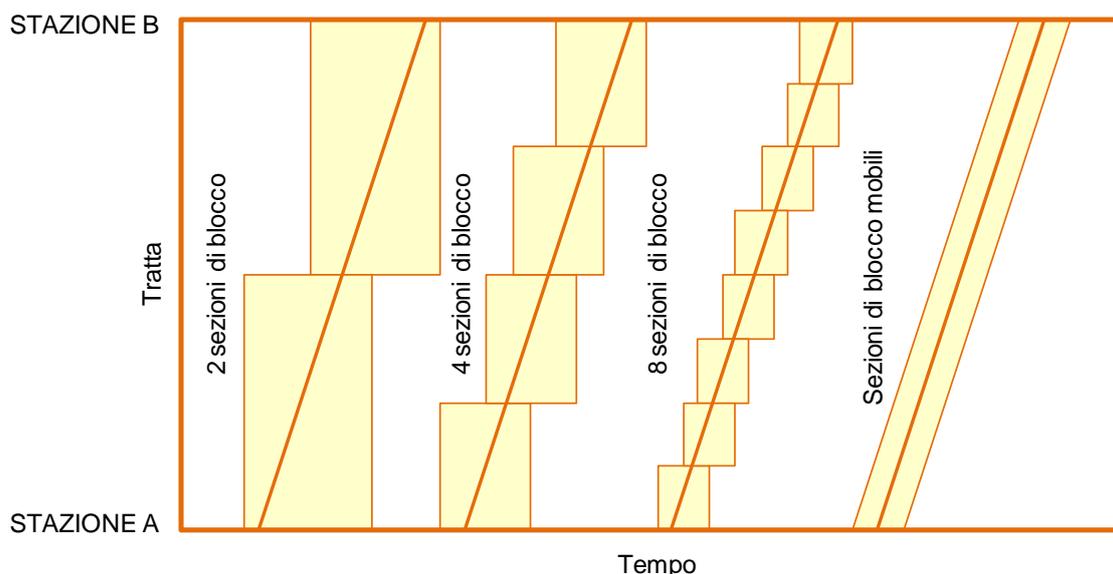
Per quello che riguarda il sistema di segnalamento, le azioni principali che possono essere intraprese fanno riferimento a:

- introduzione della ripetizione dei segnali in cabina;
- riduzione della lunghezza delle sezioni di blocco;
- introduzione di sezioni di blocco mobili.

La ripetizione dei segnali in cabina permette di rendere la marcia del treno più sicura, in quanto lo stato dei segnali è riprodotto direttamente a bordo; i segnali fissi, opportunamente posizionati in modo da rendere possibile la frenatura in sicurezza del treno con velocità massima, penalizzano i treni a velocità più bassa (che hanno bisogno di spazi di frenatura minori), limite che viene superato grazie alla ripetizione in cabina che permette di calcolare la reale distanza di frenatura in base alle prestazioni del treno in questione.

Nella Figura 3.5 vengono riportati i possibili interventi sulla lunghezza delle sezioni di blocco, fino alle sezioni di blocco mobili, e le conseguenze sul tempo di occupazione della relativa tratta.

Figura 3.5 - Lunghezza delle sezioni di blocco e tempi di occupazione.



Il legame tra lunghezza delle sezioni di blocco e distanziamento tra treni non è comunque direttamente proporzionale, in quanto il tempo di occupazione di una sezione è funzione del tempo di percorrenza, ma non solo. Nei casi in cui si abbiano sezioni di blocco di lunghezza minore dello spazio di frenatura sono inoltre richiesti particolari tipi di segnalamento (p.e. quello adottato dalle FS italiane nel caso di sezioni di blocco a 450 m, denominato a giallo lampeggiante o limitazioni alla velocità di marcia) o l'utilizzo di sistemi di ripetizione dei segnali in cabina (Dicembre, 2011). L'adozione di sezioni di blocco corte o mobili è in particolar modo efficace per incrementare la capacità nelle linee a doppio binario caratterizzate da circolazione per lo più omotachica; su tale tipologia di linee la capacità dipende significativamente dalle differenze di velocità tra le classi di treni presenti. La differenza media del tempo di percorrenza tra stazioni in cui i treni più veloci possono superare quelli più

lenti è la parte predominante del distanziamento medio rispetto al tempo di percorrenza nelle sezioni di blocco. Sulle linee a singolo binario, la capacità dipende invece dal grado di eterotachicità della linea e dalla plotonizzazione delle circolazioni, casi in cui l'introduzione di sezioni di blocco mobili non comporta significanti incrementi della capacità.

E' opportuno sottolineare che le sezioni di blocco corte sono motivate per linee con alta densità di traffico, per le quali è possibile anche dover assumere sezioni di lunghezza minore dello spazio di arresto. In tale eventualità, tale distanza deve essere estesa a più sezioni, comportando delle opportune modifiche al segnalamento, secondo due criteri (Dicembre, 2011):

- posizionare segnali a doppio aspetto a intervalli pari a metà della distanza di arresto, in modo da avere una ripetizione dello stato che avrà il segnale della sezione di blocco da proteggere;
- inserire segnali che indichino progressivamente la velocità da assumere, in modo da rallentare il treno e farlo entrare nell'ultima sezione di blocco prima di quella da proteggere a una velocità tale da permetterne l'arresto. Benché si utilizzino segnali a più aspetti (tre o quattro), rimane comunque un sistema di segnalamento che regola la marcia del treno in due sezioni di blocco in quanto è possibile dare informazione sullo stato del segnale successivo; rispetto al precedente, la possibilità di usare differenti lunghezze di sezioni di blocco coerentemente con le necessità operative permette di migliorare la capacità della linea, anche grazie ad altri interventi di tipo gestionale nella sequenza dei treni.

### 3.4 Relazione tra capacità e regolarità

Il concetto di capacità di una data infrastruttura (p.e. di una linea) esiste nel momento stesso in cui viene espresso anche il concetto di regolarità.

La regolarità è a sua volta influenzata da molti fattori, dei quali uno dei più importanti è la qualità dell'orario utilizzato. Una valutazione di questa caratteristica si lega ai concetti di stabilità e robustezza dell'orario, la prima intesa come capacità del sistema di compensare i ritardi o le perturbazioni e di ritornare allo stato iniziale, la seconda invece come capacità del sistema di reggere le variazioni imposte ai parametri o alle condizioni operative.

Il sistema ferroviario è soggetto ad effetti casuali sulle operazioni, p.e. sui tempi di percorrenza delle tratte, sui tempi di sosta nelle stazioni, che vanno a ridurre la capacità teorica; di conseguenza si rende necessaria l'introduzione di opportuni tempi di recupero che arginino gli effetti stocastici della circolazione.

Per questo motivo, il tempo di percorrenza programmato di un treno è composto da:

- *tempo di percorrenza "puro"*, calcolato in base alla cinematica del treno;
- *tempo di sosta alle fermate*;
- *tempo di recupero* (recovery time), che può essere regolare o addizionale;
- *tempo di attesa programmato*.

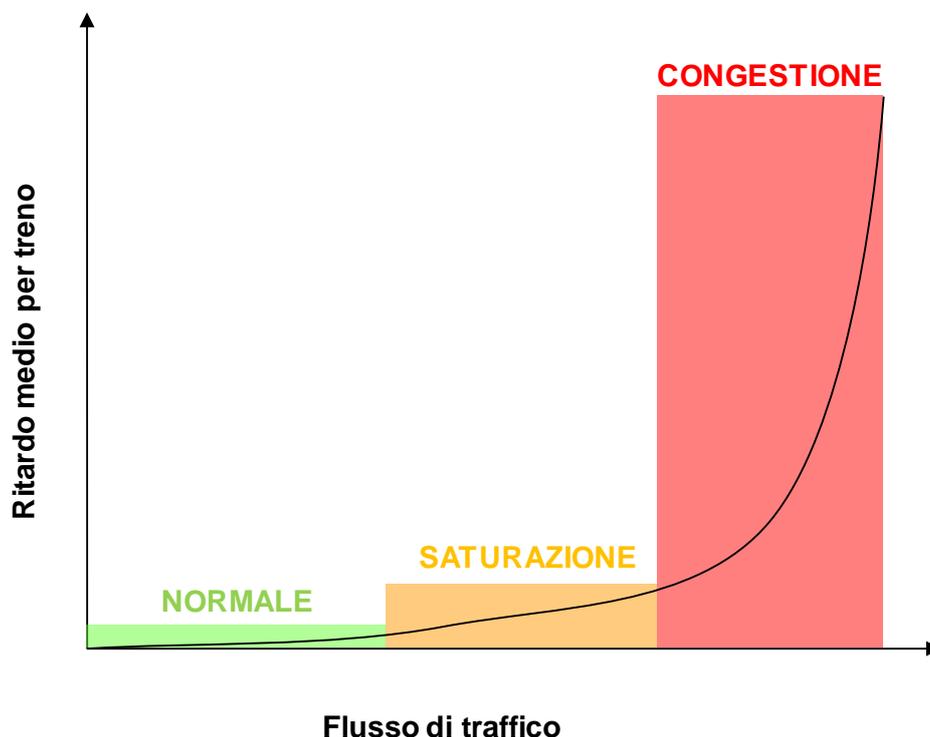
Il tempo di recupero viene inserito per permettere ai treni di accumulare il minor ritardo possibile. Il tempo di recupero regolare è aggiunto come percentuale del tempo di percorrenza "puro" (dal 3% al 7%) alla fine del percorso del treno o, in altri casi, ripartendolo tra le varie tratte che il treno percorre.

Il tempo di recupero addizionale è invece utilizzato per compensare eventuali ritardi dovuti a eventuali lavori di manutenzione che degradano le caratteristiche della linea. Differentemente da quello regolare, è un tempo fisso.

Il tempo di attesa programmato è aggiunto perlopiù alle soste in stazione per particolari esigenze gestionali (p.e. per garantire eventuali coincidenze, il cadenzamento dell'orario o evitare conflitti tra circolazioni).

Un indice di regolarità può essere il ritardo medio per treno; da esso, infatti, è possibile trovare una prima relazione tra capacità e regolarità, in quanto risulta che tale ritardo cresce esponenzialmente nel momento in cui il numero di treni supera il livello di saturazione del sistema (dimostrato tramite applicazioni pratiche), con un decadimento della regolarità e rendendo non favorevole incrementare ulteriormente il numero di tracce oltre la saturazione (Figura 3.6).

Figura 3.6 - Correlazione tra ritardo medio per treno e numero di treni effettuati.



## PARTE II

### SVILUPPO DELLA METODOLOGIA DI VALUTAZIONE

*“Se un uomo parte con delle certezze finirà con dei dubbi;  
ma se si accontenta di iniziare con qualche dubbio,  
arriverà alla fine a qualche certezza”*

(Sir Francis Bacon)

## 4. Modelli per la quantificazione delle prestazioni

La metodologia, proposta in questa Tesi di ricerca, si basa sull'analisi e la verifica dei regolamenti dell'esercizio ferroviario, sulla determinazione quantitativa della sicurezza della circolazione ferroviaria mediante la stima dei rischi e, infine, sulla quantificazione delle prestazioni del sistema in termini di capacità mediante la simulazione dell'esercizio ferroviario stesso. Per stimarne l'attendibilità, è stata applicata a un caso di studio.

Lo scopo del metodo è quello di costruire, mediante lo studio dei regolamenti e della circolazione ferroviaria, uno strumento che quantifichi le prestazioni del sistema ferroviario in termini di sicurezza della circolazione e di capacità dell'infrastruttura e, sulla base di queste, che possa fornire le basi valutative per proporre gli interventi sul sistema ferroviario in grado di migliorare la qualità e la regolarità dell'esercizio.

### 4.1 Generalità

Il processo di analisi, alla base della metodologia, ha inizio con il verificare quanto un evento, definito pericoloso, che abbia influenza sulla sicurezza della circolazione ferroviaria (p.e. arresto rapido di un treno a seguito di un guasto al sistema frenante, interruzione del segnale radio su linee AV/AC dotate di sistema ERTMS/ETCS L2, rilevamento della temperatura delle boccole di un rotabile al di sopra di una certa soglia massima consentita, ecc.) possa influire anche sulla circolazione dei treni.

Poiché la circolazione dei treni su una determinata infrastruttura è regolamentata da processi ben definiti, è lecito chiedersi quali possano essere gli effetti sulla sicurezza e sulla regolarità della circolazione a seguito dell'instaurarsi di una situazione anomala e cosa possa accadere qualora non siano rispettati gli adempimenti regolamentari previsti.

Nella Figura 4.1 è rappresentato, mediante un diagramma a blocchi, il principio logico di quanto sopra esposto.

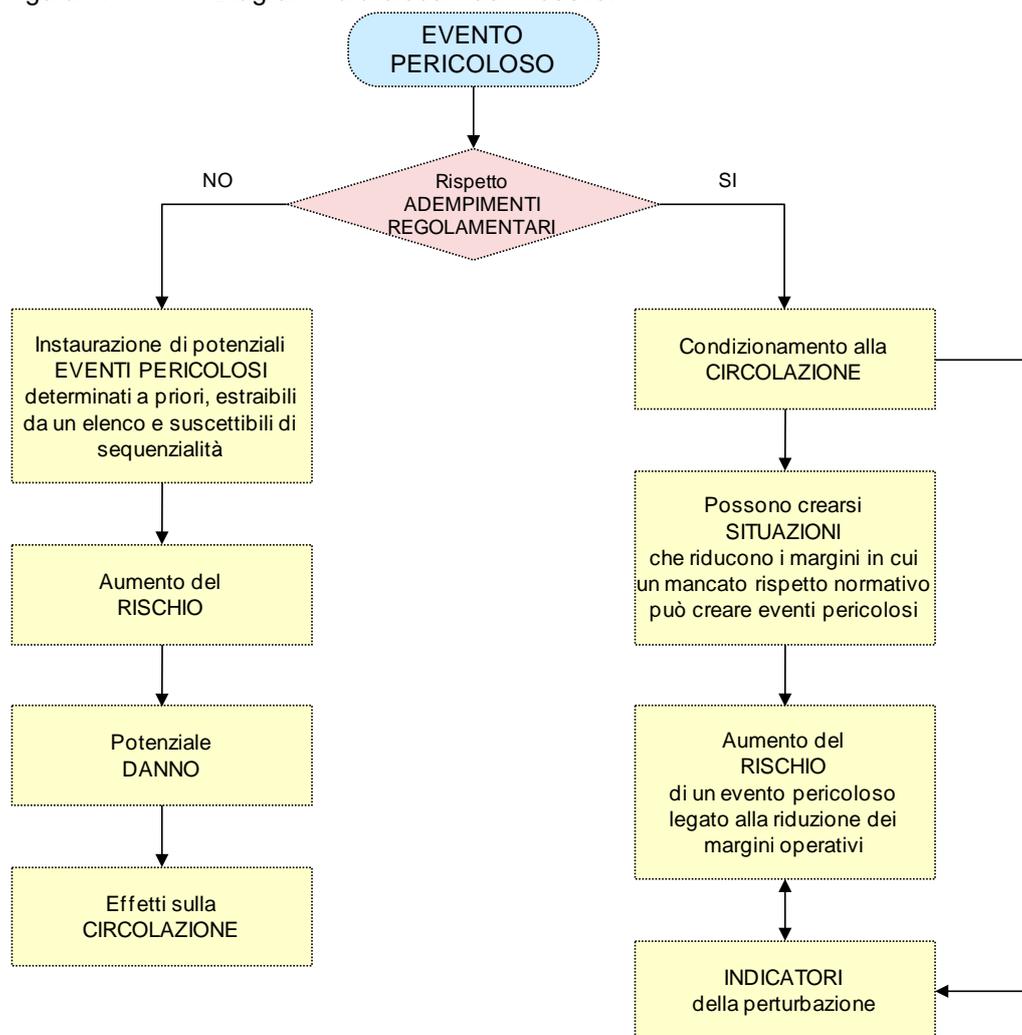
Il mancato rispetto degli adempimenti regolamentari può portare all'instaurazione di uno o più eventi pericolosi (o incidentali) i quali, in funzione del rischio correlato, possono sfociare in un incidente con conseguenze sulla circolazione.

Il Decreto Legislativo n. 162 del 10/08/2007 "Attuazione delle direttive 2004/49/CE e 2004/51/CE relative alla sicurezza e allo sviluppo delle ferrovie comunitarie" definisce con il termine "incidente" un "*evento improvviso indesiderato e non intenzionale o specifica catena di siffatti eventi aventi conseguenze dannose; gli incidenti si dividono nelle seguenti categorie: collisioni, deragliamenti, incidenti ai passaggi a livello, incidenti a persone causati da materiale rotabile in movimento, incendi e altro*".

Affinché l'evento pericoloso diventi incidente è necessaria, dunque, la sussistenza di un danno.

A seguito dell'evento iniziatore, inoltre, il rispetto degli adempimenti regolamentari non garantisce totalmente l'assenza di situazioni che, riducendo i margini operativi, possono generare eventi pericolosi.

Figura 4.1 - Diagramma a blocchi del modello.



Quanto detto sopra dipende dal fatto che in condizioni di circolazione non perturbate le procedure di sicurezza da attivare sono notoriamente più semplici, a differenza di quelle in condizioni di perturbazione del traffico.

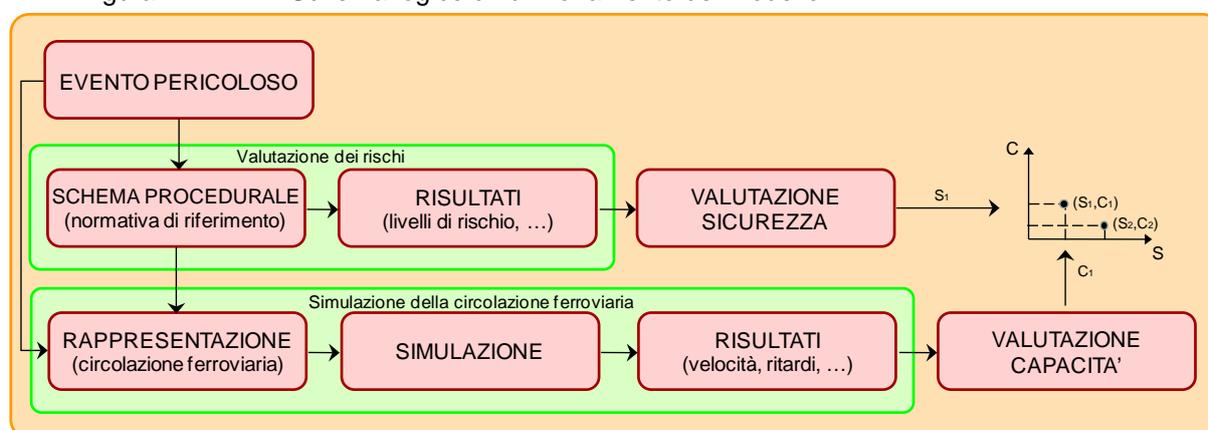
Quando il servizio procede irregolarmente o diventa irregolare, aumentano le esigenze di sicurezza; queste a loro volta rendono ancora più irregolare il servizio, il quale a sua volta richiede ulteriori misure di sicurezza e così via. Si innesca in tal modo un processo autoesaltantesi in cui l'esercizio irregolare chiede una maggiore sicurezza e la maggiore sicurezza rende più irregolare l'esercizio (Piciocchi, 1981).

Per comprendere meglio il principio di funzionamento della metodologia proposta è possibile osservare lo schema logico riportato nella Figura 4.2.

Considerato un evento pericoloso, che abbia influenza sulla sicurezza, e supposto che lo stesso evento incida anche sulla circolazione dei treni e quindi sulla regolarità del servizio, lo scopo del metodo è determinare i valori degli indicatori che forniscano una valutazione quantitativa delle prestazioni in termini di sicurezza e capacità.

Per giungere a valori di stima della capacità e di regolarità, la metodologia ricorre all'uso di un software di simulazione della circolazione ferroviaria. Come verrà descritto nel § 4.3, è necessario rappresentare la consistenza dello scenario in termini di sistemi infrastrutturali, tecnologici, nonché di gestione operativa.

Figura 4.2 - Schema logico di funzionamento del modello.



Gli output della simulazione sono del tipo tabellare o grafico, potendo così avere una rappresentazione dei fenomeni fisici non solo in forma numerica (spazi, tempi, velocità, accelerazioni, ritardi, sforzi di trazione, ecc.) ma anche diagrammata (spazio-tempo, occupazione dei binari, ecc.).

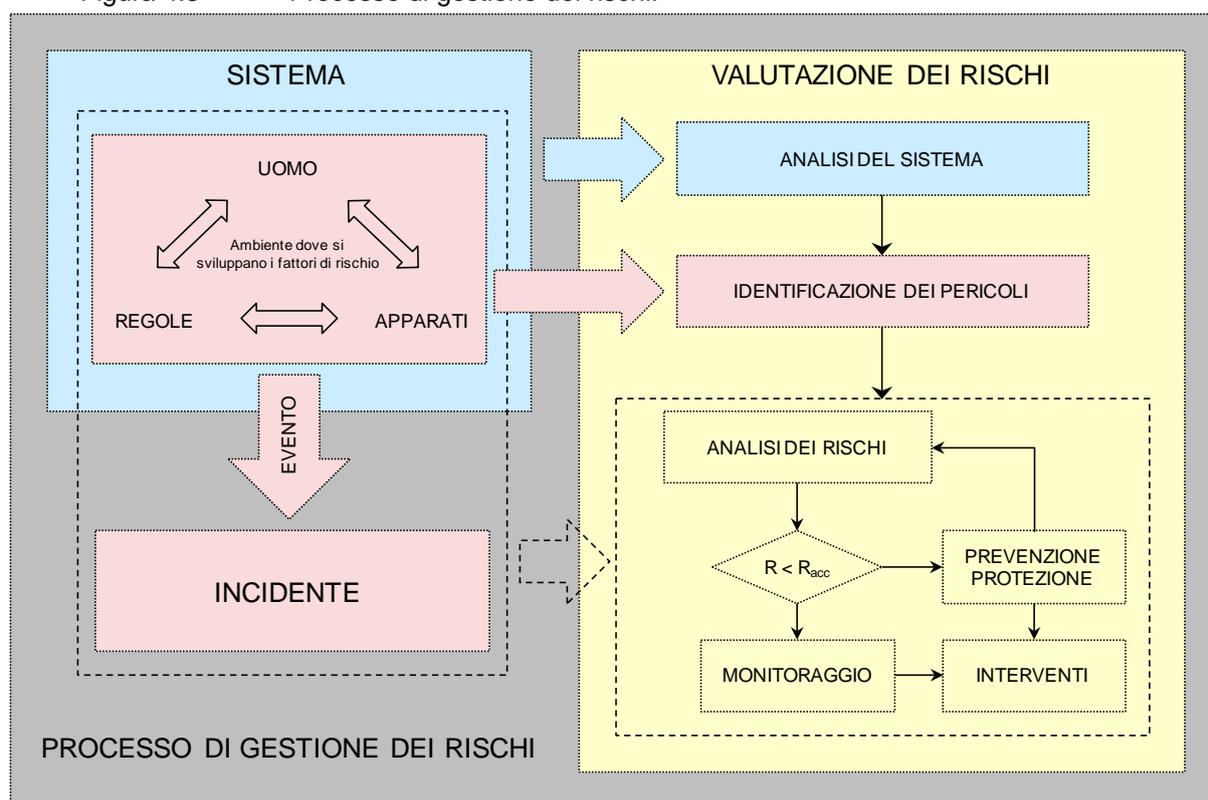
In un determinato periodo temporale, poiché il movimento di un treno interagisce con i movimenti degli altri treni circolanti sulla stessa infrastruttura, il valore quantitativo che più interessa nel determinare la possibile correlazione con la sicurezza, oltre alla capacità propriamente detta, è quello relativo alla regolarità dell'esercizio. In particolare, interessa quantificare il ritardo del treno che subisce l'evento (inteso come scostamento temporale tra un orario corrente in un determinato punto di misura dell'infrastruttura e un orario programmato nello stesso punto) e i conseguenti ritardi dei treni che gli succedono o che interagiscono con esso.

Per quantificare il valore relativo alla sicurezza, la metodologia sviluppa un processo di valutazione dei rischi seguendo la logica del procedimento di gestione dei rischi descritto nel Regolamento (CE) n. 352/2009 della Commissione del 24 aprile 2009 relativo all'adozione di un metodo comune di determinazione e di valutazione dei rischi di cui all'articolo 6, paragrafo 3, lettera a), della direttiva 2004/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio. Tale Regolamento è stato descritto nel § 2.6.

## 4.2 Analisi e valutazione della sicurezza

Il processo di gestione dei rischi, inteso come analisi dei rischi, valutazione quantitativa dei rischi e miglioramento continuo della sicurezza, è un processo complesso che necessita della chiara definizione degli elementi che lo caratterizzano e delle relazioni tra questi e le finalità.

Figura 4.3 - Processo di gestione dei rischi.



Fonte: FEDELE L. – *Progettare e gestire la sicurezza* – McGraw-Hill Companies, 2008.

Come evidenziato nella Figura 4.3, nell'ambito del processo di gestione dei rischi è possibile identificare tre aree distinte:

1. il sistema che si vuole analizzare;
2. gli eventi avversi;
3. lo schema logico per effettuare l'analisi dei rischi, la valutazione dei rischi e la definizione degli interventi per il miglioramento.

Il sistema può essere visto come l'insieme di tre elementi principali: l'uomo, le regole e gli apparati. Questi elementi singolarmente e le loro interazioni possono essere fonte di pericolo. Ne deriva che per ogni sistema che si vuole analizzare possono essere identificate un gran numero di situazioni pericolose, ognuna delle quali è caratterizzata da uno o più elementi del sistema stesso che interagiscono tra di loro.

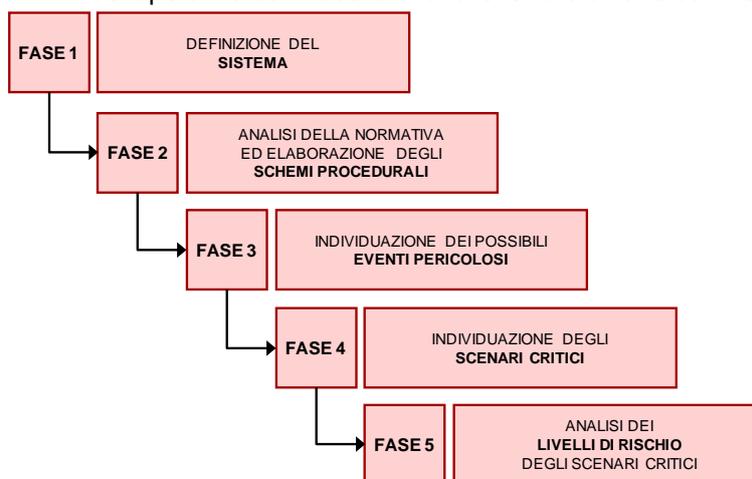
Il modello di analisi e valutazione della sicurezza (o analisi e valutazione del rischio) è strutturato, quindi, secondo un approccio sistemico, in cui il ruolo principale è assunto dall'interazione tra il comportamento umano, le tecnologie e i regolamenti.

Le fasi del modello proposto sono le seguenti:

- Fase 1: Definizione del sistema;
- Fase 2: Analisi della normativa ed elaborazione degli schemi procedurali;
- Fase 3: Individuazione dei possibili eventi pericolosi;
- Fase 4: Individuazione degli scenari critici;
- Fase 5: Analisi dei livelli di rischio degli scenari critici.

Le fasi suddette sono sequenziali e definite secondo il diagramma a blocchi riportato nella Figura 4.4.

Figura 4.4 - Fasi operative del modello di analisi e valutazione dei livelli di rischio.



Tali fasi sono descritte brevemente generalizzando i contenuti affinché sia data alla metodologia una validità generale.

#### FASE 1 – DEFINIZIONE DEL SISTEMA

Definire quale sia il sistema entro il quale si intende concentrare l'intero processo di valutazione del rischio è una fase fondamentale e indispensabile.

Il sistema comprende tutto quello che, in qualsiasi modo, è in grado di interagire, influenzare o essere influenzato, definendo così il luogo dove si sviluppano le cause che potrebbero materializzarsi nell'evento pericoloso (hazard).

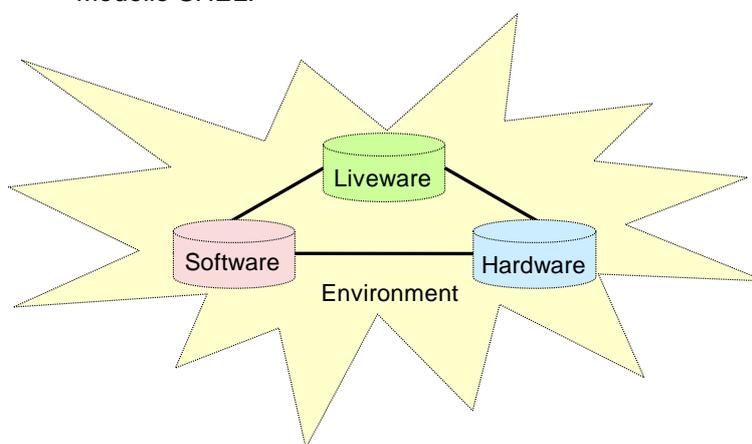
Definendo il sistema ci si pone nella condizione di capire come l'ambiente contribuisca al verificarsi di un hazard e qual è il limite oltre il quale l'analisi stessa perde di significato alterando la corretta identificazione dell'hazard e di conseguenza un'affidabile valutazione del rischio.

In generale, in questa fase si individuano le risorse del processo produttivo da analizzare. La definizione del sistema viene fatta mediante l'approccio sistemico del Metodo SHELL (Software, Hardware, Environment, Liveware).

Il modello SHEL, sviluppato nell'ambito dell'Ingegneria dei fattori umani, propone una visione sistematica dei processi produttivi basata sull'individuazione di quattro elementi fondamentali, fra loro chiaramente distinti, i cui termini corrispondono alle seguenti definizioni:

- *Software*, elemento costituito dai regolamenti, dalle procedure, dalle pratiche operative e da tutto ciò che determina come le varie componenti del sistema produttivo interagiscono tra loro;
- *Hardware*, insieme di tutte le componenti fisiche non umane, come i veicoli, le attrezzature, i manuali, ecc.;
- *Environment*, contesto all'interno del quale sono immersi gli altri elementi. Rappresenta l'organizzazione che fa da cornice a tutti i processi, condizionandone inevitabilmente le modalità di svolgimento;
- *Liveware*, rappresenta la componente umana del sistema.

Figura 4.5 - Modello SHEL.



Il valore del modello SHEL consiste soprattutto nell'idea che le criticità che si sviluppano all'interno di un processo non siano mai rilevabili all'interno di una sola delle quattro componenti, ma nelle interazioni critiche che si stabiliscono fra esse.

Nella presente ricerca si evidenzia principalmente l'interazione fra gli elementi Software, Hardware e Liveware all'interno dell'organizzazione (Environment).

## FASE 2 – ANALISI DELLA NORMATIVA ED ELABORAZIONE DEGLI SCHEMI PROCEDURALI

Come già descritto nel Capitolo 1, la normativa di esercizio è l'insieme delle norme contenute in diverse pubblicazioni specifiche per l'esercizio ferroviario; essa può essere divisa in: Regolamenti, Disposizioni, Istruzioni, Prescrizioni di movimento, Ordini di servizio e Circolari nell'ordine gerarchico di importanza con cui vengono sopra riportati.

Definito il sistema, questa fase prevede l'analisi della normativa che disciplina l'attuazione dei processi produttivi. In questa fase è prevista anche l'elaborazione degli schemi procedurali che consiste nel tradurre sinteticamente la normativa in uno

o più schemi ordinati in funzione del numero e della complessità delle attività da svolgere.

Ogni attività è definita Azione/Operazione (a seconda se deve essere svolta dalla componente umana oppure dalla componente fisica non umana), condizionata a sua volta, da una o più Responsabilità/Funzionalità che operatori umani o apparati tecnologici del sistema devono assumere per svolgere le attività correttamente. Pertanto, l'individuazione delle azioni/operazioni e delle responsabilità/funzionalità, eseguita in questa fase, rappresenta la modellizzazione dei regolamenti da integrare nel modello.

Figura 4.6 - Struttura dello schema procedurale.

SOFTWARE						LIVEWARE		HARDWARE	
SIGLA	AZIONI/OPERAZIONI	Normativa	SIGLA	RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'	Normativa	L 1	L 2	H 1	H 2
O 1			F 1						
O 2			F 2						
A 1			R 1						
A 2			R 2						
A 3			R 3						
A 4			R 4						
A 5			R 5						

Gli schemi che sintetizzano le procedure sono concepiti sotto forma di tabelle. Ogni tabella è suddivisa in tre gruppi di colonne che fanno riferimento agli elementi Software, Hardware e Liveware.

Nel gruppo di colonne Software vengono riportate le voci relativamente a:

- Azione/Operazione (con relative sigle);
- Responsabilità/Funzionalità (con relative sigle);
- Riferimenti normativi.

Le azioni e le operazioni da svolgere rappresentano lo scambio delle informazioni tra gli attori riportati nel gruppo di colonne Hardware e Liveware. Ognuna di queste attività è identificata da una sigla alfanumerica costituita dalla lettera di riferimento (A = Azione, O = Operazione) e da un numero progressivo, in modo che a ogni riga della tabella corrisponda una sola attività, allo scopo di focalizzare con chiarezza tutti i passi del processo normativo.

Le responsabilità e le funzionalità sono legate alle rispettive azioni e operazioni. Esse rappresentano delle attività subordinate a quelle su descritte, il cui mancato rispetto

può pregiudicare parzialmente o totalmente la corretta esecuzione dell'attività a essa corrispondente. Anche le responsabilità e le funzionalità sono identificate da una sigla alfanumerica costituita dalla lettera di riferimento ( $R$  = Responsabilità,  $F$  = Funzionalità) e da un numero progressivo. Se un'azione o un'operazione presenta più responsabilità o funzionalità, allora alla lettera corrispondente ( $R$  o  $F$ ) e al numero progressivo corrispondente, fa seguito una lettera minuscola ( $a, b, c, \dots$ ). Per ogni attività sono riportati i riferimenti alle norme.

E' da notare che ogni responsabilità o funzionalità corrispondente a una generica azione  $A_J$  o operazione  $O_J$  richiama l'azione precedente  $A_{J-1}$  o l'operazione  $O_{J-1}$  di modo che nella fase di individuazione degli scenari critici, l'eseguire o meno una responsabilità o funzionalità equivarrà a non eseguire l'azione o l'operazione precedente in maniera corretta.

Nel gruppo di colonne Hardware e Liveware vengono riportati gli attori del processo che interagiscono tra loro. Per mezzo di un diagramma di flusso sono evidenziate le informazioni scambiate e soprattutto quale attore deve comunicarle o riceverle.

### FASE 3 – INDIVIDUAZIONE DEI POSSIBILI EVENTI PERICOLOSI

Questa fase richiede conoscenze e competenze approfondite sul sistema ferroviario affinché possano essere individuati tutti gli eventi pericolosi cui potrebbe essere soggetto l'intero sistema oggetto d'analisi. A tal proposito, è stata realizzata una banca dati denominata "Registro degli eventi pericolosi" (Tabella 4.1) contenente l'elenco degli eventi pericolosi individuati per un gran numero di situazioni diverse.

Gli eventi pericolosi sono classificati in funzione dei potenziali incidenti che da essi derivano. Gli eventi pericolosi che si considerano associati a un rischio accettabile non sono esaminati più a fondo e non sono elencati nella banca dati.

Le informazioni sui potenziali incidenti sono relative agli incidenti "Lievi" e "UIC" (Union International des Chemins de fer). Questi ultimi causano conseguenze ritenute significative a livello di sistema in termini di danni alle persone, alle cose (almeno 150.000 € di danni) o di interruzione del servizio (almeno 6 ore di interruzione della linea).

I dati della banca dati mantengono la suddivisione degli incidenti in (Figura 4.7):

- *tipici* (incidenti alle persone e all'infrastruttura);
- *atipici* (incidenti alle persone per materiale rotabile in movimento e quindi principalmente investimenti di persone e cadute dai treni).

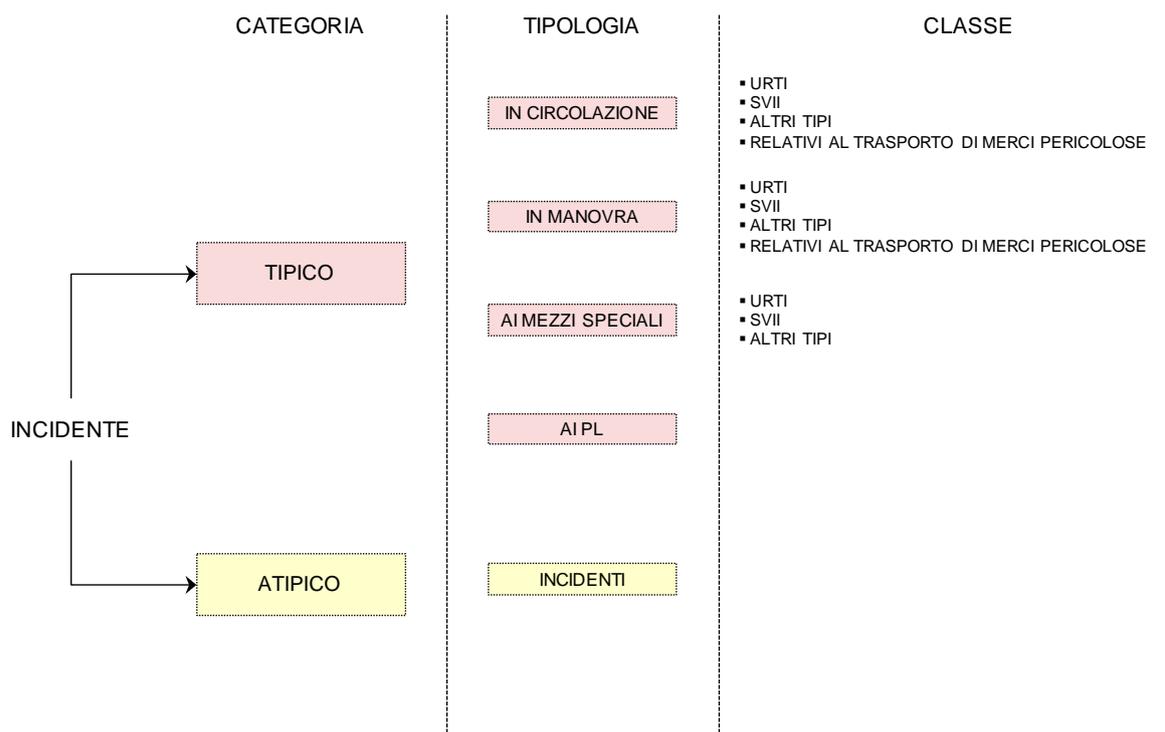
Gli incidenti tipici avvengono per responsabilità connesse con la circolazione ferroviaria e hanno come conseguenze danni a persone e all'infrastruttura, nonché interruzioni della circolazione; sono classificabili in quattro tipologie:

- incidenti in circolazione;
- incidenti in manovra;
- incidenti ai mezzi speciali;
- incidenti ai Passaggi a Livello (PL).

Ogni tipologia, a sua volta, è suddivisibile per classi più specifiche (p.e. urti, svii, altri tipi di incidenti, ecc.) e, a seconda dei danni provocati, in Lievi e UIC.

Gli incidenti atipici, solo UIC, riguardano esclusivamente le persone e sono dovute al comportamento dei viaggiatori e di terzi (p.e. incauto attraversamento di linee e di PL, cadute durante la salita o la discesa dalle carrozze dei treni, cadute dai rotabili in movimento, investimento di personale, ecc.).

Figura 4.7 - Classificazione degli incidenti.



L'utilità di considerare una diversa classificazione risiede nel fatto che può essere utile analizzare separatamente gli incidenti tipici, più direttamente legati alla gestione della sicurezza ferroviaria, dagli incidenti atipici, che spesso sono connessi al comportamento tenuto dal singolo (ferroviere, utente o estraneo al servizio ferroviario).

E' da osservare che, in applicazione della Direttiva 200/49/CE, i dati raccolti dall'UIC sono stati affiancati dai dati raccolti dall'ERA (European Rail Agency) con i cosiddetti Indicatori Comuni di Sicurezza (CSI). I CSI<sup>13</sup> sono presentati dalle Autorità Nazionali di Sicurezza (NSA) e quindi anche dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF).

<sup>13</sup> I CSI si riferiscono all'intero sistema ferroviario di ogni paese e non a singole infrastrutture, hanno il pregio di essere disponibili e di essere stati presentati da un soggetto terzo (NSA) che ha competenze specifiche e che quindi implicitamente ne fornisce un'ulteriore validazione.

Tabella 4.1 - Estratto della banca dati degli eventi pericolosi.

ID	EVENTO PERICOLOSO	POTENZIALE INCIDENTE	CATEGORIA INCIDENTE	TIPOLOGIA INCIDENTE	CLASSE INCIDENTE
25	ROTABILE FUORI SAGOMA	COLLISIONE TRA TRENO FUORI SAGOMA E ALTRO TRENO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	URTO
26	ROTABILE FUORI SAGOMA	COLLISIONE TRA TRENO FUORI SAGOMA E INFRASTRUTTURA	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	URTO
27	ROTABILE FUORI SAGOMA	COLLISIONE FRA ROTABILI IN MANOVRA	TIPICO	INCIDENTE IN MANOVRA	URTO
28	ROTABILE FUORI SAGOMA	COLLISIONE DI ROTABILI IN MANOVRA CONTRO ALTRI OSTACOLI	TIPICO	INCIDENTE IN MANOVRA	URTO
40	INDEBITA SALITA O DISCESA DA TRENO	INVESTIMENTO DI PERSONE	ATIPICO	INCIDENTE	
41	INDEBITA SALITA O DISCESA DA TRENO	CADUTE DI PERSONE DA ROTABILI IN MOVIMENTO	ATIPICO	INCIDENTE	
42	INDEBITA SALITA O DISCESA DA TRENO	DANNI A PERSONE DURANTE LA SALITA O DISCESA DAL TRENO	ATIPICO	INCIDENTE	
189	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	COLLISIONE TRA TRENI MARCIANTI NELLO STESSO SENSO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	URTO
190	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	COLLISIONE DI TRENO CONTRO TRENO FERMO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	URTO
191	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	COLLISIONE TRA TRENO E ROTABILI NON COSTITUENTI TRENO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	URTO
192	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	COLLISIONE TRA TRENO E PARAURTI	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	URTO
193	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	SVIO DI MEZZO DI TRAZIONE O ROTABILE IN COMPOSIZIONE TRENO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	SVIO
194	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	COLLISIONE TRA TRENO E MEZZO SPECIALE	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	URTO
195	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	COLLISIONE DI TRENO CON VEICOLO STRADALE AL PL	TIPICO	INCIDENTE AL PL	URTO
196	SIGNAL PASSED AT DANGER (SPAD)	TALLONAMENTO DEVIATI	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	ALTRO TIPO DI INCIDENTE
207	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	COLLISIONE FRA ROTABILI IN MANOVRA	TIPICO	INCIDENTE IN MANOVRA	URTO
208	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	COLLISIONE DI ROTABILI IN MANOVRA CONTRO PARAURTI	TIPICO	INCIDENTE IN MANOVRA	URTO
209	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	COLLISIONE DI ROTABILI IN MANOVRA CONTRO ALTRI OSTACOLI	TIPICO	INCIDENTE IN MANOVRA	URTO
210	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	SVIO DI ROTABILI IN MANOVRA	TIPICO	INCIDENTE IN MANOVRA	SVIO
211	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	TALLONAMENTO DEVIATI O SCARPA FERMACARRI	TIPICO	INCIDENTE IN MANOVRA	ALTRO TIPO DI INCIDENTE
212	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	SVIO DI MEZZO DI TRAZIONE O ROTABILE IN COMPOSIZIONE TRENO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	SVIO
213	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	COLLISIONE TRA MEZZI SPECIALI	TIPICO	INCIDENTE MEZZO SPECIALE	URTO
214	MOVIMENTI DI IMANOVRA ERRATI	COLLISIONE DI MEZZI SPECIALI CONTRO ALTRI OSTACOLI	TIPICO	INCIDENTE MEZZO SPECIALE	URTO
376	BOCCOLE CALDE O RTB CON ESITO POSITIVO	SVIO DI MEZZO DI TRAZIONE O ROTABILE IN COMPOSIZIONE TRENO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	SVIO

Fonte: Registro degli eventi pericolosi (data base realizzato ad hoc).

#### FASE 4 – INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI CRITICI

Nell'ambito della metodologia proposta, per scenario critico, si intende un insieme di "combinazioni critiche" associate a un potenziale incidente preventivamente identificato. Per combinazione critica si intende una situazione potenzialmente pericolosa che si potrebbe verificare quando una o più responsabilità (o funzionalità), definite nella fase precedente, non sono rispettate.

Una responsabilità (o funzionalità) non rispettata, pertanto, può costituire la causa di inconvenienti d'esercizio con un determinato livello di rischio; tale livello aumenta al crescere delle responsabilità non rispettate.

L'individuazione degli scenari critici consente la determinazione di tutte le ipotetiche cause e delle loro combinazioni che possono pregiudicare le condizioni di sicurezza dell'esercizio.

Nella Figura 4.8 e, a seguire, nella Figura 4.9 sono rappresentati i processi del modello di valutazione dei rischi mediante uno schema a blocchi. Per una migliore comprensione del principio di funzionamento del modello, le attività sono state numerate progressivamente.

In particolare, le attività:

- *Definizione del sistema* [1];
- *Schema procedurale* [2];
- *Registro degli eventi pericolosi* [3];
- *Individuazione possibili eventi pericolosi* [4];

sono state descritte nelle precedenti fasi 1, 2 e 3.

Poiché il rispetto o meno di una responsabilità (o funzionalità) costituisce una condizione di esercizio, è possibile affermare che si hanno tante condizioni d'esercizio quante sono le responsabilità e le funzionalità. L'insieme di queste condizioni costituisce una Combinazione (C) a cui può corrispondere una serie di potenziali conseguenze.

La condizione d'esercizio, relativa a una responsabilità (o funzionalità), può essere:

- Affermativa (A), se essa viene rispettata (Stato A);
- Negativa (N), nel caso in cui essa non venga rispettata (Stato N).

Nell'attività di *Definizione della matrice delle dipendenze* [5] vengono relazionate tra loro le responsabilità (o funzionalità). In tale matrice (Tabella 4.2), le responsabilità (o funzionalità) sono disposte sia nelle righe sia nelle colonne, tale che il generico elemento  $a_{ij}$  della matrice rappresenta la dipendenza della  $i$ -esima responsabilità (o funzionalità) posta nella riga  $i$ , dalla  $j$ -esima responsabilità (o funzionalità) posta nella colonna  $j$ .

Il generico elemento  $a_{ij}$  può assumere tre aspetti:

- D, quando esiste dipendenza diretta;
- I, quando esiste dipendenza indiretta;
- elemento vuoto, quando non esiste dipendenza.

La dipendenza tra due responsabilità (o funzionalità) è dovuta alla successione delle operazioni nello schema procedurale elaborato nella Fase 2, per cui non rispettare una generica responsabilità (o funzionalità) può significare non rispettarne un'altra successivamente.

Tabella 4.2 - Matrice delle dipendenze.

		RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'								
		F1	F2	R1	R2	---	Ri	---	Rr-1	Rr
RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'	F1									
	F2	D								
	R1	I	D							
	R2	D								
	---									
	Ri	I	I	I		D				
	---									
	Rr-1	I			I			D		
	Rr	I	I	I		D				

D = Dipendenza diretta dell'elemento della riga dall'elemento della colonna  
 I = Dipendenza indiretta dell'elemento della riga dall'elemento della colonna

A partire dalla matrice delle dipendenze, e per ogni evento pericoloso preventivamente identificato, è possibile passare all'attività di *Individuazione delle "condizioni" (m) di combinazioni di stati impossibili* [6].

L'insieme delle combinazioni di stati impossibili è costituito da tutte le combinazioni che di fatto non possono verificarsi a causa della dipendenza diretta o indiretta tra le responsabilità (o funzionalità). In particolare, se lo stato S (condizione di rispetto o di mancato rispetto) di una i-esima responsabilità (o funzionalità) è pari a:

$$S(R_i) = N$$

e supposto che la i-esima + 1 responsabilità (o funzionalità) sia direttamente dipendente dalla suddetta i-esima responsabilità (o funzionalità), allora dovrà essere:

$$S(R_{i+1}) \neq A$$

Il numero di condizioni (m) di combinazioni di stati impossibili è funzione diretta della matrice delle dipendenze. L'output dell'attività (condizioni m) è utilizzato per la *Determinazione della matrice di combinazioni di stati (impossibili) (C<sub>i</sub>)* [12] all'interno di un processo più complesso che è quello della *Determinazione delle combinazioni di stati possibili* [7]. Per determinare il numero e le combinazioni di stati possibili è stato ritenuto opportuno realizzare un programma di calcolo in Java.

Figura 4.8 - Diagramma a blocchi del Modello di valutazione dei rischi.

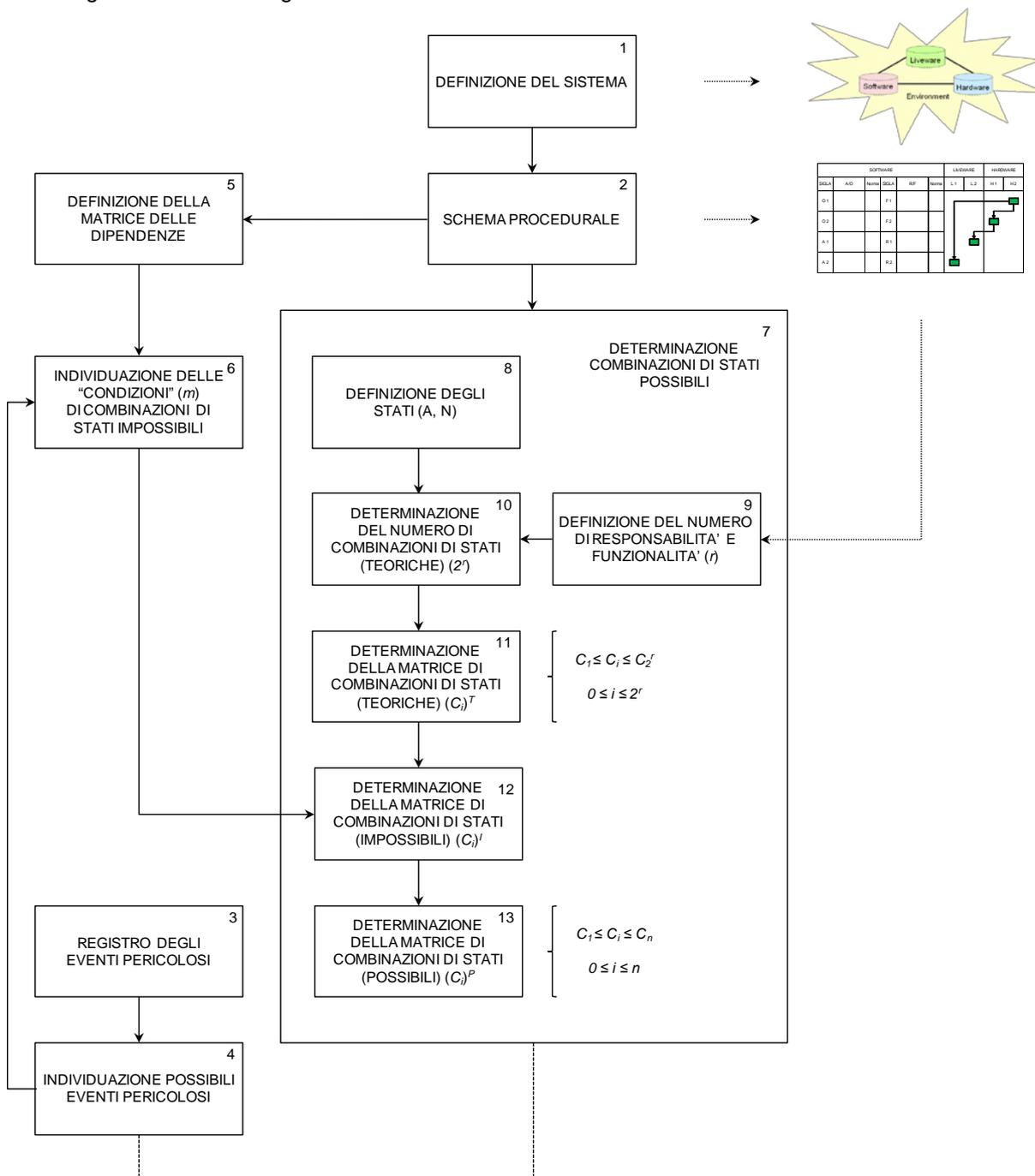
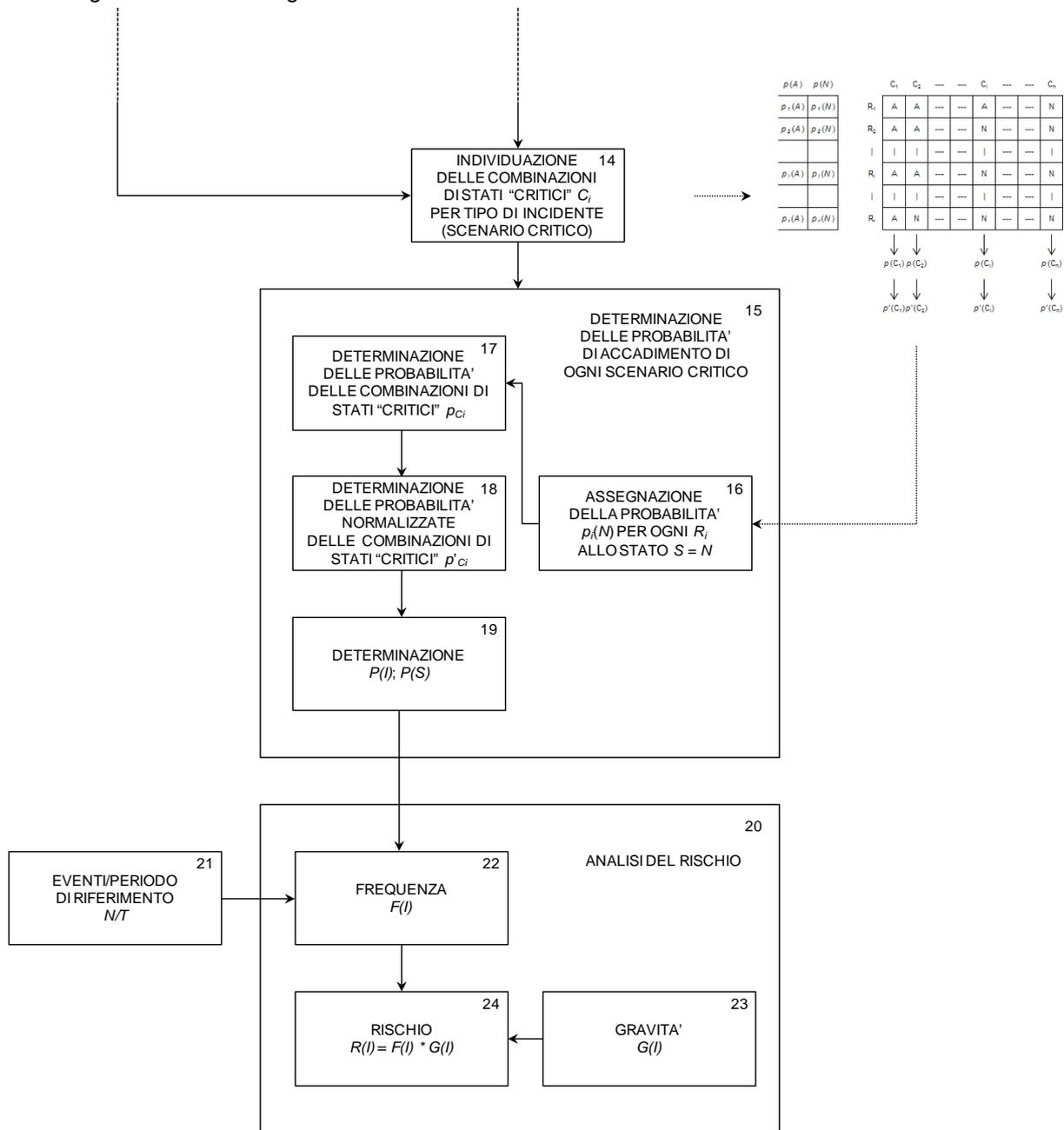


Figura 4.9 - Diagramma a blocchi del Modello di valutazione dei rischi.



La *Definizione degli stati* ( $A, N$ ) [8] e la *Definizione del numero di responsabilità e funzionalità* ( $r$ ) [9] (numero direttamente rilevabile dallo schema procedurale elaborato nella Fase 2), rappresentano gli input per la *Determinazione del numero di combinazioni di stati (teoriche)*  $2^r$  [10]. Infatti, per determinare il numero totale delle combinazioni teoriche, costituito da un numero  $r$  di responsabilità e funzionalità, si deve elevare il numero 2, relativo alle condizioni  $A$  ed  $N$ , al valore di  $r$  poiché vale il teorema del calcolo combinatorio secondo cui il numero di combinazioni di  $n$  elementi di classe  $k$  è dato da  $n^k$ , per cui si ha:

$$(C_i)^T = 2^r$$

Le attività:

- *Determinazione della matrice di combinazioni di stati (teoriche)*  $(C_i)^T$  [11];
- *Determinazione della matrice di combinazioni di stati (impossibili)*  $(C_i)^I$  [12];
- *Determinazione della matrice di combinazioni di stati (possibili)*  $(C_i)^P$  [13];

sono svolte dal programma di calcolo denominato "MatriceStati".

In particolare, per quanto riguarda la [11] e la [13], si riportano gli algoritmi di calcolo rispettivamente nella Figura 4.10 e nella Figura 4.11.

Detti:

- $A$  = stato Affermativo,  $N$  = stato Negativo;
- $R_i$  =  $i$ -esima Responsabilità/funzionalità (con  $R_1 \leq R_i \leq R_r$  e  $1 \leq i \leq r$ );
- $r$  = numerosità delle responsabilità/funzionalità;
- $C_i$  = Combinazioni di stati (possibili);

le matrici di combinazioni di stati [11], [12], [13] vengono costruite sfruttando la numerazione binaria.

La corrispondenza tra lo stato e il relativo bit binario è la seguente:

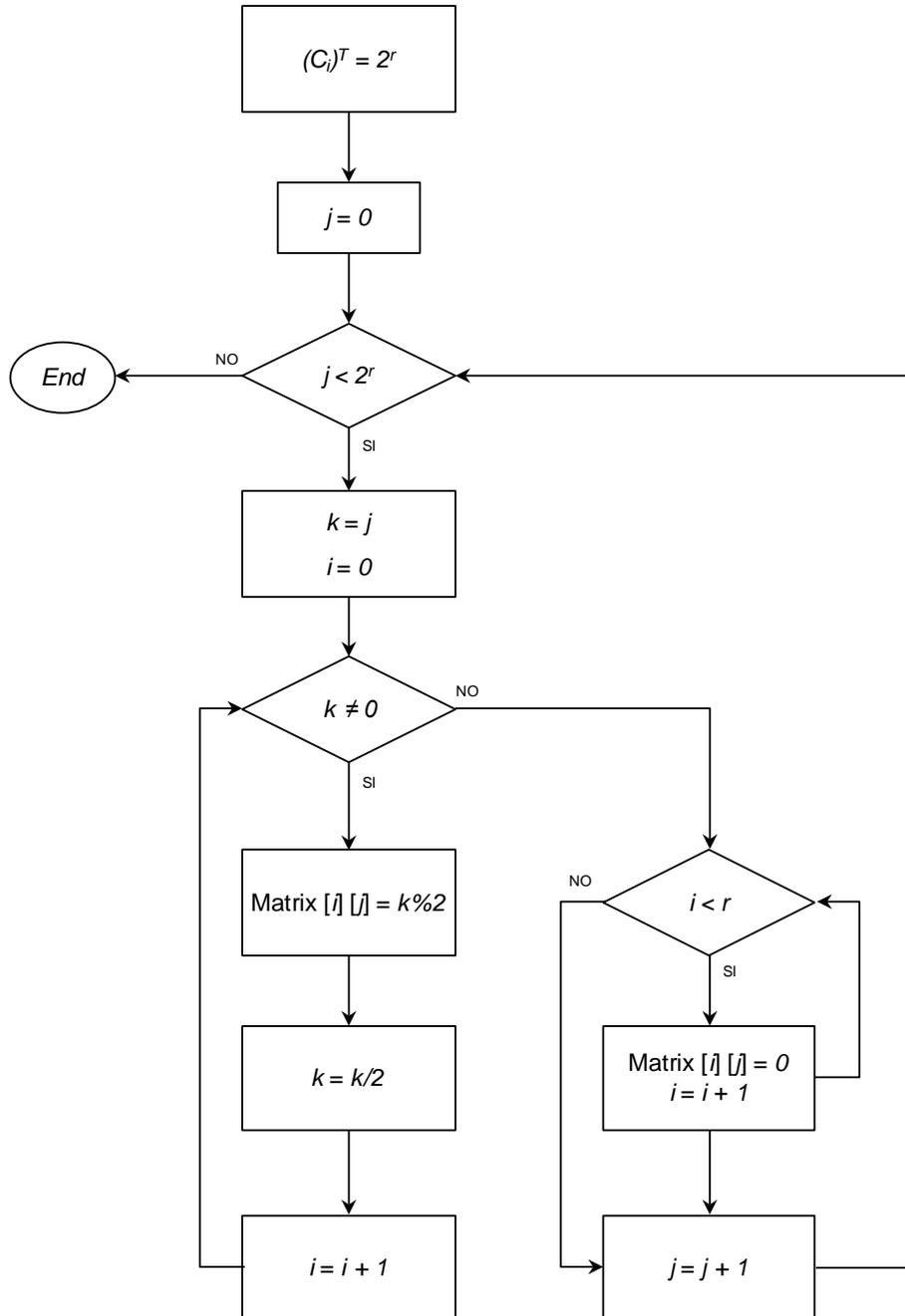
- Stato A (Affermativo)  $\rightarrow$  bit 1;
- Stato N (Negativo)  $\rightarrow$  bit 0.

Allo stato  $i$  corrisponde il numero binario  $i-1$  (gli stati partono da 1, la numerazione da 0). Il numero delle cifre da utilizzare corrisponde alla numerosità  $r$ , infatti se  $r$  è la numerosità delle responsabilità e funzionalità si avranno  $2^r$  possibili stati rappresentati da  $2^r$  numeri binari composti da  $r$  cifre (bit).

La matrice [11] è composta da  $2^r$  colonne costituite dai numeri binari a  $r$  cifre (righe) che vanno da 0 a  $2^r$ . L'algoritmo per costruire la [11] è raffigurato nella Figura 4.10.

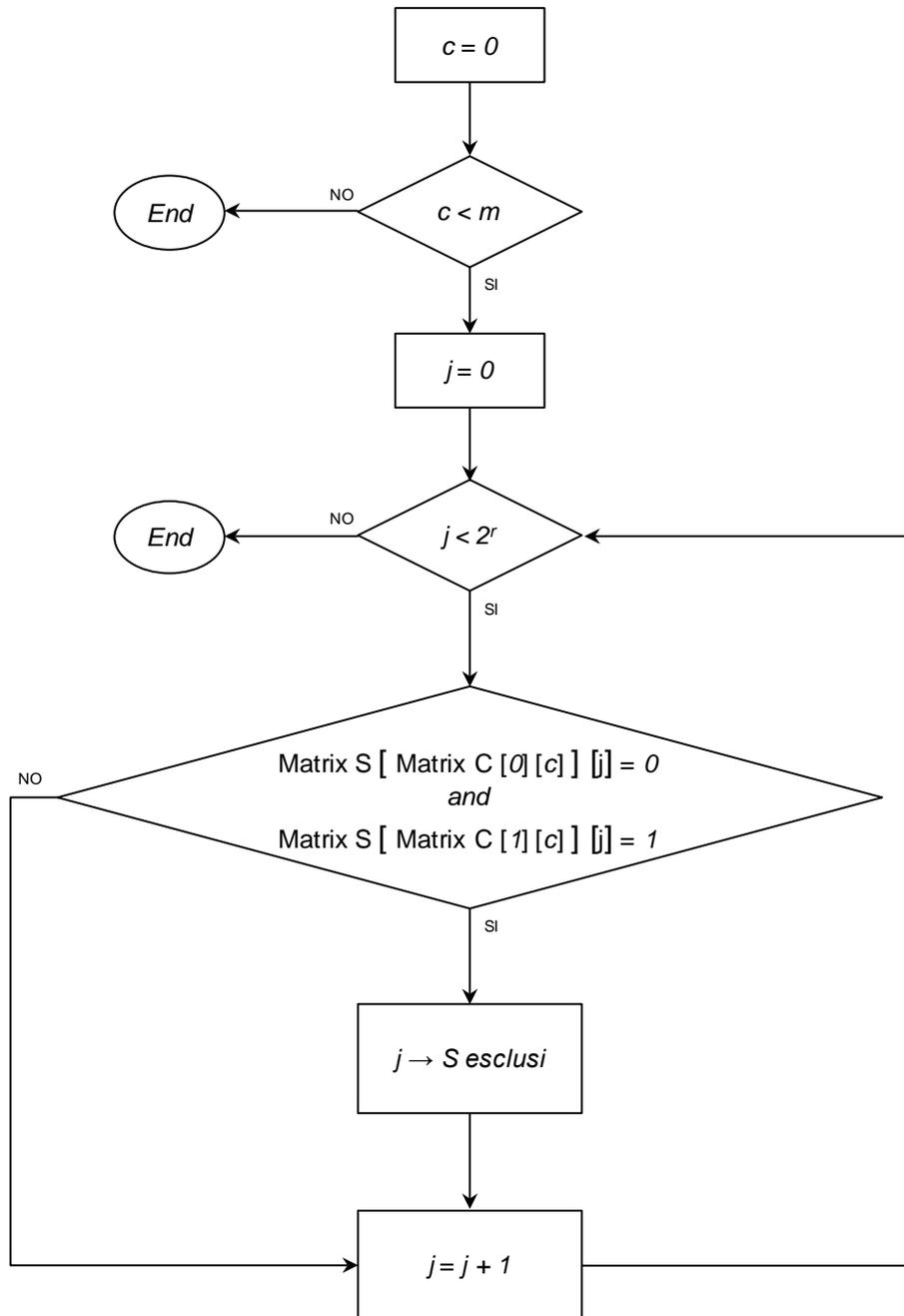
Per costruire la matrice [13], in ogni colonna della matrice è memorizzato l'indice delle responsabilità e funzionalità "if" (nella riga zero) e l'indice "then" (nella riga uno). In un vettore viene memorizzato l'indice degli stati da escludere. Il programma, per ogni condizione da verificare, effettua una scansione della matrice degli stati e controlla che non vi sia uno stato (colonna  $j$ ) da escludere; in tal caso lo stato viene aggiunto al vettore. Successivamente, viene costruita la nuova matrice escludendo gli stati contenuti nel vettore degli stati esclusi. L'algoritmo è riportato in Figura 4.11.

Figura 4.10 - Processo di determinazione delle Combinazioni di stati (teoriche).



Fonte: Sviluppato con la preziosa collaborazione dell'ing. Claudia Castaldi.

Figura 4.11 - Processo di determinazione delle Combinazioni di stati (possibili).



Fonte: Sviluppato con la preziosa collaborazione dell'ing. Claudia Castaldi.

I dati di output (combinazioni di stati) del programma MatriceStati sono in formato matriciale, elaborabili con il software Excel.

Nell'attività di "Individuazione delle combinazioni di stati "critici"  $C_i$  per tipo di incidente (scenario critico)" [14] vengono individuate, tra tutte le combinazioni di stati possibili, le cosiddette "combinazioni di stati critici" o semplicemente "combinazioni critiche" le quali, associate a ogni potenziale incidente preventivamente identificato, costituiscono i cosiddetti "scenari critici".

E' stato definito scenario critico relativo a un potenziale incidente, l'insieme delle combinazioni critiche. Una combinazione di responsabilità (o funzionalità) viene ritenuta critica quando comporta per un dato incidente la possibilità che questo si verifichi.

Per definire completamente uno scenario critico vengono elaborate le matrici delle combinazioni critiche, ottenute dalle matrici di combinazioni di stati possibili.

Poiché tra una responsabilità (o funzionalità) e un potenziale incidente esiste una relazione quando il mancato rispetto dell'una provoca il verificarsi dell'altro, questo legame è rappresentato mediante un'ulteriore matrice. Tale matrice presenta sulle righe i potenziali incidenti preventivamente identificati e sulle colonne le responsabilità (o funzionalità), tale che nel generico elemento  $a_{ij}$  è possibile avere tre entità diverse:

- elemento vuoto;
- c.n.;
- x.

L'elemento vuoto significa che l'i-esimo potenziale incidente non è condizionato dalla j-esima responsabilità (o funzionalità). La sigla c.n. si ha quando affinché si verifichi l'i-esimo potenziale incidente è condizione necessaria che la j-esima responsabilità (o funzionalità) non sia rispettata.

La sigla x significa che la j-esima responsabilità (o funzionalità) non rispettata può scatenare l'i-esimo potenziale incidente.

La "Determinazione delle probabilità di accadimento di ogni scenario critico" [15] richiede l' "Assegnazione della probabilità  $p_i(N)$ , per ogni  $R_i$ , allo stato  $S = N$ " [16].

Detti:

- $p_i(N)$  = probabilità assegnata allo stato  $S = N$  della  $R_i$  (non rispettata);
- $p_i(A) = 1 - p_i(N)$  = probabilità dello stato  $S = A$  della  $R_i$  (rispettata);
- $p_{C_i}$  = probabilità associata alla combinazione di stati  $C_i$ ;
- $p'_{C_i}$  = probabilità normalizzata associata alla combinazione di stati  $C_i$ ;
- $P(I)$  = Probabilità di accadimento dello scenario critico (I);
- $P(S)$  = Probabilità di non accadimento dello scenario critico (I);

con

$$0 \leq p_i(N) \leq 1$$

la “Determinazione delle probabilità delle combinazioni di stati “critici”  $p_{C_i}$ ” [17] avviene facendo il prodotto di tutte le  $p_i$  associate a tutte le  $R_i$  per ogni  $C_i$ :

$$p_{C_i} = \prod_{i=1}^r p_i(S)$$

Mentre la “Determinazione delle probabilità normalizzate delle combinazioni di stati “critici”  $p'_{C_i}$ ” [18] avviene facendo il rapporto tra ogni  $p_{C_i}$  e la somma di tutte le  $p_{C_i}$  relative a tutte le  $C_i$ :

$$p'_{C_i} = \frac{p_{C_i}}{\sum_{i=1}^n p_{C_i}} = \frac{\prod_{i=1}^r p_i(S)}{\sum_{i=1}^n (\prod_{i=1}^r p_i(S))}$$

con  $0 \leq p'_{C_i} \leq 1$  tale che  $\sum_{i=1}^n p'_{C_i} = 1$

La “Determinazione  $P(I); P(S)$ ” [19], ovvero delle probabilità di accadimento dello scenario critico ( $I$ ) e dello svolgimento in sicurezza dei processi, è data da:

$$P(I) = \sum_{j=1}^{cc} (p'_{C_i})_j$$

con  $cc = n - cnc$ , e

$$P(S) = \sum_{j=1}^{cnc} (p'_{C_i})_j$$

tale che:

$$P(I) + P(S) = 1$$

Il termine  $n$  rappresenta il numero di combinazioni di stati possibili,  $cc$  il numero di combinazioni di stati critici e  $cnc$  il numero di combinazioni di stati non critici.

Per quanto riguarda l’assegnazione della probabilità  $p_i(N)$  allo stato  $S = N$ , per ogni  $R_i$ , essa tiene conto del fatto che ogni  $R_i$  sia una responsabilità (legata alla componente umana) oppure una funzionalità (legata alla componente tecnologica).

La metodologia tiene conto del comportamento umano (Tabella 4.3) e del cosiddetto SIL (Tabella 4.4).

Tabella 4.3 - Tecnica empirica per la stima degli errori degli operatori (TESEO).

Modello TESEO
<p>In letteratura sono presenti varie tecniche per l'analisi dell'affidabilità umana, volte all'analisi del rischio da lavoro derivante dall'errore umano. Tali tecniche sono nate per andare incontro alle esigenze dell'analisi probabilistica del rischio al fine di quantificare il contributo dell'errore umano al verificarsi di un incidente. In quest'ottica, l'approccio dell'analisi dell'affidabilità umana, può essere visto come una specializzazione dell'analisi probabilistica del rischio sui fattori rilevanti dell'affidabilità umana, approccio che fornisce una valutazione più dettagliata dei rischi inerenti il sistema associati al fattore umano. Un'analisi probabilistica del rischio identifica tutti i rischi, compresi gli errori umani, a cui il sistema è esposto, dandone una stima quantitativa.</p> <p>La Tecnica Empirica per la Stima degli Errori degli Operatori (TESEO) è un esempio di modello a indici di semplice e immediata applicazione, orientato alla valutazione delle probabilità di errore dell'operatore addetto al controllo di un sistema complesso.</p> <p>Il metodo TESEO determina la probabilità di errore <math>p_i(N)</math> dell'operatore tramite il prodotto di cinque fattori, ciascuno caratterizzante un aspetto del sistema (uomo, impianto, ambiente, ecc.):</p> $p_i(N) = k_1 * k_2 * k_3 * k_4 * k_5$ <p>dove:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>k_1</math> è il fattore relativo al tipo di attività che quantifica il grado di routine; se l'attività è abituale per il lavoratore la probabilità di un possibile errore che porta a infortunio tende a essere bassa;</li> <li>▪ <math>k_2</math> è il fattore di stress legato al tempo necessario per svolgere l'attività (di routine e non di routine) e al tempo disponibile; un aumento di stress tende a tradursi in maggiore possibilità di errore;</li> <li>▪ <math>k_3</math> è il fattore relativo al tipo di operatore assegnato in conseguenza al livello occupazionale, al grado di esperienza e alla formazione; una maggiore esperienza lavorativa comporta una riduzione della possibilità d'errore;</li> <li>▪ <math>k_4</math> è il fattore di ansietà relativo all'attività dipendente dalla situazione lavorativa, da una grave emergenza, da un'emergenza potenziale o da condizioni non effettive, ma possibili;</li> <li>▪ <math>k_5</math> è il fattore che tiene conto delle condizioni ambientali e dell'ergonomia delle attrezzature e apparecchiature con cui l'operatore entra in contatto.</li> </ul> <p>I cinque fattori rappresentano in sostanza dei Fattori che Strutturano la Prestazione (PSF), suddivisi in tre categorie principali:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>fattori esterni</i>, nei quali sono inserite le caratteristiche fisiche dell'ambiente lavorativo, le procedure richieste e le informazioni a disposizione e la qualità dell'interfaccia uomo-macchina;</li> <li>▪ <i>fattori interni</i>, che indicano caratteristiche personali dell'operatore individuale, le abilità, l'esperienza, la motivazione e le aspettative;</li> <li>▪ <i>fattori di stress</i>, che raccolgono il tipo e la consistenza degli elementi stressanti che è possibile siano presenti all'interno di situazioni diverse.</li> </ul> <p>Se risulta <math>p_i(N) &gt; 1</math>, allora si assume <math>p_i(N) = 1</math>.</p>

**Valori dei fattori del modello TESEO**

Di seguito, vengono riportate le tabelle con i valori dei fattori per l'applicazione del modello TESEO.

**Tipo di attività (fattore  $k_1$ )**

Tipo di attività		$k_1$
	Semplice, di routine	0,001
	Di routine, richiede attenzione	0,01
	Non di routine	0,1

**Stress (fattore  $k_2$ )**

Tempo a disposizione per attività (sec)		$k_2$
di routine	2	10
	10	1
	20	0,5
non di routine	3	10
	30	1
	45	0,3
	60	0,1

**Tipo di operatore (fattore  $k_3$ )**

Qualità dell'operatore		$k_3$
	Selezionato con cura, esperto e ben addestrato	0,5
	Conoscenze e addestramento medio	1
	Conoscenza e addestramento scarso	3

**Ansietà (fattore  $k_4$ )**

Stato di ansietà		$k_4$
	Situazione di non routine	3
	Situazione di emergenza	2
	Situazione di routine	1

**Condizioni ambientali (fattore  $k_5$ )**

Microclima / Interfaccia con l'impianto		$k_5$
	Ottimo / Ottima	0,7
	Buono / Buona	1
	Discreto / Discreta	3
	Discreto / Scadente	7
	Cattivo / Scadente	10

**Valori dei fattori del modello TESEO**

Di seguito, vengono riportate le probabilità di errore  $p_i(N)$  tipiche dell'Operatore (PdC, PdA, PdT, CT, ecc.) e del Dirigente ferroviario (DM, DC, DCO, ecc.).

Operatore (PdC, PdA, PdT, CT, ecc.)  $p_i(N) = 0,005000$

Dirigente (DM, DC, DCO, ecc.)  $p_i(N) = 0,000175$

**Tipo di attività (fattore  $k_1$ )**

Tipo di attività		$k_1$
	Semplice, di routine	0,001
	Di routine, richiede attenzione	0,01
	Non di routine	0,1

**Tipo di attività (fattore  $k_1$ )**

Tipo di attività		$k_1$
	Semplice, di routine	0,001
	Di routine, richiede attenzione	0,01
	Non di routine	0,1

**Stress (fattore  $k_2$ )**

Tempo a disposizione per attività (sec)		$k_2$
di routine	2	10
	10	1
	20	0,5
non di routine	3	10
	30	1
	45	0,3
	60	0,1

**Stress (fattore  $k_2$ )**

Tempo a disposizione per attività (sec)		$k_2$
di routine	2	10
	10	1
	20	0,5
non di routine	3	10
	30	1
	45	0,3
	60	0,1

**Tipo di operatore (fattore  $k_3$ )**

Qualità dell'operatore		$k_3$
	Selezionato con cura, esperto e ben addestrato	0,5
	Conoscenze e addestramento medio	1
	Conoscenza e addestramento scarso	3

**Tipo di operatore (fattore  $k_3$ )**

Qualità dell'operatore		$k_3$
	Selezionato con cura, esperto e ben addestrato	0,5
	Conoscenze e addestramento medio	1
	Conoscenza e addestramento scarso	3

**Ansietà (fattore  $k_4$ )**

Stato di ansietà		$k_4$
	Situazione di non routine	3
	Situazione di emergenza	2
	Situazione di routine	1

**Ansietà (fattore  $k_4$ )**

Stato di ansietà		$k_4$
	Situazione di non routine	3
	Situazione di emergenza	2
	Situazione di routine	1

**Condizioni ambientali (fattore  $k_5$ )**

Microclima / Interfaccia con l'impianto		$k_5$
	Ottimo / Ottima	0,7
	Buono / Buona	1
	Discreto / Discreta	3
	Discreto / Scadente	7
	Cattivo / Scadente	10

**Condizioni ambientali (fattore  $k_5$ )**

Microclima / Interfaccia con l'impianto		$k_5$
	Ottimo / Ottima	0,7
	Buono / Buona	1
	Discreto / Discreta	3
	Discreto / Scadente	7
	Cattivo / Scadente	10

Fonte: Vestrucchi P. – Modelli per la valutazione dell'affidabilità umana – F. Angeli, Milano, 1990.

Tabella 4.4 - Livelli di Integrità della Sicurezza (SIL).

Generalità
<p>I sistemi elettronici, in generale, presentano un determinato grado di criticità. Nell'ambito ferroviario, la progettazione, la realizzazione e l'utilizzo di tali sistemi devono conformarsi a criteri che assicurino il raggiungimento dei requisiti di sicurezza, cioè una probabilità sufficientemente bassa del verificarsi di situazioni di rischio.</p> <p>A differenza di altri settori applicativi, questi criteri sono espressi in normative e standard volti a specificare le fasi di:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ progettazione e implementazione;</li><li>▪ verifica e validazione.</li></ul> <p>Gli standard europei CENELEC EN 50126 e EN 50129 hanno introdotto un approccio probabilistico nelle tecnologie ferroviarie. Un metodo efficace e internazionalmente accettato per garantire e dimostrare il livello di affidabilità di un dispositivo, sistema o impianto con applicazioni di sicurezza, ovvero con rischi per l'uomo e l'ambiente, è la classificazione SIL (Safety Integrity Level) dei sistemi di sicurezza e la certificazione dei suoi componenti in conformità con la IEC 61508.</p> <p>La norma IEC 61508 definisce quattro livelli di SIL, da 1 a 4, ciascuno dei quali definisce una misura quantitativa della necessaria riduzione del rischio e quindi il grado di affidabilità che il sistema di sicurezza deve raggiungere per poter garantire tale riduzione. È di carattere generale, applicabile a tutti i sistemi correlati alla sicurezza indipendentemente dall'applicazione (trasporti, produzione, ecc). La norma copre tutte le fasi di vita del sistema di sicurezza, dalla fase di progetto a quella di esercizio e manutenzione fino allo smaltimento e si applica a tutti i sistemi di sicurezza in cui almeno una delle componenti incorpori dispositivi elettrici, elettronici o elettronici programmabili.</p> <p>All'interno di un determinato sistema esistono numerose funzioni di sicurezza ciascuna delle quali relativa a un determinato pericolo a cui è associato un appropriato SIL. L'insieme delle componenti (e non queste prese singolarmente) di ogni sistema di sicurezza deve rispettare la classe SIL prevista.</p>
Livelli di Integrità della Sicurezza (SIL)
<p>Negli standard dell'European Functional Safety sono definiti quattro livelli SIL, di cui SIL4 rappresenta il sistema più affidabile e SIL1 il meno affidabile.</p> <p>Per decidere la classe di SIL a cui il dispositivo appartiene, si calcola l'indice PFD (Probability of Failure on Demand), la probabilità che il sistema di sicurezza fallisca l'intervento in caso di necessità. Per ottenere un livello SIL elevato, l'indice PFD deve essere più basso possibile.</p> <p>SIL1: questo livello include sistemi che devono avere alta affidabilità, ma che non sono critici. Tali sistemi richiedono un alto livello di controllo.</p> <p>SIL2: questo livello include sistemi che sono, in qualche modo, critici e devono avere una dimostrazione che tutti i tipi di fallimenti sono stati controllati. Si deve applicare</p>

almeno un FSS (Fault Spanning Set è un insieme di uno o più metodi che hanno le potenzialità di rilevare tutti i fallimenti in un sistema che è sotto collaudo).

SIL3: questo livello include sistemi che sono mission-critical o safety-critical. In questo caso è richiesto un grado di affidabilità molto alto, quindi è applicato il principio della ridondanza. In altre parole, si usano almeno due FSS indipendenti per controllare la presenza di qualsiasi tipo di fallimento.

SIL4: questo livello include sistemi che sono safety-critical. In questo caso devono essere usati almeno tre FSS indipendenti per controllare la presenza di qualsiasi tipo di fallimento.

Di seguito sono rappresentati i livelli SIL con le rispettive misure (i valori sono desunti dagli standard ICE e ANSI/ISA, quest'ultimo non rappresenta il livello SIL 4).

SIL	Availability	PFD <sub>avg</sub>	PFH	RRF
1	da ≥ 90% a < 99%	da ≥ 10 <sup>-2</sup> a < 10 <sup>-1</sup>	da ≥ 10 <sup>-6</sup> a < 10 <sup>-5</sup>	da > 10 a ≤ 100
2	da ≥ 99% a < 99,9%	da ≥ 10 <sup>-3</sup> a < 10 <sup>-2</sup>	da ≥ 10 <sup>-7</sup> a < 10 <sup>-6</sup>	da > 100 a ≤ 1000
3	= 99,9%	da ≥ 10 <sup>-4</sup> a < 10 <sup>-3</sup>	da ≥ 10 <sup>-8</sup> a < 10 <sup>-7</sup>	da > 1000 a ≤ 10000
4	> 99,9%	da ≥ 10 <sup>-5</sup> a < 10 <sup>-4</sup>	da ≥ 10 <sup>-9</sup> a < 10 <sup>-8</sup>	da > 10000 a ≤ 100000

ove:

- *Availability* (disponibilità), è la probabilità che il dispositivo svolga il suo compito;
- PFD<sub>avg</sub> (*Probability of Failure on Demand average* ovvero probabilità di malfunzionamenti su richiesta) e PFH (*Probability of Failure per Hour* ovvero probabilità di malfunzionamenti per ora), sono indici che vengono calcolati come rapporto tra rischio massimo tollerabile e rischio legato al sistema non protetto;
- RRF (Risk Reduction Factor ovvero fattore di riduzione del rischio), è il reciproco del PFD<sub>avg</sub>.

## SIL 0

Nella norma IEC 61508 sono definiti soltanto quattro livelli SIL. Anche la norma EN 50126 suggerisce quattro livelli. Soltanto le norme 50128 e 50129 allargano il concetto al SIL0, definito come un livello senza richieste specifiche di sicurezza.

Al SIL0 sono assegnati sistemi che in qualche modo sono legati alla sicurezza come, ad esempio, sistemi d'illuminazione nelle gallerie in caso di fermata del treno, sistemi d'informazione ai passeggeri in caso di emergenza, ecc. Sono tipicamente misure usate per ridurre le conseguenze di un incidente, ma che non influenzano il livello di frequenza. Questo livello di standard SIL viene usato solo nel campo delle ferrovie.

Fonte: Elaborazione sulla base di diversi documenti consultati.

#### FASE 5: ANALISI DEI LIVELLI DI RISCHIO DEGLI SCENARI CRITICI

L'analisi di rischio dipende dall'accuratezza con cui vengono identificati i rischi di base per il sistema. Questo è il primo e il più importante passo dell'intero processo. Ogni aspetto in esame deve essere esaminato accuratamente. Per un'efficace analisi, è opportuno tener conto della natura del sistema.

In un modello bidimensionale, come descritto nel § 2.4, i parametri che costituiscono il rischio sono:

- la probabilità o la frequenza ( $f$ ) dell'evento incidentale con possibili effetti;
- la magnitudo o gravità delle conseguenze ( $g$ ) dell'evento incidentale.

Per un determinato scenario critico ( $I$ ) (insieme di "combinazioni critiche" associate a un potenziale incidente preventivamente identificato), l'equazione matematica, che descrive il rischio associato allo scenario stesso, è data dalla seguente espressione:

$$R(I) = F(I) * G(I)$$

ove

$F(I)$  è la frequenza di accadimento dello scenario critico ( $I$ );

$G(I)$  è la gravità delle conseguenze associata allo scenario critico ( $I$ ).

Per ridurre l'ambiguità della terminologia utilizzata nell'analisi qualitativa del rischio è necessario definire quantitativamente i termini frequenza e gravità delle conseguenze.

#### FREQUENZA

La probabilità è una componente fondamentale da tenere in considerazione nell'analisi di rischio, infatti, se un determinato evento avverso ci si attende che non si verifichi in un periodo di tempo rilevante allora il suo impatto non ha bisogno di essere analizzato.

La probabilità  $P(I)$  di accadimento dello scenario critico ( $I$ ) (valore compreso tra zero e uno, dove "zero" rappresenta un risultato impossibile, "uno" un risultato certo) determinata nella precedente Fase 4, è espressa, generalmente, come rapporto tra il numero di occorrenze  $A(I)$  e il numero totale di eventi pericolosi ( $N$ ):

$$P(I) = \frac{A(I)}{N}$$

mentre la frequenza  $F(I)$  di accadimento dello scenario critico ( $I$ ) è espressa, generalmente, come rapporto tra il numero di occorrenze  $A(I)$  e l'unità di tempo o periodo di riferimento ( $T$ ):

$$F(I) = \frac{A(I)}{T}$$

Da quanto sopra esposto, deriva che la frequenza  $F(I)$  può essere espressa in funzione della probabilità  $P(I)$ :

$$F(I) = P(I) * \frac{N}{T}$$

dove  $N/T$  esprime il numero totale di eventi pericolosi relativi al periodo di riferimento.

Poiché il modello fornisce, come dato di output, la probabilità  $P(I)$  di accadimento dello scenario critico ( $I$ ), conosciuto il rapporto  $N/T$  (o frequenza dell'evento pericoloso) è possibile determinare la frequenza  $F(I)$  di accadimento dello scenario critico ( $I$ ), utilizzata per determinare il livello di rischio.

Tabella 4.5 - Scala delle categorie di frequenza.

FREQUENZA [Evento/Anno]			
CATEGORIA	CLASSE	DEFINIZIONE (Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i.)	INTERVALLO (CENELEC EN 50126-2)
Inverosimile	I	Estremamente improbabile che si verifichi. Si assume che esso non possa verificarsi.	$f < 0,005$
Improbabile	II	Improbabile che si verifichi ma possibile. Si assume che l'evento pericoloso può eccezionalmente verificarsi.	$0,005 \leq f < 0,029$
Remoto	III	Probabile che si verifichi qualche volta durante la vita del sistema. Si prevede ragionevolmente che l'evento pericoloso possa verificarsi.	$0,029 \leq f < 0,14$
Occasionale	IV	Probabile che si verifichi molte volte. Si prevede che l'evento si verificherà molte volte.	$0,14 \leq f < 0,67$
Probabile	V	Si verificherà molte volte. Si prevede che l'evento pericoloso si verificherà spesso.	$0,67 \leq f < 4$
Frequente	VI	Probabile che si verifichi di frequente. L'evento pericoloso si verificherà continuamente.	$f \geq 4$

Fonte: Elaborazione su base dati Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i. e CENELEC EN 50126-2.

Nell'ambito della metodologia proposta, i livelli di frequenza (Tabella 4.5) sono espressi secondo le seguenti categorie:

- Inverosimile<sup>14</sup>;
- Improbabile;
- Remoto;
- Occasionale;
- Probabile;
- Frequente.

<sup>14</sup> Dalla definizione data dalla Disposizione n. 51/2007 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 12/11/2007 "Modifiche alla Disposizione del Gestore dell'Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001 e successive modifiche", risulta che "un pericolo può essere considerato inverosimile solo qualora non si sia mai verificato, nel sistema e nel contesto presi in considerazione o in altri assimilabile".

A ogni categoria corrisponde una delle sei classi numerate dalla I alla VI; una definizione qualitativa ripresa dalla Disposizione n. 13/2001 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 26/06/2001 “Requisiti per l’adozione, da parte delle Imprese Ferroviarie e della Divisione Infrastruttura, di un sistema di gestione della sicurezza - Safety Management System” e s.m.i.; un intervallo quantitativo relativo al numero di eventi incidentali/anno. I valori relativi sono ripresi dalla norma standard EN 50126-2 “Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filotranviarie, metropolitane – La specificazione e la dimostrazione di Affidabilità, Disponibilità, Manutenibilità e Sicurezza (RAMS) – Parte 2: Guida all’applicazione della Norma EN 50126-1 per la sicurezza”.

In particolare, per le definizioni di Inverosimile, Improbabile, Remoto, Occasionale, Probabile e Frequente, la Disposizione n. 13/2001 di RFI fa riferimento alla norma CENELEC EN 50126 apportando modifiche così come riportate nella Tabella 4.5.

Inoltre, la Disposizione n. 13/2001 di RFI afferma che *“la stima della frequenza di accadimento dei pericoli può essere ricavata dai dati disponibili relativi a prestazioni di sicurezza e incidenti”* e ancora *“la stima della probabilità di accadimento di un pericolo viene valutata ..... sulla base dei dati storici disponibili, presupponendo che le condizioni future siano analoghe a quelle verificatesi nel passato; qualora non sia possibile utilizzare dati storici, tale stima può essere ottenuta attraverso metodologie analitiche di calcolo”*.

Per ogni classe di frequenza è possibile prendere in considerazione quanto segue:

- Classe I → Frequenza pari a un evento incidentale ogni più di 200 anni;
- Classe II → Frequenza pari a un evento incidentale ogni  $35 \div 200$  anni;
- Classe III → Frequenza pari a un evento incidentale ogni  $7 \div 35$  anni;
- Classe IV → Frequenza pari a un evento incidentale ogni  $1\frac{1}{4} \div 7$  anni;
- Classe V → Frequenza pari a un evento incidentale ogni  $3 \div 15$  mesi;
- Classe VI → Frequenza pari a un evento incidentale ogni meno di 3 mesi.

Bisogna osservare che il verificarsi di uno scenario non comporta necessariamente un danno rilevante. Inoltre, i fattori importanti da considerare nella determinazione della frequenza relativa a un pericolo che porta a un esito negativo sono:

1. le circostanze necessarie per l’insorgenza o la presenza del pericolo;
2. le circostanze necessarie per il verificarsi di un esito negativo;
3. l’effettivo verificarsi e la gravità degli esiti sfavorevoli;
4. la persistenza o la diffusione di un risultato negativo.

#### **GRAVITA’ DELLE CONSEGUENZE**

La gravità  $G(I)$  delle conseguenze associata allo scenario critico ( $I$ ) è esaminata a diversi livelli. Per esempio, un danno all’essere umano è di solito considerato a livello di individuo, mentre un danno all’ambiente è di solito considerato a livello di popolazioni, specie o comunità. Per lo stesso evento incidentale la gravità delle conseguenze può avere dimensioni e distribuzione diverse, ovvero la risposta all’evento può variare da danni lievi a danni gravi, con la risposta più comune compresa tra questi due estremi.

Come nel caso della frequenza, nell'ambito della metodologia proposta, i livelli di gravità delle conseguenze (Tabella 4.6) sono espressi secondo le seguenti categorie:

- Insignificante;
- Marginale;
- Critico;
- Catastrofico<sup>15</sup>.

Nella Tabella 4.6 sono riportati i 4 livelli di gravità delle conseguenze con le relative classi e definizioni quali - quantitative della Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i. e, della Direttiva 2009/149/CE.

Tabella 4.6 - Scala dei livelli di gravità delle conseguenze.

GRAVITA' [Numero decessi, numero feriti gravi, danni economici significativi, interruzione esercizio]			
LIVELLO	CLASSE	DEFINIZIONE (Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i.)	DEFINIZIONE (Direttiva 2009/149/CE)
Insignificante	I	Danno leggero al sistema.	
Marginale	II	Ferimento leggero di una o più persone e/o importante minaccia per l'ambiente e un danno grave ad uno o più sistemi.	< 1, < 1, < 150.000 €, < 6 h
Critico	III	Lesione grave di una persona e/o importante danno all'ambiente e/o perdita del sistema principale.	
Catastrofico	IV	Morte di una o più persone, ferimento grave di più di una persona o danni ingenti all'ambiente.	≥ 1, ≥ 1, ≥ 150.000 €, 6 h

Fonte: Elaborazione su base dati Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i. e Direttiva 2009/149/CE.

Per le definizioni di Insignificante, Marginale, Critico e Catastrofico, la Disposizione n. 13/2001 di RFI fa riferimento alla norma CENELEC EN 50126 apportando modifiche e considerando che *“la stima della gravità di un pericolo viene valutata ....., misurando il valore economico dei danni apportati a persone, beni, costi di bonifica e impatto ambientale, sia come valore medio basato sull'esperienza diretta dell'IF in un intervallo di tempo definito, sia come stima di un intervallo”*. La Direttiva 2009/149/CE, invece, definisce i valori quantitativi per il solo livello Catastrofico:

- *“Decesso”*, qualsiasi persona uccisa immediatamente o entro 30 giorni a seguito di un incidente, esclusi i suicidi;
- *“Ferito grave”*, qualsiasi ferito ricoverato in ospedale per più di 24 ore a seguito di un incidente, esclusi i tentativi di suicidio;
- *“Danno significativo a materiale, binari, altri impianti o all'ambiente”*, i danni quantificabili in 150.000 euro o più;
- *“Interruzione prolungata del traffico”*, quando i servizi ferroviari su una linea principale sono sospesi per 6 ore o più.

<sup>15</sup> La Direttiva 2009/149/CE della Commissione del 27 novembre 2009 che modifica la Direttiva 2004/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda gli indicatori comuni di sicurezza e i metodi comuni di calcolo dei costi connessi agli incidenti, definisce *“Incidente grave”*, qualsiasi incidente che coinvolge almeno un veicolo ferroviario in movimento e causa almeno un decesso o un ferito grave, danni significativi a materiale, binari, altri impianti o all'ambiente oppure un'interruzione prolungata del traffico. Sono esclusi gli incidenti nelle officine, nei magazzini o nei depositi.

Dal confronto diretto delle definizioni date dalle suddette normative, risulta che per la Disposizione n. 13/2001 di RFI “sono conseguenze critiche la lesione grave di una persona e/o importante danno all’ambiente e/o la perdita di un sistema principale. Sono conseguenze catastrofiche la morte di una o più persone, il ferimento grave di più di una persona o danni ingenti all’ambiente” mentre per la Direttiva 2009/149/CE è sufficiente un ferito grave per classificare il livello di gravità come Catastrofico.

Nel valutare le conseguenze negative derivanti da un pericolo, è importante distinguere i cambiamenti che possono verificarsi in assenza del pericolo dai cambiamenti che si verificano come conseguenza del pericolo ed è importante valutare se questo cambiamento è indesiderabile. Inoltre, questi cambiamenti possono variare a seconda del contesto ambientale (p.e. un ambiente disabitato rispetto a un ambiente densamente abitato).

Indipendentemente dai fattori di rischio, le conseguenze sull’essere umano possono essere classificati secondo le principali categorie definite dalla sicurezza.

Come nel caso della frequenza, la gravità delle conseguenze può essere classificata in diverse classi, come segue (per le sole persone):

- Classe I → Gravità senza ferimento (non sono necessarie cure mediche);
- Classe II → Gravità con ferimento leggero (solo cure mediche);
- Classe III → Gravità con ferimento (ospedalizzazione < 24 h);
- Classe IV → Gravità con decesso o con ferimento grave.

E’ importante, in ogni caso, tener conto di alcuni fattori tra cui la variazione e la distribuzione della gravità delle conseguenze. La gravità delle conseguenze di ogni incidente ha un impatto negativo in termini di:

1. *numero, grandezza, gravità, ampiezza o scala* (Quanto è grave l’impatto? Ha provocato un grande cambiamento rispetto alle condizioni di base? Ha causato un rapido tasso di cambiamento e/o grandi cambiamenti nel corso di un breve periodo di tempo? Ha effetti a lungo termine? Il cambiamento che genera è accettabile?);
2. *estensione spaziale*;
3. *estensione temporale*; ovvero durata, natura e frequenza nel tempo (E’ intermittente? E’ ripetitivo?);
4. *reversibilità*; ossia tempo necessario per mitigare l’impatto negativo (È reversibile e, se sì, può essere invertita nel breve o lungo termine?).

Definita la frequenza di accadimento dello scenario critico secondo le definizioni e gli intervalli contenuti nella Tabella 4.5, la valutazione del livello di rischio può essere effettuata mediante l’uso della *Matrice quali – quantitativa dei livelli di rischio* elaborata sulla base delle indicazioni e delle definizioni qualitative relative alla frequenza, alla gravità e ai livelli di rischio, contenute nella Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i.; sulla base delle definizioni degli intervalli quantitativi relative alla frequenza, contenute nella norma CENELEC EN 50126-2; e, infine, sulla base delle indicazioni e definizioni quali – quantitative relative alla gravità, dettate dalla Direttiva 2009/149/CE (Tabella 4.7).

La matrice ha forma rettangolare; le righe rappresentano le categorie della frequenza mentre le colonne rappresentano i livelli della gravità delle conseguenze; inoltre, non è simmetrica perché non tutti i livelli dei rischi hanno lo stesso rapporto tra frequenza e gravità delle conseguenze.

Il metodo proposto mediante la Matrice quali – quantitativa dei livelli di rischio può essere adottato come metodo all'interno del più vasto processo di valutazione del rischio, infatti, è uno strumento efficace per analizzare i rischi che esistono in un sistema posto sotto esame. Lo scopo è di fornire una guida per l'analisi dei rischi e per individuare il rapporto tra frequenza e gravità delle conseguenze, combinati per fornire una stima del rischio.

E' importante notare che l'incertezza, su una o più componenti, influenza la stima del rischio la quale, sulla base dei pericoli preventivamente identificati, può essere utilizzata per considerare le strategie da adottare per gestire tali rischi.

La dimensione del sistema in esame determina i limiti di ciascuno dei parametri e dei livelli di rischio. I termini non sono destinati ad avere un significato assoluto. A partire dalle categorie della frequenza e dai livelli della gravità delle conseguenze, si può associare, a ogni scenario critico, un ben determinato livello di rischio.

L'accettabilità del rischio può essere valutata mediante i livelli di stima del rischio che riassumono l'impatto del rischio (Tabella 4.8).

In corrispondenza delle sei categorie di frequenza e dei quattro livelli di gravità delle conseguenze, sono individuati quattro livelli di rischio:

- Trascurabile;
- Tollerabile;
- Indesiderabile;
- Intollerabile.

Le definizioni per i livelli di rischio "trascurabile" e "tollerabile" sono contenute nella Disposizione n. 51/2007 di RFI del 12/11/2007 "Modifiche alla Disposizione del Gestore dell'Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001 e successive modifiche".

Il rischio residuo può essere definito "trascurabile" solo quando risulta connesso a un pericolo che, per sua natura o a seguito di opportuni provvedimenti, sia "inverosimile" e ne possano derivare conseguenze classificate al più come "critiche" oppure sia "improbabile" e ne possano derivare conseguenze classificate come "insignificanti".

Il rischio residuo può essere definito "tollerabile" solo qualora risulti connesso a un pericolo che, per sua natura o a seguito di opportuni provvedimenti, sia "inverosimile" e ne possano derivare conseguenze classificate come "catastrofiche", oppure sia "improbabile" e ne possano derivare conseguenze classificate come "marginali" o "critiche", oppure, ancora, sia "remoto" e ne possano derivare conseguenze classificate come "insignificanti".

Tabella 4.7 - Matrice quali – quantitativa dei livelli di rischio.

FREQUENZA		LIVELLI DI RISCHIO						Fonte normativa						
Fonte normativa (CENELEC EN 50126-2)	f ≥ 4	INDESIDERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE	Direttiva 2009/149/CE DI RFI 51/2007						
	0,67 ≤ f < 4	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE	Direttiva 2009/149/CE DI RFI 51/2007						
	0,14 ≤ f < 0,67	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	DI RFI 51/2007						
	0,029 ≤ f < 0,14	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	DI RFI 51/2007						
	0,005 ≤ f < 0,029	TRASCURABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	DI RFI 51/2007						
	f < 0,005	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TOLLERABILE	DI RFI 51/2007						
	Evento/anno	INSIGNIFICANTE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO			DI RFI 51/2007						
		GRAVITA'												
Persone	Decesso <sup>1</sup>	≥ 1	= 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1						
	Ferimento grave <sup>2</sup>								≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1
	Ferimento lieve <sup>3</sup>													
Sistema e ambiente	Danno significativo	≥ 1	sistema	sistema	sistema	sistema	sistema	≥ 150 kg ambiente						
	Danno importante								ambiente	ambiente	ambiente	ambiente	ambiente	
	Danno leggero													
Servizio - Interruzione								≥ 6 h						

Note alla Direttiva 2009/149/CE:  
<sup>1</sup> Decesso, qualsiasi persona uccisa immediatamente o entro 30 giorni a seguito di un incidente. Sono esclusi i suicidi.  
<sup>2</sup> Ferimento grave, qualsiasi persona ferita ricoverata in ospedale per più di 24 ore a seguito di un incidente. Sono esclusi i tentativi di suicidio.  
<sup>3</sup> Ferimento lieve, qualsiasi persona ferita ricoverata in ospedale per meno di 24 ore o che subisce solo cure mediche a seguito di un incidente.

Fonte: Elaborazione su base dati *Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i., CENELEC EN 50126-2 e Direttiva 2009/149/CE.*

Il rischio residuo è accettabile quando è classificato come “trascurabile”, oppure quando si dimostra che è “tollerabile” e che sono state adottate tutte le misure e le cautele suggerite dalla tecnica e dalla pratica, atte a evitare sinistri. In quest’ultimo caso, il processo di “tendere a valori nulli di incidentalità” deve continuare a essere applicato per tendere a un livello di rischio residuo “trascurabile”.

Tabella 4.8 - Livelli di rischio e azioni da intraprendere.

RISCHIO			
LIVELLO	CLASSE	DEFINIZIONE (Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i.)	AZIONI
Trascurabile	I	Rischio residuo connesso a una categoria della frequenza di accadimento: “inverosimile” e ne possa derivare un livello di gravità delle conseguenze classificato al più come “critico”; “improbabile” e ne possa derivare un livello di gravità delle conseguenze classificato come “insignificante”.	Accettabile. Non sono richieste azioni.
Tollerabile	II	Rischio residuo connesso a una categoria della frequenza di accadimento: “inverosimile” con un livello di gravità delle conseguenze classificato come “catastrofico”; “improbabile” con un livello di gravità delle conseguenze classificato come “marginale” o “critico”; “remoto” con un livello di gravità delle conseguenze classificato come “insignificante”.	Accettabile con controllo adeguato. E’ possibile intraprendere una o più azioni volte al miglioramento tecnico.
Indesiderabile	III		Devono essere adottate misure urgenti atte a ridurre il rischio. Deve essere accettato solo quando la riduzione del rischio è impraticabile.
Intollerabile	IV		Deve essere eliminato. Se non è possibile ridurre il rischio, il sistema dovrebbe rimanere bloccato.

Fonte: Elaborazione su base dati Disposizione 13/2001 di RFI e s.m.i.

Definiti i quattro livelli di rischio in ordine crescente, in corrispondenza di ognuno di essi è possibile definire quattro livelli di sicurezza in ordine decrescente, data la relazione inversa di proporzionalità tra i due stati (rischio e sicurezza):

- $R_1$  (trascurabile, rischio minimo) →  $S_1$  (livello di sicurezza massimo);
- $R_2$  (tollerabile, rischio medio) →  $S_2$  (livello di sicurezza medio);
- $R_3$  (indesiderabile, rischio alto) →  $S_3$  (livello di sicurezza basso);
- $R_4$  (intollerabile, rischio massimo) →  $S_4$  (livello di sicurezza minimo).

La gerarchia dei controlli del rischio può essere riassunta in cinque categorie:

1. *eliminazione del rischio*; soluzione permanente che deve essere adottata in prima istanza;
2. *sostituzione del rischio*; consiste nel sostituire il pericolo o qualsiasi altro aspetto con uno a più basso rischio;
3. *controlli tecnici*; consiste nel ridurre il rischio attraverso modifiche strutturali di processo o dell’ambiente;
4. *controlli regolamentari*; consiste nel ridurre il rischio modificando le procedure, le istruzioni, ecc.;
5. *dispositivi di protezione individuale*; ultima risorsa o controllo temporaneo.

Dall’analisi di rischio così condotta è possibile dimostrare che, per ogni pericolo (hazard) preventivamente identificato, siano state effettivamente definite misure, di natura procedurale, tecnologica e relative al comportamento umano, atte a evitare eventi incidentali. Le misure consentono di minimizzare il rischio ovvero tendono a far diventare “trascurabile” il rischio residuo ferroviario.

### 4.3 Analisi e valutazione della capacità

La metodologia proposta prevede l'utilizzo della simulazione della circolazione ferroviaria. Il programma utilizzato consente l'analisi delle correlazioni esistenti tra i parametri infrastrutturali, tecnologici (p.e. infrastruttura, segnalamento, materiale rotabile, ecc.) e gestionali (p.e. struttura dell'orario, definizione della qualità del servizio, ecc.), fornendo output grafici e numerici idonei allo studio in questione, oltre a operare in tempi relativamente brevi.

Il metodo di analisi prevede l'utilizzo della simulazione; in questo caso viene supportata da un apposito software disponibile in commercio, non escludendo la possibilità di utilizzare, per l'iter metodologico ipotizzato, altri programmi o nuovi strumenti.

La metodologia proposta, con le dovute modifiche, può essere estesa anche ad altre situazioni, risultando quindi, nella sua praticità di applicazione, versatile e adattabile ad altre realtà.

La metodologia si avvale dell'utilizzo della simulazione, che consente di ricreare i casi selezionati considerati maggiormente indicativi e consente anche un'analisi di sensibilità che altri metodi (p.e. sintetici e analitici) non permettono di effettuare, almeno con la precisione e la velocità dei software di simulazione.

La scelta di utilizzare tali strumenti informatici è, infatti, dovuta al fatto di essere in grado di eseguire una dettagliata analisi dei vari fattori rilevanti, quali la tipologia di servizio, la promiscuità tra servizi (regionale, a lunga percorrenza, merci), le caratteristiche dell'infrastruttura dal punto di vista topologico (caratteristiche fisiche delle linee e delle stazioni) e impiantistico (tipologia di segnalamento presente) e, se necessario, il livello di automazione garantito dai sistemi di controllo e sicurezza.

Il programma selezionato è *OpenTrack*<sup>®</sup> (OT), descritto nel Capitolo 5 e in modo più approfondito nell'Appendice B, in quanto considerato, in base a un'analisi degli strumenti disponibili, tra i più idonei a rispondere alle richieste della metodologia ipotizzata, grazie alla sua versatilità e praticità di applicazione che consentono di ricreare e analizzare gli scenari significativi in tempi ragionevoli e di fornire strumenti grafici idonei a una precisa valutazione di sensibilità dei risultati.

## 5. Introduzione al software di simulazione: OpenTrack®

OpenTrack® è un software commerciale progettato e sviluppato dall'Institute for Transport Planning and Systems (ETH) di Zurigo per simulare la circolazione dei treni su una data infrastruttura ferroviaria.

La simulazione è possibile attraverso l'integrazione dell'equazione differenziale del moto combinata alle informazioni relative al segnalamento, che consentono di governare gli spostamenti del treno.

Il software, adottato da società ferroviarie, industrie, consulenti e università in molti Paesi, è utilizzato per:

- simulare reti ferroviarie, metropolitane, tranviarie;
- analizzare la capacità di linee e nodi;
- analizzare diversi sistemi di segnalamento (p.e. ERTMS, LZB);
- studiare il materiale rotabile (p.e. fissarne i requisiti);
- costruire e/o valutare la robustezza degli orari;
- valutare gli effetti di ritardi;
- valutare gli effetti di guasti (p.e. infrastruttura e/o treni);
- pianificare le caratteristiche dell'infrastruttura futura;
- calcolare il consumo di energia dei treni.

Durante la simulazione, i treni tentano di rispettare l'orario pianificato. Per rappresentare la dinamica di ciascun treno, OT ne risolve l'equazione differenziale del moto rispettando i vincoli posti dal sistema di distanziamento e dai segnali. Sezioni di blocco occupate e aspetti restrittivi dei segnali rallentano o fermano i treni.

La simulazione può essere eseguita in tempo reale, mediante un'animazione che mostra il movimento dei treni lungo la rete, le corrispondenti occupazioni dell'infrastruttura e gli aspetti dei segnali.

OpenTrack® consente di analizzare e visualizzare i risultati della simulazione sotto forma di diagrammi, orari grafici e statistiche. La posizione, la velocità, l'accelerazione, il consumo di energia e molti altri dati di ogni treno sono memorizzati su specifici file, per essere analizzati al termine della simulazione.

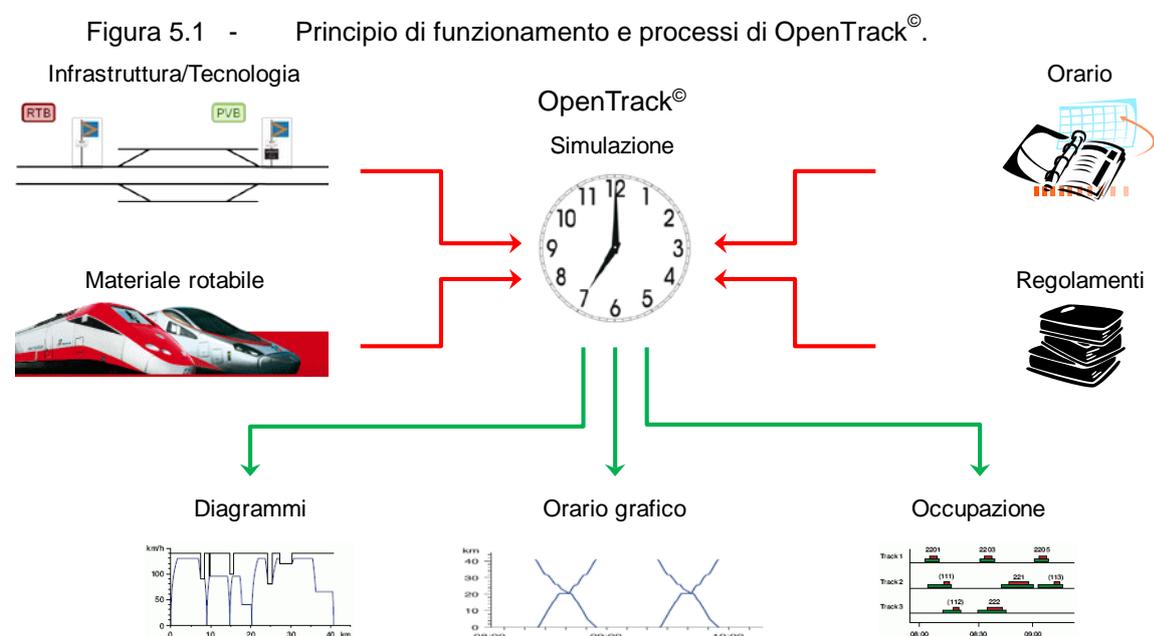
Nella Figura 5.1 è rappresentato il principio di funzionamento con i processi di input, simulazione e output. In particolare, i dati di input fanno riferimento al materiale rotabile, all'infrastruttura, alla tecnologia, ai regolamenti e all'orario che ne esplicita anche il modello di esercizio adottato.

OpenTrack® utilizza i dati tecnici di ogni locomotiva e treno, tra cui il diagramma di sforzo di trazione/velocità, la massa, la lunghezza e il peso aderente. In uno specifico database le locomotive sono organizzate in gruppi; un treno simulato ha una composizione formata da una locomotiva (o treno automotore) e un certo numero di carrozze o carri.

L'infrastruttura è rappresentata mediante un tipo di grafo denominato *Double Vertex Graph*. La topologia viene inserita mediante un editor grafico. I diversi elementi contengono una serie di attributi che ne rappresentano le caratteristiche (p.e. un arco ha una data lunghezza, pendenza longitudinale, velocità per i diversi ranghi).

Un database contiene l'orario dei treni, definito da partenze, transiti e arrivi, tempi minimi di fermata e coincidenze con altri servizi. L'orario può essere modificato da tabella oppure con il mouse sull'orario grafico. Le differenze tra orario pianificato e simulato sono osservabili sia nella tabella che sul grafico.

Dopo una simulazione, il software consente la visualizzazione dei risultati della simulazione sotto forma di testo o grafici; offre diverse possibilità di rappresentazione e analisi dei risultati. Per ogni treno, può rappresentare diagrammi come, ad esempio, spazio/accelerazione o spazio/tempo; orari grafici, occupazioni e profili di linea.



Per maggiori approfondimenti sulle caratteristiche e sulle potenzialità del software, si rimanda alla descrizione più esaustiva riportata nell'Appendice B.

## **PARTE III**

### **APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA A CASI DI STUDIO**

*“Ogni problema che sia dato di risolvere,  
nel momento stesso della sua risoluzione  
suscita nuovi problemi”*

(Konrad Lorenz)

## 6. Applicazione della metodologia agli impianti RTB

Lo scopo di questo capitolo è riportare l'applicazione della metodologia di analisi e verifica a un caso di studio, per la definizione del ruolo delle componenti: umane, tecnologiche e normative, nella quantificazione delle prestazioni del sistema ferroviario in termini di sicurezza della circolazione e della capacità dell'infrastruttura.

Il caso di studio si riferisce agli impianti automatici di Rilevamento Temperatura Boccole (RTB) su linee AV/AC attrezzate con sistema ERTMS/ETCS di Livello 2, ovvero all'analisi e alla verifica, in termini di sicurezza e capacità, di eventi classificati come "eventi pericolosi" legati al manifestarsi di situazioni di esercizio specifiche.

La linea ferroviaria selezionata per il caso di studio è la Roma – Napoli (AV/AC) classificata come "fondamentale" da Rete Ferroviaria Italiana (RFI).

Le fasi, del proposto modello di valutazione dei rischi, sono le seguenti:

- Fase 1: Definizione del sistema;
- Fase 2: Analisi della normativa ed elaborazione degli schemi procedurali;
- Fase 3: Individuazione dei possibili eventi pericolosi;
- Fase 4: Individuazione degli scenari critici;
- Fase 5: Analisi e valutazione dei livelli di rischio degli scenari critici.

Nei successivi paragrafi vengono trattate singolarmente tutte le fasi del modello, a partire da una descrizione sintetica degli impianti RTB (le cui caratteristiche principali sono desunte dai seguenti documenti: Disposizione n. 51/2005 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 10/08/2005 "Normativa per l'esercizio degli impianti di Rilevamento Temperature Boccole (RTB) per Linee ad Alta Capacità/Alta Velocità (AC/AV), attrezzate con ERTMS/ETCS L2" e s.m.i.) e da una breve cenno delle infrastrutture, delle tratte, degli impianti e della conseguente capacità della linea ferroviaria AV/AC Roma – Napoli.

### 6.1 Generalità

Un impianto automatico di Rilevamento Temperatura Boccole (RTB), realizzato per linee AV/AC attrezzate con sistema ERTMS/ETCS di Livello 2, è costituito da un:

- Apparato RTB;
- Interfacciamento con le altre apparecchiature del segnalamento e del Sistema di Comando e Controllo della circolazione (SCC).

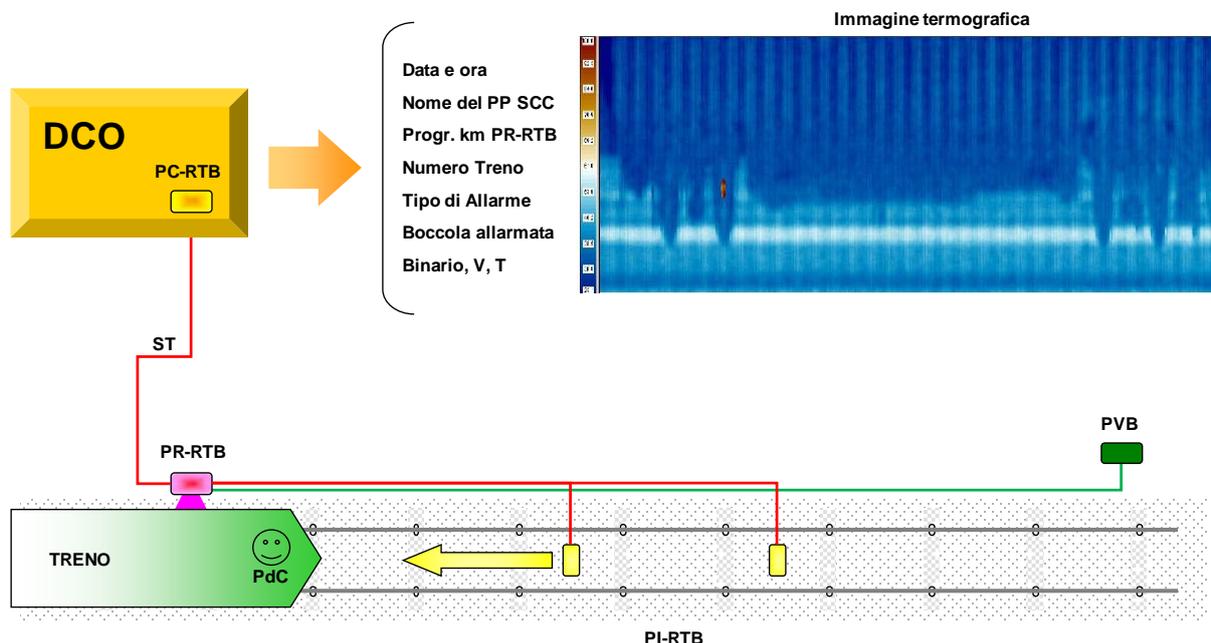
L'Apparato RTB è l'insieme di apparecchiature opportunamente interconnesse dedicate alla rilevazione della temperatura delle boccole dei rotabili in un punto di linea e in grado di rendere disponibili al Dirigente Centrale Operativo (DCO) o ad altro operatore, le informazioni relative a tali rilevazioni, corredate da segnalazioni acustiche e visive di allarme, nel caso in cui le temperature misurate superino i valori di soglia prefissati (Figura 6.1).

L'Apparato RTB è costituito da:

- Posto di Rilevamento RTB (PR-RTB), con funzione di rilevamento della temperatura delle boccole e di elaborazione dati;
- Posto di Controllo RTB (PC-RTB), ubicato al Posto Centrale dell'SCC, con funzione di presentazione e registrazione dei dati;
- Sistema di Trasmissione (ST), con funzioni di collegamento tra PR-RTB e PC-RTB.

L'interfacciamento con le altre apparecchiature del segnalamento e dell'SCC, è l'insieme dei collegamenti d'impianto che consentono la gestione degli allarmi RTB.

Figura 6.1 - Principio di funzionamento dell'impianto RTB.



Fonte: Elaborazione sulla base delle informazioni desunte dalla Disposizione n. 51/2005 di RFI.

I collegamenti d'impianto dell'Apparato RTB, con le altre apparecchiature del segnalamento e del SCC, si riferiscono alle seguenti funzioni:

- intervento degli allarmi RTB;
- esclusione del PR-RTB.

Per l'intervento degli allarmi RTB è realizzato un collegamento direttamente con il treno interessato, attraverso un sistema puntuale, gruppo di boe o Encoder/Punto Informativo RTB (PI-RTB), posato lungo la linea e collegato con il PR-RTB. In relazione alle tipologie di allarme, il PI-RTB trasmette al treno le restrizioni sulla marcia che verranno attivate automaticamente in corrispondenza del successivo Posto Verifica Boccole (PVB).

Per l'esclusione per fuori servizio della linea, è realizzato un collegamento tra il PR-RTB e l'apparato del Posto di Servizio (PdS) limitrofo.

L'apparato RTB è in grado di fornire le tipologie di allarme descritte di seguito.

Allarme selettivo, tale allarme può essere:

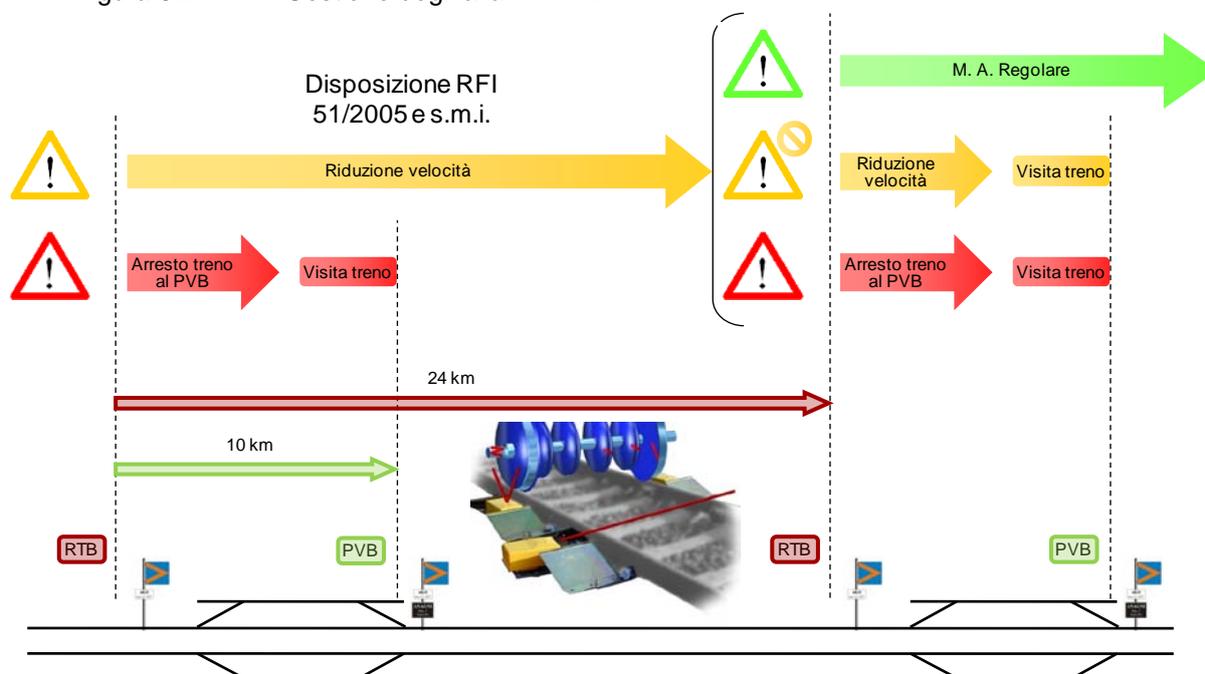
- **Caldissimo:** segnala il superamento, nella boccola interessata, di una temperatura prefissata tale da richiedere l'arresto immediato del treno al primo Posto Verifica Boccole (PVB);
- **Caldo:** segnala il superamento, nella boccola interessata, di una temperatura prefissata (inferiore a quella dell'allarme Caldissimo);
- **Relativo:** segnala il superamento, nella boccola interessata, di una differenza di temperatura ricavata in base a diversi criteri di confronto con altre boccole del treno e con determinate temperature di riferimento.

Allarme non selettivo, si determina nel caso in cui, per il numero delle boccole in allarme o per la mancanza di collegamento tra PR-RTB e PC-RTB, non sia possibile rilevare l'ubicazione di tutte le boccole in allarme. Analogamente all'allarme selettivo, anche questo allarme ha tre possibili stati.

Al passaggio del convoglio, il PR-RTB rileva le temperature di tutte le boccole del treno e, nel caso di superamento di una delle soglie prefissate di temperatura, invia l'informazione di allarme al PC-RTB attraverso il ST. Nello stesso istante, l'informazione di boccola "calda" viene inviata al PI-RTB o gruppo di boe (Figura 6.1).

Quando il treno incontra il PI-RTB, il PdC a bordo della cabina di guida è informato sullo stato della temperatura delle boccole. I casi che possono presentarsi fanno riferimento ai tre possibili stati: allarme Caldissimo, Caldo e Relativo (Figura 6.2).

Figura 6.2 - Gestione degli allarmi RTB.



Fonte: Elaborazione sulla base delle informazioni desunte dalla Disposizione n. 51/2005 di RFI.

In particolare, nel caso venga rilevato un allarme Caldissimo dal PR-RTB, il PI-RTB trasmette al treno l'informazione di arresto al primo PVB incontrato.

Tale informazione si manifesta al PdC come un intervento del sistema per l'arresto del treno al PVB e con la visualizzazione di un messaggio relativo alla causa dell'intervento (che richiede la conferma di presa visione da parte del PdC). Nello stesso tempo il DCO è informato della presenza di un treno in allarme Caldissimo attraverso apposita indicazione sul Train Descriptor (TD) e, in base all'indicazione di allarme Caldissimo, il DCO deve attivare il comando di inibizione apertura segnali virtuale coincidente con il PVB dove il treno verrà arrestato. Il PdC, arrestato il treno in corrispondenza del PVB, deve comunicare verbalmente tale arresto al DCO.

Nel caso venga rilevato un allarme Caldo dal PR-RTB, il PI-RTB trasmette al treno l'informazione di riduzione di velocità con inizio dal primo PVB incontrato. La riduzione di velocità per il treno interessato viene rimossa solo a seguito di un successivo rilevamento senza segnalazione di allarme.

Tale informazione si manifesta al PdC come un intervento del sistema per il rispetto della riduzione di velocità e con la visualizzazione di un messaggio relativo alla causa dell'intervento (che richiede la conferma di presa visione da parte del PdC). Nello stesso tempo il DCO è informato della presenza di un treno in allarme Caldo attraverso apposita indicazione sul Train Descriptor (TD) di cui dovrà prendere atto ai soli fini della regolarità, anche tenendo conto di un eventuale degrado dell'allarme da Caldo a Caldissimo, o della conferma dell'allarme Caldo, nel successivo rilevamento.

In relazione al rilevamento del successivo PR-RTB, si possono presentare le seguenti condizioni:

- allarme Caldissimo, il treno viene arrestato al successivo PVB;
- nuovo allarme Caldo, la riduzione di velocità viene estesa dal sistema fino al successivo PR-RTB. Il DCO, in questo caso, dovrà operare in modo tale da arrestare il treno al PVB successivo e quindi richiedere la visita del materiale da parte del PdC, tenendo presente che nella specificazione del tipo di allarme deve indicare "Caldissimo";
- nessun allarme, viene rimossa la limitazione di velocità senza ulteriori provvedimenti.

Il DCO ha la possibilità di visualizzare sul proprio monitor una serie di informazioni che riguardano la segnalazione dell'allarme selettivo (Caldissimo, Caldo e Relativo):

- data e ora del rilevamento;
- nome del Posto Periferico (PP) SCC che riceve i dati del PR-RTB;
- progressiva chilometrica del PR-RTB;
- numero del treno;
- tipologia di allarme, Caldissimo – Caldo – Relativo;
- identificazione della boccola in allarme mediante indicazione del lato del treno (destro o sinistro), in relazione al senso di marcia del treno e del numero dell'asse in allarme, in relazione alla testa del treno;
- binario, senso di marcia, velocità;
- temperatura esterna.

L'allarme Relativo sulle linee attrezzate con ERTMS/ETCS L2 è gestito come allarme Caldo.

Nel caso di allarme non Selettivo, gli interventi sulla marcia del treno, relativi alla tipologia di allarme (Caldissimo, Caldo o Relativo) rilevato dal PR-RTB, mantengono la stessa funzionalità ovvero arresto del treno per l'allarme Caldissimo o riduzione di velocità per l'allarme Caldo o Relativo.

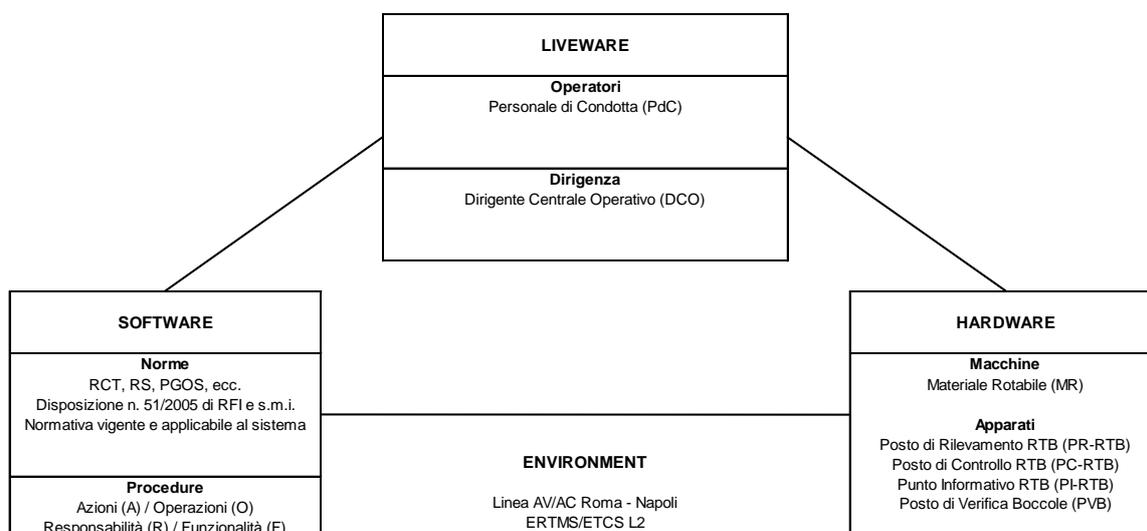
## 6.2 Definizione del sistema

Il sistema, come espresso nel § 4.2, comprende tutto ciò che è in grado di interagire, influenzare o essere influenzato, definendo così il luogo dove si sviluppano le cause che potrebbero materializzarsi nell'evento pericoloso (hazard).

In questa fase vengono individuate le risorse del processo produttivo da analizzare. La definizione del sistema viene fatta mediante l'approccio sistemico del Metodo SHEL (Software, Hardware, Environment, Liveware):

- *Software*, elemento costituito dalle "regole" ovvero da tutto ciò che determina come le varie componenti del sistema produttivo interagiscono tra loro;
- *Hardware*, insieme di tutte le componenti fisiche non umane;
- *Environment*, contesto all'interno del quale sono immersi gli altri elementi;
- *Liveware*, rappresenta la componente umana del sistema.

Figura 6.3 - Definizione del sistema mediante l'applicazione del Metodo SHEL.



Nella presente ricerca si evidenzia principalmente l'interazione fra gli elementi Software, Hardware e Liveware all'interno dell'ambiente (Environment) (Figura 6.3).

### SOFTWARE

Gli elementi considerati della componente Software, insieme alla già citata Disposizione n. 51/2005, sono rappresentati dalle norme di seguito elencate:

- Regolamento per la Circolazione dei Treni (RCT) – Edizione 1962 dell'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF) del 13/12/2009;

- Regolamento sui Segnali (RS) – Edizione 1947 dell’Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF) del 02/12/2009;
- Prefazione Generale all’Orario di Servizio (PGOS) – di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 07/09/2010;
- Disposizione n. 13/2001 della Divisione Infrastruttura delle Ferrovie dello Stato (FS) del 26/06/2001 “Requisiti per l’adozione, da parte delle Imprese Ferroviarie e della Divisione Infrastruttura, di un sistema di gestione della sicurezza - Safety Management System” e s.m.i.;
- Disposizione n. 15/2004 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 19/04/2004 “Modifiche alla Disposizione del Gestore dell’Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001”;
- Disposizione n. 51/2007 di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) del 12/11/2007 “Modifiche alla Disposizione del Gestore dell’Infrastruttura n. 13 del 26 giugno 2001 e successive modifiche”;

oltre a tutta la normativa vigente applicabile, che di volta in volta verrà esplicitata nel prosieguo dell’applicazione della metodologia al caso di studio proposto.

## HARDWARE

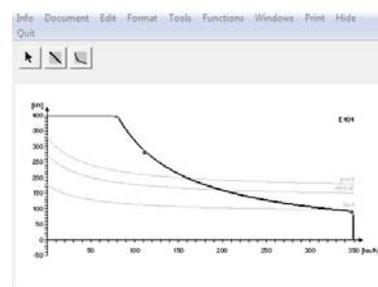
La componente Hardware è costituita essenzialmente dagli impianti RTB, i cui principi di funzionamento e le modalità di gestione degli allarmi sono state descritte nel § 6.1, e dal materiale rotabile oggetto del caso di studio.

L’ETR 500 AV, uno dei treni che opera sulla linea AV/AC Roma – Napoli, è costituito da due locomotive e un numero variabile di carrozze in composizione facilmente modificabile. Le locomotive, dotate del nuovo sistema di segnalamento europeo ERTMS, sono politensione con alimentazione a 25 kV 50Hz, 3 kVcc e 1,5 kVcc (a potenza ridotta). Il treno ha una velocità massima superiore a 300 km/h (Figura 6.4).

Ogni locomotiva è dotata di due pantografi, uno per la captazione della corrente continua a 3 kV e uno per quella alternata a 25 kV.

Le principali caratteristiche dell’ETR 500 AV sono riportate nella Tabella 6.1.

Figura 6.4 - Caratteristica meccanica dell’ETR 500 AV.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack®.

Tabella 6.1 - Principali caratteristiche dell'ETR 500 AV.

DIMENSIONI	
Composizione	M + 12 R + M
Lunghezza della Motrice (M)	20.565 mm
Lunghezza della Rimorchiata (R)	26.100 mm
Numero porte passeggeri per fiancata	24
MASSE	
Massa del treno	640 t
Massa della Motrice (M)	68 t
Massa per asse della Motrice (M)	17 t
Massa della Rimorchiata (R)	42 t
Massa per asse della Rimorchiata (R)	10,5 t
PRESTAZIONI	
Tensione nominale di funzionamento	Politensione
Potenza al cerchione	8.800 kW
Potenza continuativa ai cerchioni	4.400 kW
Sforzo di trazione allo spunto	~ 400 kN
Velocità massima	> 300 km/h
Accelerazione massima all'avviamento	0,8 m/s <sup>2</sup>
Decelerazione di frenatura a carico max	0,6 m/s <sup>2</sup>

Fonte: AnsaldoBreda SpA – A Finmeccanica Company.

## ENVIRONMENT

Il contesto, all'interno del quale sono immersi gli altri elementi, è rappresentato dalle caratteristiche infrastrutturali, tecnologiche e gestionali della linea oggetto di studio.

Le caratteristiche principali della linea AV/AC Roma – Napoli, attrezzata con ERTMS/ETCS L2, sono dedotte dai seguenti documenti:

- Fascicolo Circolazione Linee (FCL) n. 119 di RFI, Edizione Settembre 2005 aggiornata al 01/2010;
- Prospetto Informativo Rete (PIR) di RFI, Edizione 2011;
- Prefazione Generale all'Orario di Servizio (PGOS) di RFI, Edizione 1963 aggiornata al 09/2010.

La linea, interamente a doppio binario e a Trazione Elettrica (TE), è classificata da RFI come “fondamentale”.

Le caratteristiche principali della linea AV/AC Roma – Napoli sono riportate dettagliatamente nella Tabella 6.2 per la sezione Roma – PC Ceccano, nella Tabella 6.3 per la sezione PC Ceccano – PC Pignataro e infine nella Tabella 6.4 per la sezione PC Pignataro – Napoli.

La linea ha andamento pressoché in ascesa e ammette una velocità massima di 300 km/h tra il PM Salone e il 1° Bivio /PC Gricignano. Fanno eccezione il tratto iniziale tra le stazioni di Roma Termini e Roma Prenestina (*velocità massima caratteristica in rango C<sup>16</sup>* pari a 80 km/h) e quello finale di 12 km circa (*velocità massima caratteristica in rango P* compresa tra 90 e 150 km/h) verso Napoli.

Si tratta di un livello di velocità elevato, penalizzato soltanto dal limite di 60 km/h in ingresso a Roma Termini e a Napoli Centrale.

Dal punto di vista infrastrutturale la linea è di *categoria D4* (PGOS) e ammette carichi assiali di 22,5 t e lineari di 8,0 t/m.

La lunghezza dei binari di precedenza è di norma non inferiore a 650 m (PM Napoli Afragola) e raggiunge il *modulo* di 686 m (PM S. Giovanni), di 750 m (PM Salone) e di 786 m (PM Anagni e PM Tora-Picilli).

In questi impianti si hanno condizioni favorevoli per effettuare le precedenze tra treni, per motivi prettamente di servizio, nello stesso verso di percorrenza.

Il sistema di controllo della circolazione è del tipo ERTMS/ETCS L2, caratterizzato dall'assenza di segnali luminosi lungo la linea e dall'autorizzazione al movimento che i treni ricevono via radio (GSM-R).

La stazione di Roma Prenestina assume la funzione di *Stazione Porta* per il Sistema SCC/AV Roma Prenestina – Gricignano ed è, di norma, gestita in regime di telecomando dal DCO/SCC della tratta Roma Termini/Roma Tiburtina.

Vi sono 6 Posti di Blocco (PB) in prossimità di Roma e Napoli e 100 blocchi del tipo a segnale fisso lungo la linea.

L'ubicazione degli impianti RTB sulla linea AV/AC Roma – Napoli è riportata nelle tabelle 6.2, 6.3 e 6.4 sulla base delle informazioni desunte dal FCL n. 119 di RFI. Gli impianti RTB sono installati con un modulo di circa 24 km.

Nelle suddette tabelle sono riportati inoltre i PVB, coincidenti con i segnali imperativi dei PdS, in corrispondenza dei quali, in relazione alla tipologia di allarme rilevato, viene arrestato il treno e quindi effettuata la visita del materiale da parte del PdC.

---

<sup>16</sup> La velocità caratteristica in rango A interessa, generalmente, i treni merci; quella in rango B e C interessa i treni viaggiatori. Il rango P è riferito esclusivamente ai treni ad assetto variabile.

Tabella 6.2 - Caratteristiche della linea AV/AC Roma – Napoli (Roma – PC C.).

Linea AV/AC ROMA - NAPOLI - "CARATTERISTICHE LINEA"															
<b>SEZIONE</b> <b>ROMA - PC CECCANO</b>															
	Classificazione Rete	F													
	Progressiva chilometrica [km]	0,000	4,256	12,395	25,475	36,842	49,002	61,178	61,505	74,561	87,204	88,404			
	Lunghezza della tratta [km]	4,256	8,139	13,080	11,140	0,227	12,160	12,176	0,327	13,056	12,643	1,200			
	Numero binari	2													
	Sistema di trazione	TE													
	Ascesa massima [%]	Dispari		5	12	21	19	0	4	-1	0	10	9	0	
		Pari		12	10	-1	-14	-4	21	3	1	10	9	7	
	Codifica Trasporto Combinato	P/C80													
	Massa Assiale	D4													
Numero binari di precedenza	Vari	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-		
Modulo precedenza min-max [m]	79-464	370-420	750	-	-	-	-	-	786	-	-	-	-		
Modulo di linea e passo [m]	750														
Regime di circolazione	ERTMS/ETCS L2														
Sistema di Controllo Marcia Treno	BA/CC	ERTMS/ETCS L2													
	SCMT	ERTMS/ETCS L2													
Sistema di esercizio	SCC/AV														
Velocità massima [km/h]	A	80													
	B	80													
	C	80													
	P	-													

LEGENDA: Località di servizio Tratta compresa tra due località di servizio

Fonte: Elaborazione sulla base delle informazioni desunte dal FCL 119 di RFI.

Tabella 6.3 - Caratteristiche della linea AV/AC Roma – Napoli (PC C. – PC P.).

Linea AV/AC ROMA - NAPOLI - "CARATTERISTICHE LINEA"													
<b>SEZIONE</b> PC CECCANO - PC PIGNATARO													
	F												
	Classificazione Rete												
	Progressiva chilometrica [km]	88,404	101,451	111,985	112,315	122,813	132,892	133,383	141,781	152,843	153,133	163,407	172,635
	Lunghezza della tratta [km]	13,047	10,534	10,534	10,498	10,079	10,079	0,491	8,398	11,062	0,290	10,274	9,228
	Numero binari	2											
	TE												
	Sistema di trazione												
	Ascesa massima [%]												
	Dispari	6	15	0	10	5	0	0	0	18	0	9	6
Pari	11	0	0	0	0	0	0	7	3	0	18	20	
Codifica Trasporto Combinato	P/C80												
Massa Assiale													
D4													
Numero binari di precedenza	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	
Modulo precedenza min-max [m]	-	-	686	-	-	-	-	-	-	786	-	-	
Modulo di linea e passo [m]	750												
Regime di circolazione													
ERTMS/ETCS L2													
Sistema di Controllo Marcia													
ERTMS/ETCS L2													
Sistema di esercizio													
SCC/AV													
Velocità massima [km/h]													
A													
B	300				300				300		300		
C												300	
P													

LEGENDA: Località di servizio Tratta compresa tra due località di servizio

Fonte: Elaborazione sulla base delle informazioni desunte dal FCL 119 di RFI.

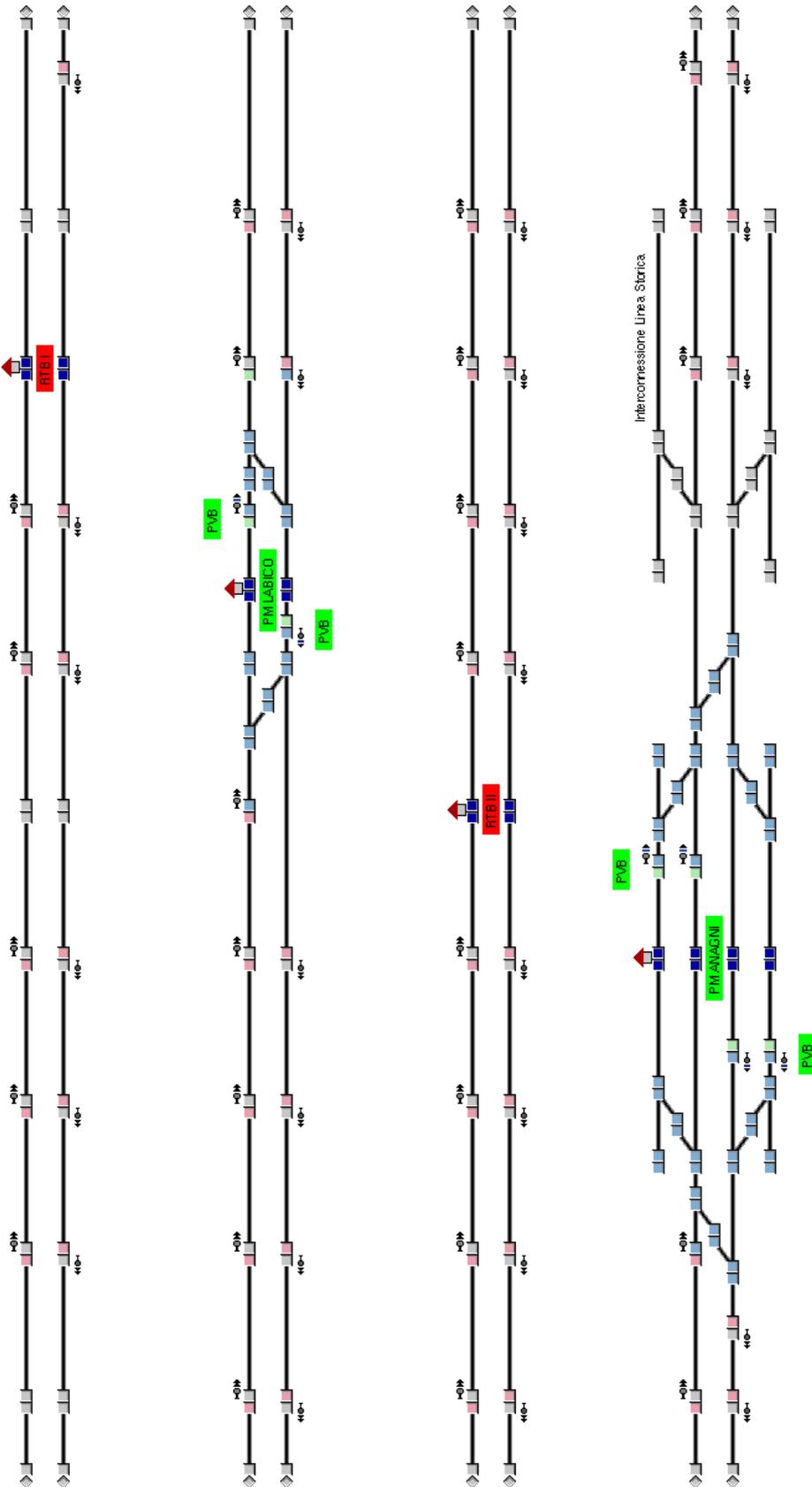
Tabella 6.4 - Caratteristiche della linea AV/AC Roma – Napoli (PC P. – Napoli).

Linea AV/AC ROMA - NAPOLI - "CARATTERISTICHE LINEA"																			
SEZIONE PC PIGNATARO - NAPOLI																			
Classificazione Rete	F																		
Progressiva chilometrica [km]	172,635	173,485	176,782	189,385	195,676	209,985	210,923	215,336	222,397	NAPOLI CLE									
Lunghezza della tratta [km]	0,850	3,297	12,603	189,385	6,291	14,309	0,938	4,413	7,061	NAPOLI CLE									
Numero binari	2																		
Sistema di trazione	TE																		
Ascesa massima [%]	0	-18	9	18	18	18	0	16	15	NAPOLI CLE									
	0	18	18	13	12	12	0	21	18	NAPOLI CLE									
Codifica Trasporto Combinato	P/C80																		
Messa Assiale	D4																		
Numero binari di precedenza	-	-	-	-	-	-	1	-	-	NAPOLI CLE									
Modulo precedenza min-max [m]	-	-	-	-	-	-	650	-	-	NAPOLI CLE									
Modulo di linea e passo [m]	750																		
Regime di circolazione	ERTMS/ETCS L2																		
Sistema di Controllo Marcia Treno	ERTMS/ETCS L2																		
Sistema di esercizio	SCCAV																		
Velocità massima [km/h]	A	B	C	P	300		220	300	300	270	160	130	135	140	150	70	75	80	90

LEGENDA:  Località di servizio  Tratta compresa tra due località di servizio

Fonte: Elaborazione sulla base delle informazioni desunte dal FCL 119 di RFI.

Figura 6.5 - Rappresentazione di un tratto di linea con OpenTrack®.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack®.

La rappresentazione dell'infrastruttura, dei sistemi tecnologici (con particolare riguardo verso gli impianti RTB), del materiale rotabile e dell'esercizio della linea AV/AC Roma – Napoli, attraverso l'uso del software *OpenTrack*<sup>®</sup> (Figura 6.5), ha richiesto la modellizzazione di 15 località di servizio (tra stazioni, posti di movimento, posti di comunicazione e bivi), di 8 impianti RTB e di 8 PVB, per una lunghezza complessiva di circa 223 km; le distanze relative tra le suddette località sono riportate nelle tabelle 6.2, 6.3, 6.4 sulla base delle informazioni desunte dal FCL n. 119 di RFI.

Per rappresentare correttamente la consistenza dell'infrastruttura, sono stati utilizzati i piani schematici delle località di servizio dei quali si è avuta visione nelle sedi opportune, nella fase preliminare del lavoro di stesura della presente Tesi.

Tutti gli elementi di interesse per il presente caso di studio (progressive chilometriche, ubicazione dei segnali e dei deviatori, pendenze delle varie tratte, raggi di curvatura, velocità massime ammesse, tipologie di località di servizio, tipologie di apparati centrali, tipologie di segnalamento, ecc.) sono stati riprodotti e descritti con una serie di parametri che hanno permesso di ricostruirne fedelmente il comportamento in qualsiasi situazione di circolazione.

Oltre agli elementi fisicamente individuabili e riscontrabili nella documentazione a disposizione, sono stati inseriti nel modello anche gli elementi che sono alla base del sistema di sicurezza della circolazione ferroviaria.

In particolare come dati di input, sono stati inseriti i tre livelli sequenziali di termini connessi all'infrastruttura e al modello di esercizio (il livello più alto consiste in un set di elementi del livello precedente):

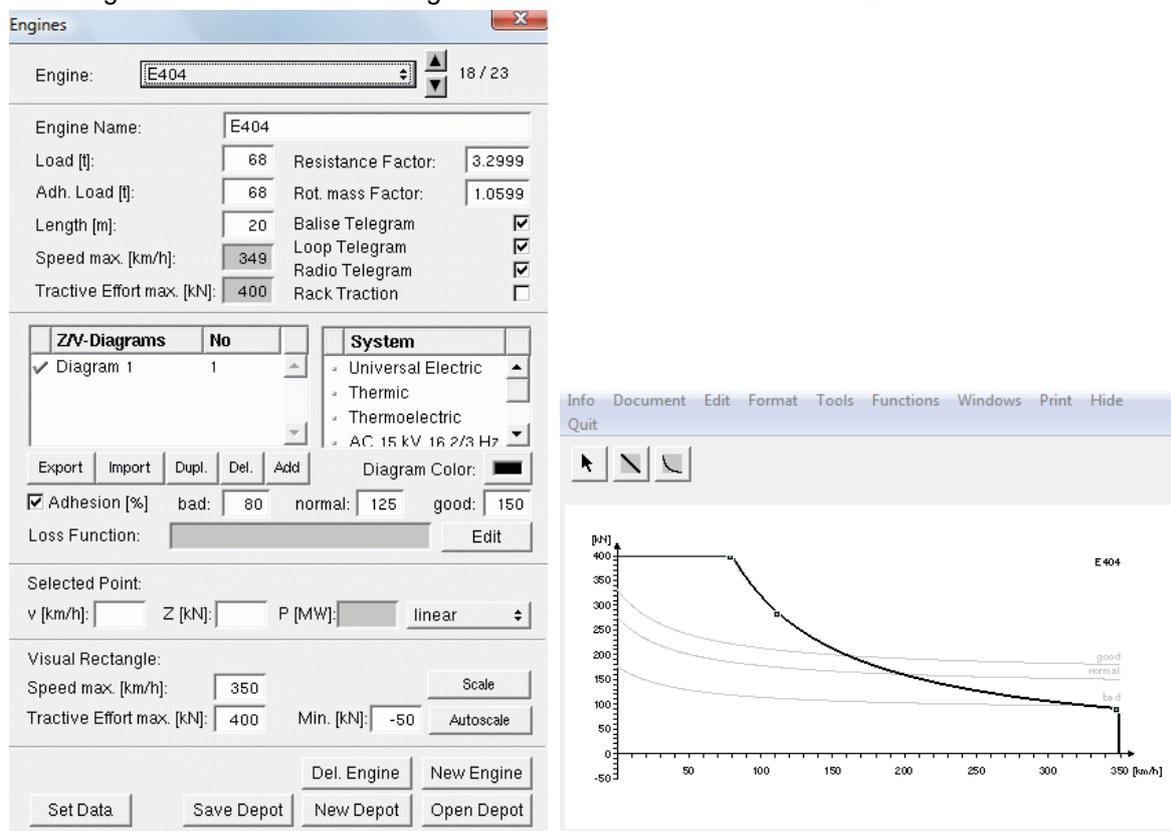
- *routes*, primo livello di descrizione. Consiste in un set di vertici e archi collegati tra loro. In termini fisici possono essere intesi come sezioni di binario; essi iniziano e terminano sempre con un segnale;
- *path*, secondo livello di descrizione. Consiste in un set di routes. In termini fisici, possono essere intesi come un gruppo di sezioni di binario in una certa area;
- *itinerary*, terzo livello di descrizione, ovvero il livello più alto nella definizione delle operazioni possibili per treni sull'infrastruttura. Consiste in una serie di successive paths, con assegnata a ognuno di loro una priorità. Le priorità sono utilizzate nel processo di simulazione per selezionare l'itinerario che il treno userà a partire da quello con priorità più alta.

Dopo aver rappresentato l'infrastruttura, il passo successivo è stato l'inserimento dei dati riguardanti il materiale rotabile.

Per tutti gli elementi di trazione, *OpenTrack*<sup>®</sup> richiede l'implementazione di una serie di parametri, tra cui la curva di trazione (o caratteristica meccanica), necessari per la risoluzione dell'equazione del moto durante la simulazione. Altri dati, sempre necessari alla risoluzione dell'equazione del moto sono relativi all'intera composizione, per cui la seguente fase di lavoro è stata preceduta dalla raccolta di tutti i dati del materiale rotabile attualmente utilizzato nella linea oggetto di studio.

Sono stati inseriti nel modello, attraverso l'uso di specifiche maschere di inserimento dati (Figura 6.6), le caratteristiche principali dell'ETR 500 AV: masse, lunghezze, potenza, forza in avviamento, velocità massima, accelerazione, decelerazione, ecc.

Figura 6.6 - Finestra *Engines* e caratteristica meccanica dell'ETR 500 AV.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack<sup>®</sup>.

I treni si muovono sulla rappresentata linea secondo l'orario; quindi l'ultima fase prima della simulazione ha richiesto l'inserimento dell'orario d'esercizio. Il database dell'orario gestisce i tempi di partenza desiderati, gli intervalli minimi di fermata nelle località di servizio, i collegamenti e altri dati chiave necessari affinché i movimenti dei treni vengano simulati correttamente.

A scopo puramente di studio e analisi, è stato implementato un modello di esercizio che prevede una partenza di un treno, da ogni capolinea, ogni 10 min.

## LIVEWARE

Gli elementi considerati della componente Liveware sono rappresentati dalle due categorie di seguito elencate:

- gli operatori;
- i dirigenti.

Sia gli operatori, sia i dirigenti devono attenersi alle norme prescritte secondo le quali essi hanno delle mansioni e delle responsabilità ben precise da rispettare. Il mancato rispetto di una o più responsabilità può pregiudicare la sicurezza della circolazione.

Nel presente caso di studio, tra gli operatori è stato considerato soltanto il Personale di Condotta (PdC), preposto alla condotta del treno; tra i dirigenti è stato considerato soltanto il Dirigente Centrale Operativo (DCO), preposto alla regolazione e gestione della circolazione dei treni da un Posto Centrale o Posto di Controllo (PC).

### **6.3 Analisi della normativa ed elaborazione degli schemi procedurali**

Questa fase prevede l'analisi della Disposizione n. 51/2005 di RFI e s.m.i., che disciplina l'attuazione dei processi di gestione degli allarmi rilevabili dagli impianti RTB (Caldissimo, Caldo e Relativo), e l'elaborazione dei relativi schemi procedurali. Quest'ultima consiste nel tradurre il processo operativo in uno o più schemi ordinati in funzione del numero e della complessità delle attività da svolgere.

Osservando il principio di funzionamento (Figura 6.1) e le modalità di gestione degli allarmi RTB (Figura 6.2) è facilmente intuibile che le possibili combinazioni di risoluzione dell'allarme fanno riferimento ai seguenti casi:

- allarme Caldissimo → arresto del treno al successivo PVB;
- allarme Caldo → riduzione della velocità → Nessun allarme → ripresa della marcia regolare;
- allarme Caldo → riduzione della velocità → allarme Caldo → riduzione della velocità → arresto del treno imposto dal DCO, al successivo PVB;
- allarme Caldo → riduzione della velocità → allarme Caldissimo → arresto del treno al successivo PVB.

Come già enunciato, l'allarme Relativo è gestito come allarme Caldo sulle linee attrezzate con ERTMS/ETCS L2.

Nella Tabella 6.5 è riportato lo schema procedurale relativo all'allarme Caldissimo. E' possibile notare che ogni Azione/Operazione (a seconda se deve essere svolta dal PdC – DCO oppure dal PR-RTB – PI-RTB) è condizionata da una o più Responsabilità/Funzionalità che il PdC, il DCO o gli apparati tecnologici del sistema devono assumere per svolgere le attività correttamente. Pertanto, l'individuazione delle azioni/operazioni e delle responsabilità/funzionalità, eseguita in questa fase, rappresenta la modellizzazione della procedura operativa da integrare nel modello.

Lo schema che sintetizza il processo di gestione dell'allarme Caldissimo è concepito sotto forma di tabella, suddivisa in tre gruppi di colonne che fanno riferimento agli elementi Software, Hardware e Liveware.

Nel gruppo di colonne Software sono riportate le voci relativamente alle:

- Azioni/Operazioni (da A1 a A9 e da O1 a O3);
- Responsabilità/Funzionalità (da R1 a R9 e da F1 a F3);

e, infine, i riferimenti agli articoli della Disposizione 51/2005 di RFI e s.m.i.

Le azioni e le operazioni da svolgere rappresentano lo scambio delle informazioni tra il PdC, il DCO, il PR-RTB e il PI-RTB (attori che interagiscono tra loro).

Tabella 6.5 - Schema procedurale della gestione allarme Caldisissimo.

**SCHEMA PROCEDURALE: ALLARME CALDISSIMO  
LINEA AV/AC ROMA-NAPOLI ATTREZZATA CON ERTMS/ETCS L2**

SOFTWARE					LIVEWARE		HARDWARE		
SIGLA	AZIONI/OPERAZIONI	Disp. 51/2005 Disp. 69/2005	SIGLA	RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'	Disp. 51/2005	DCO	PdC	PI-RTB	PR-RTB
O 1	Trasmettere l'informazione di allarme Caldisissimo al PI-RTB. Informare il DCO della presenza di un treno in allarme Caldisissimo RTB.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - III p.e.	F 1	Aver rilevato un allarme Caldisissimo.					
O 2	Trasmettere al treno l'informazione di arresto al primo PVB incontrato.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - I p.e.	F 2	Aver ricevuto l'informazione di presenza "allarme Caldisissimo".					
A 1	Confermare la presa visione del messaggio. Arrestare il treno al primo PVB incontrato.		R 1	Ricevere l'informazione (anche con la visualizzazione di un messaggio relativo alla causa) manifestantesi come intervento del sistema per l'arresto del treno al primo PVB incontrato.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - II p.e.				
A 2	Attivare il comando di inibizione apertura segnali sul segnale virtuale e coincidente con il PVB dove il treno verrà arrestato. Operazione possibile anche a seguito dell'arresto del treno.	Art. 3 <b>sostituisce</b> Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - IV p.e.	R 2	Recepire l'apposita indicazione sul Train Describer (TD) e le segnalazioni nella Pagina Allarmi.					
A 3	Comunicare verbalmente l'arresto del treno al DCO.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - V p.e.	R 3	Aver arrestato il treno.					
O 3	Comunicare l'arresto del treno al DCO.		F 3	Solo se R 3 = N --> Aver arrestato il treno.					
A 4	Comunicare al PdC, mediante M40 RTB, le boccole interessate.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - VI p.e.	R 4	a) Ricevere l'informazione dell'arresto del treno. b) Prendere nota dei dati di dettaglio relativi agli allarmi.					
A 5	Chiedere al DCO specifica autorizzazione per eventuale visita lato interbinario.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - VIII p.e.	R 5	a) Ricevere le comunicazioni del DCO. b) Accertarsi sulla necessità della visita del treno lato interbinario.					
A 6	Sospendere la circolazione sui binari attigui e concedere l'autorizzazione per iscritto alla eventuale visita del treno lato interbinario.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - VII p.e.	R 6	Recepire la richiesta per l'eventuale visita lato interbinario, accertandosi sulle esigenze della circolazione.					
A 7	Effettuare gli accertamenti di competenza sul materiale rotabile.		R 7	Ricevere l'autorizzazione per iscritto dal DCO.					
A 8	Indicare al DCO i provvedimenti da adottare. Informare il Referente Accreditato dell'Impresa Ferroviaria (RA-IF) concordando gli eventuali successivi interventi di verifica.	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - VIII p.e.	R 8	Aver effettuato gli accertamenti sul materiale rotabile.					
A 9	Effettuare la procedura di inizio Missione (come previsto dall'IPCL).	Art. 3 - Punto 7	R 9	Aver constatato che il treno sia in condizione di ripartire.					

Tabella 6.6 - Schema procedurale della gestione allarme Caldo - Caldissimo.

**SCHEMA PROCEDURALE: ALLARME CALDO - ALLARME CALDISSIMO  
LINEA AV/AC ROMA-NAPOLI ATTREZZATA CON ERTMS/ETCS L2**

SOFTWARE				LIVEWARE		HARDWARE	
AZIONI/OPERAZIONI	Disp. 51/2005 Disp. 69/2005	RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'	Disp. 51/2005	DCO	PdC	PI-RTB	PR-RTB
O 1	Trasmettere l'informazione di allarme Caldo al PI-RTB. Informare il DCO della presenza di un treno in allarme Caldo RTB.	F 1	Art. 3 - Punto 2 - 2° cpv - III p.e.	Aver rilevato un allarme Caldo.			
O 2	Trasmettere al treno l'informazione di riduzione di velocità con inizio dal primo PVB incontrato.	F 2	Art. 3 - Punto 2 - 2° cpv - I p.e.	Aver ricevuto l'informazione di presenza "allarme Caldo".			
A 1	Confermare la presa visione del messaggio. Ridurre la velocità del treno dal primo PVB incontrato.	R 1		Ricevere l'informazione (anche con la visualizzazione di un messaggio relativo alla causa) manifestantesi come intervento del sistema per il rispetto della riduzione di velocità.			
A 2	Prendere atto ai soli fini della regolarità della presenza di un treno in allarme Caldo RTB.	R 2	Art. 3 - Punto 2 - 2° cpv - III p.e.	Recepire l'apposita indicazione sul Train Descriptor (TD) e le segnalazioni nella Pagina Allarmi.			
A 3	Condurre il treno a velocità ridotta.	R 3		Aver ridotto la velocità del treno dal primo PVB incontrato.			
O 3	Comunicare la riduzione di velocità o l'arresto del treno al DCO.	F 3		Solo se R 3 = N --> Aver ridotto la velocità o aver arrestato il treno.			
O 4	Trasmettere l'informazione di allarme Caldissimo al PI-RTB successivo al PR-RTB. Trasmettere al DCO la nuova informazione.	F 4	Art. 3 - Punto 2 - 2° cpv - III p.e.	Successivo PR-RTB; aver rilevato la nuova informazione: "allarme Caldissimo".			
O 5	Trasmettere al treno l'informazione di arresto al primo PVB incontrato.	F 5	Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - I p.e.	Successivo PI-RTB al successivo PR-RTB; aver ricevuto la relativa nuova informazione di "allarme Caldissimo".			
A 4	Confermare la presa visione del messaggio. Arrestare il treno al primo PVB incontrato.	R 4		a) Aver ridotto la velocità del treno. b) Ricevere l'informazione manifestantesi come intervento del sistema a per l'arresto del treno al primo PVB incontrato.			
A 5	Attivare il comando di inibizione segnali sul segnale virtuale e coincidente con il PVB dove il treno verrà arrestato.	R 5	Art. 3 <b>sostituisce</b> Art. 3 - Punto 1 - 2° cpv - IV p.e.	Recepire l'apposita indicazione sul Train Descriptor (TD) e le segnalazioni nella Pagina Allarmi.			
							Allarme Caldissimo

Per mezzo di un diagramma di flusso sono evidenziate le informazioni scambiate e soprattutto quale attore deve comunicarle o riceverle.

Le responsabilità e le funzionalità sono legate alle rispettive azioni e operazioni. Esse rappresentano delle attività il cui mancato rispetto può pregiudicare parzialmente o totalmente la corretta esecuzione dell'attività a essa corrispondente. Inoltre, l'eseguire o meno una responsabilità o funzionalità equivale a non eseguire l'azione o l'operazione precedente in maniera corretta.

Nello schema procedurale è possibile notare anche la presenza del sistema automatico di arresto del treno; esso interviene solo nel momento in cui il PdC non ottempera all'azione di arresto del treno al primo PVB, successivo al PR-RTB che ha rilevato l'elevata temperatura delle boccole.

Il processo di gestione dell'allarme Caldissimo della Disposizione n. 51/2005 di RFI tiene conto anche delle modalità e delle tempistiche da adottare successivamente all'arresto del treno. Lo schema procedurale tiene conto di ciò e pone in evidenza le procedure e gli accorgimenti che il PdC e il DCO devono adottare (accertamento della necessità di visitare il treno lato interbinario da parte del PdC e conseguente sospensione della circolazione sui binari attigui da parte del DCO, con successiva autorizzazione per iscritto all'eventuale visita del treno lato interbinario al PdC) per evitare l'investimento, da parte di altro treno, dello stesso PdC. In questo caso, il potenziale incidente associato all'evento pericoloso fa parte dei cosiddetti "incidenti atipici" ovvero quelli che riguardano esclusivamente le persone e sono dovuti al comportamento del personale, dei viaggiatori e di terzi (p.e. cadute durante la salita o la discesa dalle carrozze, cadute dai rotabili in movimento, investimenti, ecc.).

Seguendo lo stesso modo di procedere, è possibile ricavare tutti gli schemi procedurali relativi alle combinazioni di allarmi: Caldo/Nessun allarme; Caldo/Caldo e Caldo/Caldissimo.

A titolo puramente esemplificativo, si riporta nella Tabella 6.6 lo schema procedurale relativo al caso di rilevamento allarme Caldo e successivo allarme Caldissimo.

## **6.4 Individuazione dei possibili eventi pericolosi**

Come espresso nel § 4.2, questa fase richiede conoscenze e competenze approfondite sul sistema ferroviario affinché possano essere individuati tutti gli eventi pericolosi cui potrebbe essere soggetto l'intero sistema oggetto d'analisi.

A partire dalla banca dati, denominata "Registro degli eventi pericolosi", realizzata ad hoc e contenente l'elenco degli eventi pericolosi individuati per un gran numero di situazioni diverse, viene estrapolato lo specifico record che individua l'evento pericoloso "*Boccole calde o RTB con esito positivo*" (Tabella 6.7).

Il suddetto evento è classificato in funzione del potenziale incidente che da esso può derivare: "*Svio di mezzo di trazione o rotabile in composizione treno*".

La categoria del potenziale incidente sopracitato è “tipico” (incidente alle persone e all’infrastruttura); esso può avere come conseguenze: danni alle persone, all’infrastruttura, all’intero sistema ferroviario, all’ambiente circostante, nonché danni dovuti alle interruzioni della circolazione.

Tabella 6.7 - Selezione del record “boccole calde” dal Registro eventi pericolosi.

ID	EVENTO PERICOLOSO	POTENZIALE INCIDENTE	CATEGORIA INCIDENTE	TIPOLOGIA INCIDENTE	CLASSE INCIDENTE
376	BOCCOLE CALDE O RTB CON ESITO POSITIVO	SVIO DI MEZZO DI TRAZIONE O ROTABILE IN COMPOSIZIONE TRENO	TIPICO	INCIDENTE IN CIRCOLAZIONE	SVIO

Fonte: Registro degli eventi pericolosi (data base realizzato ad hoc).

La tipologia del potenziale incidente “Svio di mezzo di trazione o rotabile in composizione treno” è “incidente in circolazione”, mentre la classe è “svio”.

## 6.5 Individuazione degli scenari critici

Definito il sistema, analizzati i processi operativi che sottendono la gestione degli allarmi RTB, determinati i relativi schemi procedurali e, infine, individuati i potenziali incidenti; la successiva fase prevede l’individuazione dei cosiddetti “scenari critici”.

Si ricorda che, nell’ambito della metodologia proposta, per *scenario critico* si intende un insieme di “combinazioni critiche” associate al potenziale incidente individuato. Per *combinazione critica* si intende, invece, una situazione potenzialmente pericolosa che potrebbe verificarsi quando una o più responsabilità (o funzionalità), definite nella seconda fase, non sono rispettate. L’individuazione degli scenari critici consente la determinazione di tutte le combinazioni critiche che possono pregiudicare le condizioni di sicurezza dell’esercizio.

Una responsabilità (o funzionalità) non rispettata (Stato N), pertanto, può costituire la causa di inconvenienti d’esercizio. Per garantire la sicurezza è necessario che ognuna delle condizioni di esercizio fondamentali sia rispettata (Stato A).

Escludendo l’individuazione del potenziale incidente atipico “investimento al personale”, l’unico potenziale incidente individuato “Svio di mezzo di trazione o rotabile in composizione treno” determina un unico scenario critico, d’ora in poi definito semplicemente “svio”.

In base a quanto sopra detto, prendendo in considerazione solamente il caso di allarme Caldissimo, è opportuno e conveniente, quindi, analizzare solo la parte superiore dello schema procedurale, così come riportato in Tabella 6.8. Per motivi di maggior semplicità nella trattazione, non vengono riportati i punti della norma.

Per garantire l’arresto del treno a seguito della segnalazione di boccola in allarme Caldissimo, in base al processo operativo definito nella norma, occorre che le condizioni “aver rilevato un allarme Caldissimo” e “aver ricevuto l’informazione di allarme Caldissimo” (funzionalità F1 ed F2) siano rispettate dal PR-RTB e dal PI-RTB. Allo stesso modo, occorre che le tre responsabilità R1, R2 ed R3 siano rispettate dal PdC e dal DCO. La funzionalità F3, che garantisce l’intervento del

sistema automatico di arresto in caso di fallimento del PdC, è conseguenza diretta della R3; infatti, solo se R3 è Negativa (Stato N), allora F3 potrà essere Affermativa (Stato A).

Tabella 6.8 - Schema procedurale ridotto della gestione allarme Caldissimo.

**SCHEMA PROCEDURALE RIDOTTO: ALLARME CALDISSIMO  
LINEA AV/AC ROMA-NAPOLI ATTREZZATA CON ERTMS/ETCS L2**

SOFTWARE				LIVEWARE		HARDWARE	
SIGLA	AZIONI/OPERAZIONI	SIGLA	RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'	DCO	PdC	PI-RTB	PR-RTB
O 1	Trasmettere l'informazione di allarme Caldissimo al PI-RTB. Informare il DCO della presenza di un treno in allarme Caldissimo RTB.	F 1	Aver rilevato un allarme Caldissimo.				
O 2	Trasmettere al treno l'informazione di arresto al primo PVB incontrato.	F 2	Aver ricevuto l'informazione di presenza "allarme Caldissimo".				
A 1	Confermare la presa visione del messaggio. Arrestare il treno al primo PVB incontrato.	R 1	Ricevere l'informazione (anche con la visualizzazione di un messaggio relativo alla causa) manifestantesi come intervento del sistema per l'arresto del treno al primo PVB incontrato.				
A 2	Attivare il comando di inibizione apertura segnali sul segnale virtuale e coincidente con il PVB dove il treno verrà arrestato. Operazione possibile anche a seguito dell'arresto del treno.	R 2	Recepire l'apposita indicazione sul Train Desciber (TD) e le segnalazioni nella Pagina Allarmi.				
		R 3	Aver arrestato il treno.				
		F 3	Solo se R 3 = N --> Aver arrestato il treno.				

Fonte: Elaborazione sulla base delle informazioni desunte dalla Disposizione n. 51/2005 di RFI.

Poiché il rispetto o meno di una responsabilità (o funzionalità) costituisce una condizione di esercizio, si hanno tante condizioni d'esercizio quante sono le responsabilità e le funzionalità (in numero totale di 6) e tante combinazioni teoriche quanto il termine  $2^6$  (in numero totale di 64) come riportato nella Tabella 6.9.

Tabella 6.9 - Matrice delle conseguenze – scenario critico “svio”.

SIGLA	RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'	COMBINAZIONI TEORICHE				
		1	2	3	...	$2^6$
F 1	Aver rilevato un allarme Caldissimo.	A	A	A	...	N
F 2	Aver ricevuto l'informazione di presenza "allarme Caldissimo".	A	A	A	...	N
R 1	Ricevere l'informazione come intervento del sistema per l'arresto del treno al primo PVB incontrato.	A	A	A	...	N
R 2	Recepire l'apposita indicazione sul Train Desciber (TD) e le segnalazioni nella Pagina Allarmi.	A	A	A	...	N
R 3	Aver arrestato il treno.	A	A	N	...	N
F 3	Solo se R 3 = N --> Aver arrestato il treno.	A	N	A	...	N
<b>SCENARIO CRITICO</b>						
1	SVIO	IMP	IMP	IMP	...	POS

Fonte: Elaborazione sulla base delle informazioni desunte dalla Disposizione n. 51/2005 di RFI.

La totalità delle combinazioni teoriche costituisce la somma delle combinazioni possibili e di quelle impossibili, queste ultime impossibili a verificarsi a causa della dipendenza diretta o indiretta tra le responsabilità (o funzionalità). Le combinazioni critiche devono essere individuate all'interno dell'insieme delle combinazioni possibili.

Nella Tabella 6.10 è riportata la “matrice delle dipendenze” all’interno della quale vengono relazionate tra loro le responsabilità (o funzionalità). La dipendenza tra due responsabilità (o funzionalità) è dovuta alla successione delle attività individuate nello schema procedurale elaborato nella Fase 2. A partire dalla matrice delle dipendenze è possibile individuare anche le “condizioni” (*m*) di combinazioni di stati impossibili.

Tabella 6.10 - Matrice delle dipendenze e condizioni di combinazioni impossibili.

		RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'					
		F1	F2	R1	R2	R3	F3
RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'	F1						
	F2	D					
	R1	I	D				
	R2	D					
	R3	I	I	D			
	F3					D	

D = Dipendenza diretta dell'elemento della riga dall'elemento della colonna  
I = Dipendenza indiretta dell'elemento della riga dall'elemento della colonna

F1	N	F2	A
F1	N	R1	A
F1	N	R2	A
F1	N	R3	A
F2	N	R1	A

F2	N	R3	A
R1	N	R3	A
R3	A	F3	A

Per determinare le combinazioni possibili e, tra queste, le combinazioni critiche è stato adottato il programma di calcolo MatriceStati, creato ad hoc, i cui dati di output, elaborabili con il software Excel, sono riportati nella Figura 6.7.

Figura 6.7 - Programma MatriceStati – finestra di inserimento dati e output.



Fonte: Elaborazione effettuata con il programma MatriceStati.

Per definire completamente lo scenario critico “svio”, il programma determina dapprima la matrice delle combinazioni possibili, successivamente individua le combinazioni critiche attraverso l’elaborazione dei dati di input forniti (numero di

responsabilità, numero di funzionalità, numero di condizioni di combinazioni di stati impossibili, specifica delle relazioni di stati impossibili, ecc.) compresa la matrice (Tabella 6.11) che individua il condizionamento di ogni responsabilità/funzionalità sullo scenario critico “svio”, così come definito nel § 4.2.

Tabella 6.11 - Matrice scenario critico – responsabilità/funzionalità.

RESPONSABILITA'/FUNZIONALITA'

	F1	F2	R1	R2	R3	F3
1	x	x	x		c.n.	c.n.

c.n. = condizione necessaria affinché si presenti uno scenario critico  
x = condizione scatenante uno scenario critico ma non necessaria

Si ricorda che l'elemento vuoto significa che lo svio non è condizionato dalla *j-esima* responsabilità (o funzionalità). La sigla *c.n.* si ha quando, affinché si verifichi lo svio, è condizione necessaria che la *j-esima* responsabilità (o funzionalità) non sia rispettata. La sigla *x* significa che la *j-esima* responsabilità (o funzionalità) non rispettata può scatenare lo svio.

Determinato l'insieme delle combinazioni possibili (critiche e non critiche), l'attività successiva prevede l'assegnazione della probabilità  $p_i(N)$  allo stato  $S = N$  di ogni singola responsabilità/funzionalità.

L'assegnazione della probabilità  $p_i(N)$  avviene tenendo conto di quanto già espresso nel capitolo precedente della presente Tesi.

I valori di  $p_i(N)$  adottati per la componente umana fanno riferimento a (Tabella 4.3):

- Operatore (PdC)  $\rightarrow p_i(N) = 0,005000$ ;
- Dirigente (DCO)  $\rightarrow p_i(N) = 0,000175$ .

I valori di  $p_i(N)$  adottati per la componente fisica non umana fanno riferimento a un valore SIL 4 delle apparecchiature tecnologiche (PR-RTB e PI-RTB) (Tabella 4.4).

A partire dall'assegnazione della probabilità  $p_i(N)$ , la metodologia proposta consente di individuare le probabilità di accadimento (comprese quelle normalizzate) per ogni singola combinazione possibile, individuata. I risultati delle analisi sono riportati nella Tabella 6.12.

Il valore della probabilità di accadimento dello scenario critico “svio”  $P(I)$  (e di  $P(S)$ ) è dato da:

$$P(I) = \sum_{j=1}^{cc} (p'_{c_i})_j = 0,000098058395707$$

$$P(S) = \sum_{j=1}^{cnc} (p'_{c_i})_j = 0,999901941604293$$

tale che:

$$P(I) + P(S) = 1$$

Il termine *cc* rappresenta il numero di combinazioni di stati critici, *cnc* il numero di combinazioni di stati non critici, tali che  $cc + cnc = n$  (numero di combinazioni di stati possibili).

Tabella 6.12 - Probabilità di accadimento delle combinazioni possibili.

SCENARIO CRITICO: SVIO

$P_A$	$P_N$
0,999900000	0,000100000
0,999900000	0,000100000
0,995000000	0,005000000
0,999825000	0,000175000
0,995000000	0,005000000
0,999900000	0,000100000

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
F1	N	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
F2	N	N	A	A	N	A	A	A	A	N	A	A	N	A	A
R1	N	N	N	A	N	N	A	A	A	N	N	A	N	N	A
R2	N	N	N	N	A	A	A	N	A	N	N	N	A	A	A
R3	N	N	N	N	N	N	N	A	A	N	N	N	N	N	N
F3	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A	A	A	A	A	A
	CC	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
F1	1E-04	1E+00	1E-00	1E-00	1E+00	1E+00	1E-00	1E-00	1E+00	1E-00	1E-00	1E+00	1E+00	1E-00	1E-00
F2	1E-04	1E-04	1E-00	1E-00	1E-04	1E+00	1E-00	1E-00	1E+00	1E-04	1E-00	1E+00	1E-04	1E-00	1E-00
R1	5E-03	5E-03	5E-03	1E-00	5E-03	5E-03	1E+00	1E-00	1E+00	5E-03	5E-03	1E+00	5E-03	5E-03	1E-00
R2	2E-04	2E-04	2E-04	2E-04	1E+00	1E+00	1E+00	2E-04	1E+00	2E-04	2E-04	2E-04	1E+00	1E+00	1E-00
R3	5E-03	1E-00	1E+00	5E-03	5E-03	5E-03	5E-03	5E-03	5E-03						
F3	1E-04	1E+00	1E-00	1E-00	1E+00	1E+00	1E-00	1E-00							
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{15}$
	4E-21	4E-17	4E-13	9E-11	2E-13	2E-09	5E-07	2E-08	1E-04	4E-13	4E-09	9E-07	2E-09	2E-05	5E-03
	$P'_1$	$P'_2$	$P'_3$	$P'_4$	$P'_5$	$P'_6$	$P'_7$	$P'_8$	$P'_9$	$P'_{10}$	$P'_{11}$	$P'_{12}$	$P'_{13}$	$P'_{14}$	$P'_{15}$
	9E-19	9E-15	9E-11	2E-08	5E-11	5E-07	1E-04	3E-06	2E-02	9E-11	9E-07	2E-04	5E-07	5E-03	1E+00

Fonte: Elaborazione effettuata con il programma *MatriceStati*.

## 6.6 Analisi dei livelli di rischio dello scenario critico “svio”

La probabilità  $P(I)$  di accadimento dello scenario critico “svio” ( $I$ ), determinata nella precedente fase, è generalmente espressa come rapporto tra il numero di occorrenze  $A(I)$  e il numero totale di eventi pericolosi ( $N$ ). Ricordando quanto già espresso nel § 4.2, è possibile ricavare la frequenza di accadimento dello scenario critico “svio”  $F(I)$  mediante l'espressione:

$$F(I) = P(I) * \frac{N}{T}$$

dove  $N/T$  esprime il numero totale di eventi pericolosi relativi al periodo di riferimento.

Conosciuto il rapporto  $N/T$  (o frequenza dell'evento pericoloso “*Boccole calde o RTB con esito positivo*”) è possibile determinare la frequenza  $F(I)$ , utilizzata per determinare il livello di rischio.

Per valori di  $N/T$  fino a 50 eventi/anno, la  $F(I)$  è inferiore a 0,005 (categoria “inverosimile” – Tabella 4.5).

Per valori di  $N/T$  superiori a 50 eventi/anno e fino a 295 eventi/anno, la  $F(I)$  è compresa tra 0,005 e 0,029 (categoria “improbabile” – Tabella 4.5).

A partire dai valori suddetti della frequenza  $F(I)$ , il rischio residuo è considerato accettabile (livello “trascurabile”) solo ed esclusivamente per livelli di gravità delle conseguenze pari a “insignificante”; oppure per livelli pari a “marginale” o “critico” solo se  $N/T < 50$  eventi/anno.

Risulta ancora accettabile il rischio residuo quando si dimostra che è “tollerabile” e che sono state “adottate tutte le misure e le cautele suggerite dalla tecnica e dalla pratica, atte a evitare sinistri”. A tal fine, la metodologia consente di analizzare l'andamento del livello di rischio residuo al variare dei parametri caratteristici che lo compongono (frequenza e gravità), al variare dei processi operativi alla base della gestione degli allarmi RTB, al variare delle probabilità di errore della componente umana o dell'affidabilità degli apparati.

Un'estensione del concetto sopra espresso trova applicazione nel successivo paragrafo 6.8.

## 6.7 Valutazione degli effetti sulla circolazione

Per valutare gli effetti sulla circolazione dei treni e la qualità del servizio, nella linea oggetto di studio, sono stati determinati alcuni indici caratteristici. Tali indici fanno riferimento al numero di treni ritardati e al valore del ritardo di ogni singolo treno (ovvero di tutti i treni ritardati).

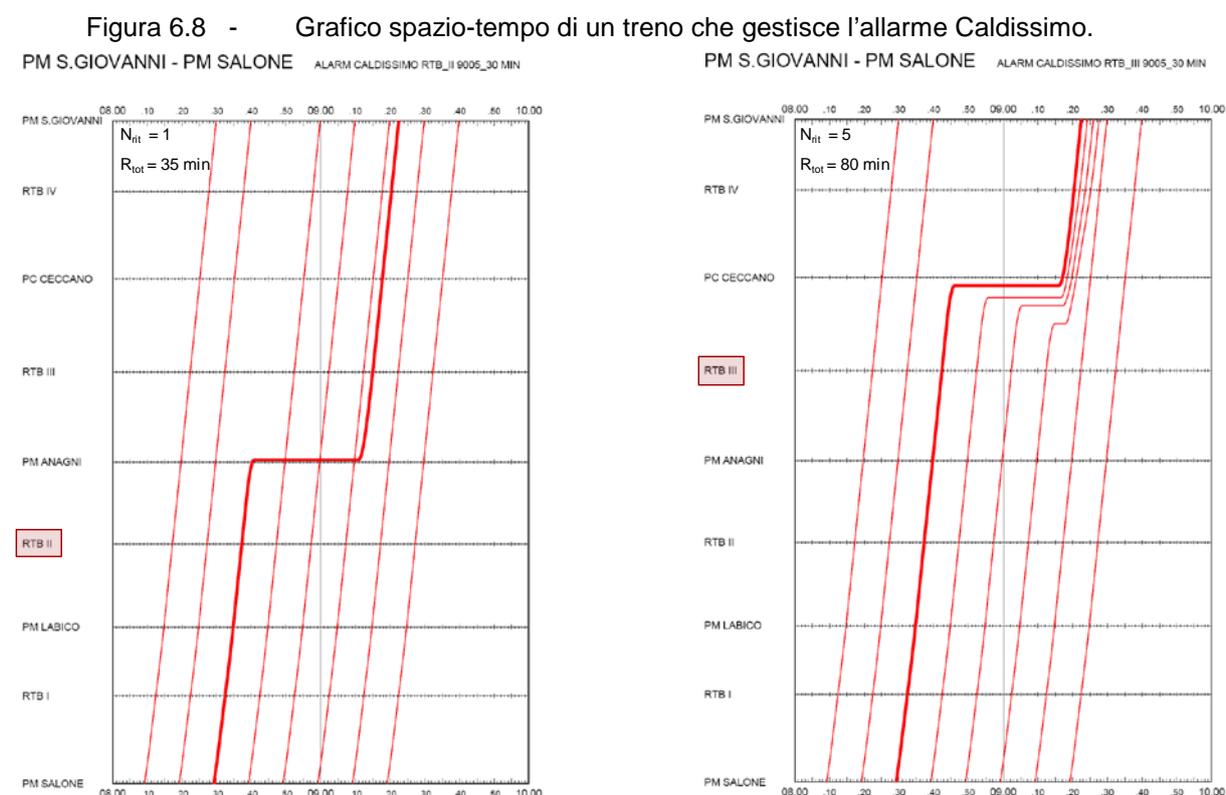
In generale, le tracce considerate nel modello sono state organizzate secondo il principio per cui i treni devono arrecare, in caso di ritardo, il minor disturbo possibile agli altri, ossia che il ritardo di un treno non deve provocare slittamenti di orario ad altri convogli, o comunque il minor disagio possibile.

Nel caso di studio specifico, allarme Caldissimo sulla linea AV/AC Roma – Napoli con ERTMS/ETCS L2, gli effetti dipendono fortemente dalla localizzazione del PR-RTB che rileva la temperatura delle boccole e dall'ubicazione del PVB, in corrispondenza del PdS successivo al PR-RTB stesso, dove avverrà la visita ispettiva del treno da parte del PdC.

Quanto detto sopra, è un'affermazione che deriva dall'osservazione effettuata sugli schemi funzionali dei vari PdS presenti sulla linea. In particolare, esistono PdS classificati come PM dotati di binari di precedenza ove è possibile effettuare la sosta tecnica per la visita del treno; viceversa esistono PdS classificati come PC in cui il PVB per la verifica del treno è situato in corrispondenza del binario di corsa. In quest'ultimo caso, qualora un treno dovesse subire la sosta per il controllo delle boccole, non permetterebbe il sorpasso ad altri treni che gli seguono.

La Figura 6.8 dimostra quanto sopra esposto. Osservando la figura è possibile comprendere che, qualora l'allarme Caldissimo venisse rilevato in corrispondenza dell'impianto *RTB II* (posto al km 49,002), l'arresto del treno dovrebbe avvenire in corrispondenza del *PVB II* (posto al km 61,505) situato all'interno del PM Anagni; in questo impianto sono presenti quattro binari di circolazione, di cui, due di corsa e gli altri due di precedenza (uno per ogni senso di marcia).

Per questo specifico caso, l'analisi effettuata con il software OpenTrack<sup>®</sup>, ha fornito valori del ritardo totale pari a 35 min (per una durata dell'avaria ipotizzata di 30 min) con un solo treno ritardato, quello che subisce l'avaria.



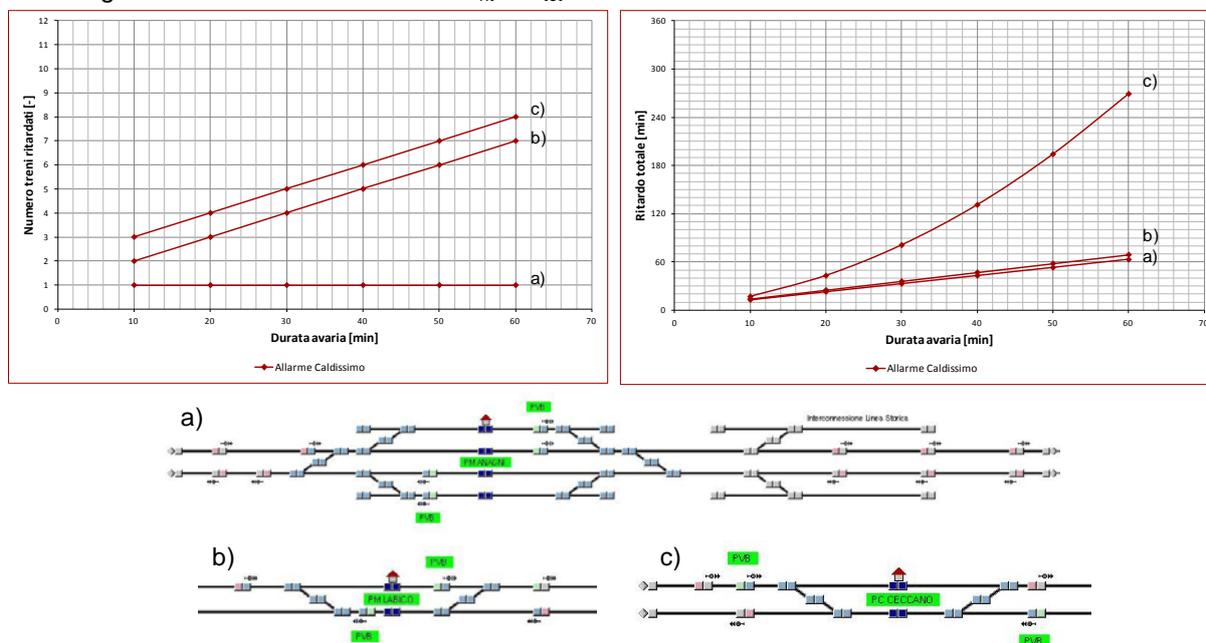
Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack<sup>®</sup>.

Se l'allarme Caldissimo venisse rilevato in corrispondenza dell'impianto *RTB III* (posto al km 74,561), in questa circostanza, l'arresto del treno dovrebbe avvenire in corrispondenza del *PVB III* (posto al km 87,204) situato all'interno del PC Ceccano; impianto dove sono presenti solo i due binari di corsa. In questo specifico secondo caso, l'analisi effettuata con OpenTrack<sup>®</sup> ha fornito valori del ritardo totale pari a 80 min (per una durata dell'avaria ipotizzata sempre di 30 min) con ben cinque treni ritardati, compreso quello che subisce l'avaria.

La metodologia proposta consente di determinare il numero dei treni ritardati ( $N_{rit}$ ) e il ritardo totale subito dai treni ritardati ( $R_{tot}$ ). Tutto ciò in funzione della tipologia di allarme rilevato (allarme Caldissimo, allarme Caldo-Nessun allarme, allarme Caldo-Caldo, allarme Caldo-Caldissimo), della durata dell'avaria e del PdS dove è ubicato il PVB per effettuare la visita del treno.

Nella Figura 6.9 sono riportati due grafici che fanno riferimento, rispettivamente, all'andamento di  $N_{rit}$  e  $R_{tot}$  in funzione della durata dell'avaria e di alcuni PdS (PM Anagni (a), PM Labico (b) e PC Ceccano (c)).

Figura 6.9 - Andamento di  $N_{rit}$  e  $R_{tot}$  in funzione della durata dell'avaria.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack<sup>®</sup>.

La differenza tra i ritardi totali del caso a) e quelli del caso c) è pronunciata, e riafferma il concetto finora espresso. A parità di gestione dell'allarme Caldissimo, gli effetti sull'esercizio ferroviario, sulla regolarità, quindi, sulla capacità dell'infrastruttura sono notevolmente influenzati dal piano del ferro dei PdS e dall'ubicazione dei PVB.

## 6.8 Analisi di sensitività applicata al caso di studio

L'ultima fase della metodologia sviluppata, applicata al caso di studio degli impianti RTB della linea AV/AC Roma –Napoli, ha previsto l'analisi dei livelli di rischio per l'unico scenario critico individuato (svio) e la corrispondente valutazione dei possibili effetti sulla circolazione ferroviaria.

In generale, dalla valutazione del livello di rischio residuo vengono posti in evidenza gli interventi da apportare al sistema per migliorare il livello di sicurezza. Inoltre, l'analisi delle categorie di frequenza e dei livelli di gravità delle conseguenze detta la priorità degli interventi stessi, perché si tende ad agire prima sugli eventi più frequenti e di gravità maggiore, e successivamente, su quelli di frequenza e gravità minore.

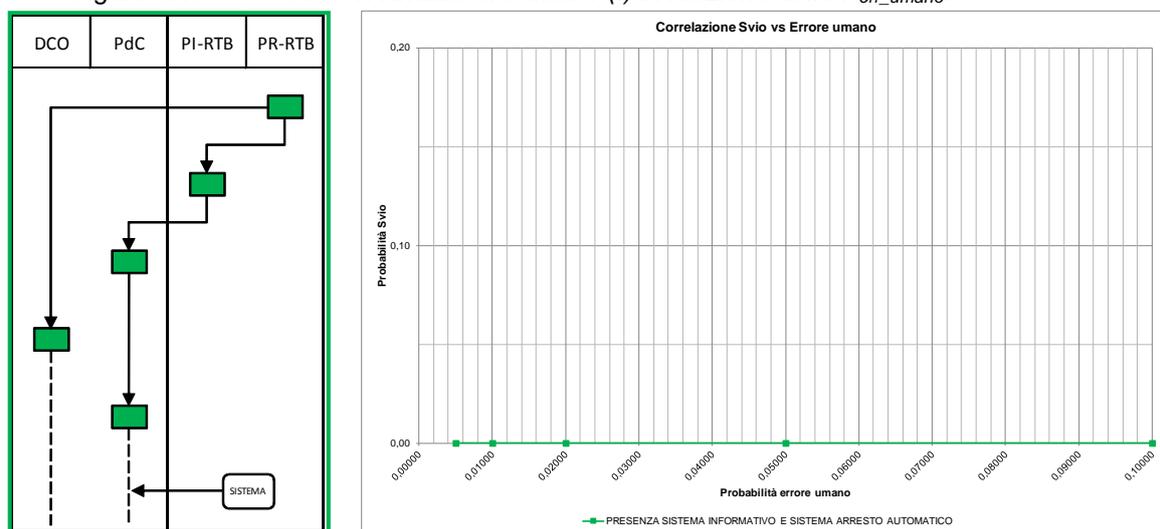
Gli interventi possono fare riferimento, ad esempio, alla sempre più costante e continua formazione del personale, alla progettazione di nuovi sistemi di gestione della sicurezza, all'aggiornamento e alla modifica delle procedure operative, alla riprogettazione delle tecnologie impiegate, ecc.

In questo paragrafo si vuole mettere in luce la validità della metodologia nel testare alcune modifiche significative al sistema.

Il primo caso si limita a determinare l'andamento della probabilità di accadimento dello scenario critico "svio" in funzione della variazione della probabilità di errore umano, ferme restando le attuali modalità di gestione dell'allarme Caldissimo (presenza del sistema informativo tra PR-RTB e PdC per mezzo del PI-RTB, presenza del sistema automatico di arresto del treno).

Assegnando valori diversi, in ordine crescente, alle probabilità  $p_i(N)$  degli stati  $S = N$  di ogni singola responsabilità (solo componente umana, PdC e DCO), risulta che la probabilità di accadimento dello scenario critico "svio"  $P(I)$  è di fatto indipendente dalla componente umana (Figura 6.10). Il risultato sembra quasi ovvio e di facile intuizione se si pensa all'intervento del sistema automatico di arresto del treno in caso di fallimento dell'uomo (PdC).

Figura 6.10 - Caso 1. Andamento della  $P(I)$  in funzione della  $P_{err\_umano}$ .



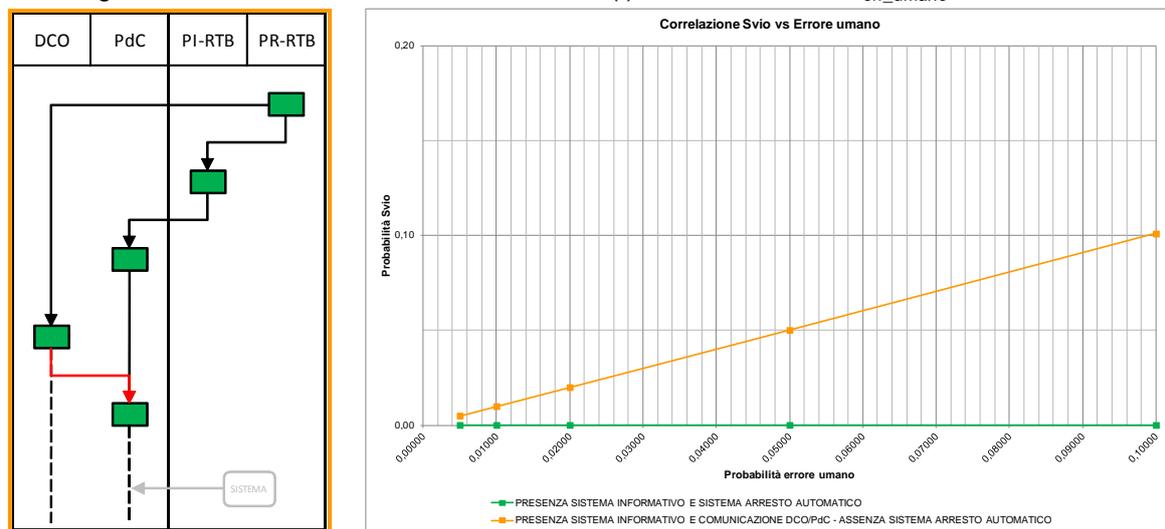
Il secondo caso si riferisce a una modifica rilevante per la sicurezza, ovvero alla sostituzione del sistema automatico di arresto del treno con un sistema di scambio di informazioni tra il PdC e il DCO.

Questo tipo di modifica rende necessaria la completa rielaborazione dei dati di input (analisi ed elaborazione degli schemi procedurali, individuazione degli scenari critici, ecc.) poiché cambiano le condizioni al contorno. A titolo illustrativo si riporta esclusivamente il risultato di tale elaborazione (Figura 6.11).

E' possibile notare che, nel secondo caso, la probabilità di accadimento dello scenario critico "svio"  $P(I)$  non è più indipendente dalla componente umana, anzi cresce linearmente all'aumentare della probabilità di errore umano. Anche in questo caso il risultato è prevedibile se si pensa che le funzionalità del sistema automatico di arresto del treno sono demandate interamente alla componente umana (PdC).

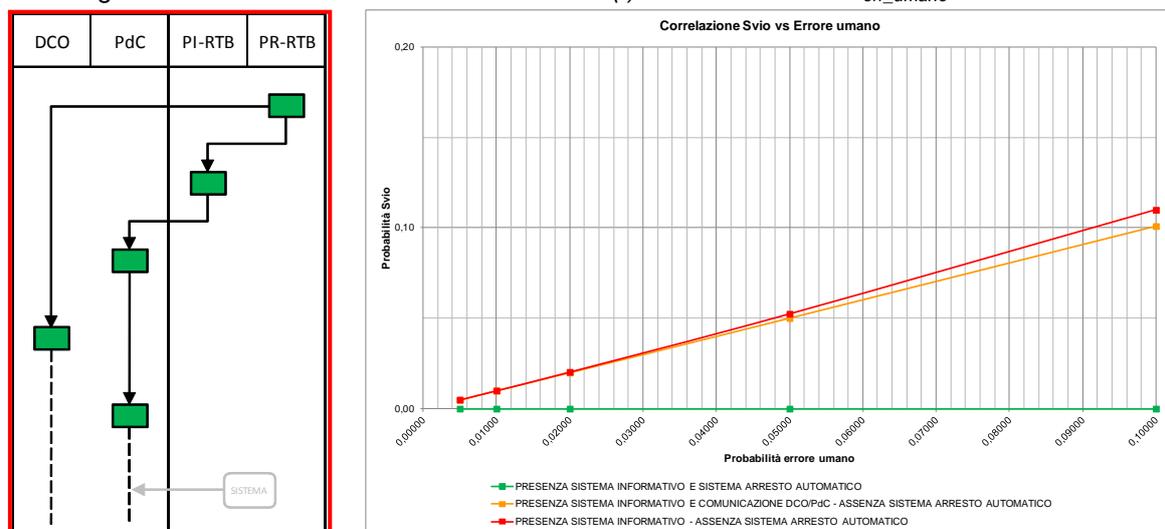
Nella figura viene riportata anche, a titolo di solo confronto, la curva determinata nel primo caso trattato. Per valori di probabilità di errore umano compresi tra 0,005 e 0,010 la probabilità di svio aumenta poco nel secondo caso (presenza del sistema informativo, presenza del sistema di comunicazione tra DCO e PdC, assenza del sistema automatico di arresto del treno) rispetto al primo caso.

Figura 6.11 - Caso 2. Andamento della  $P(I)$  in funzione della  $P_{err\_umano}$ .



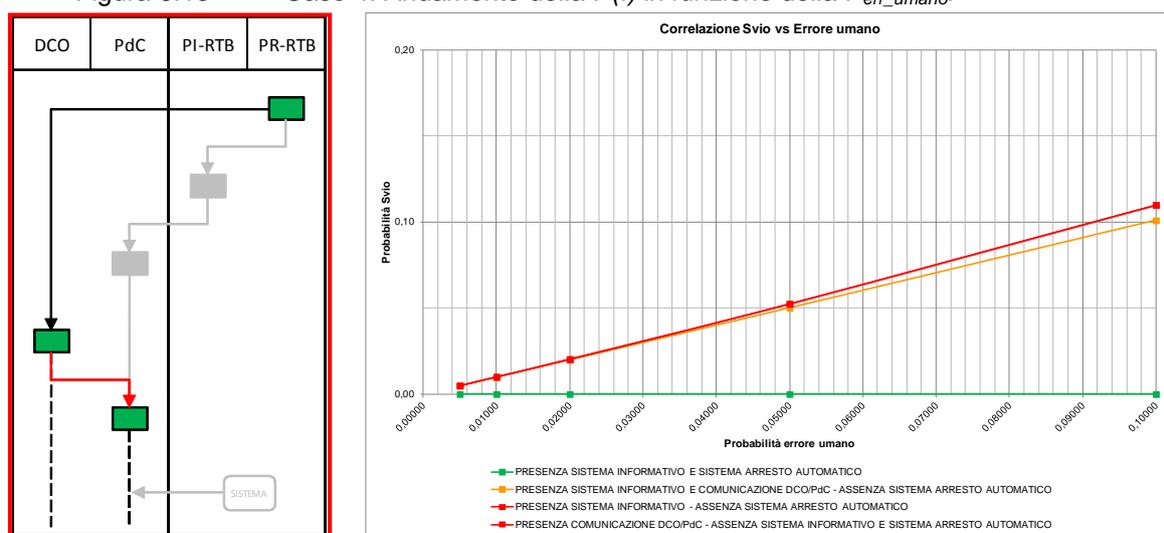
Il terzo caso si riferisce a un'ulteriore modifica rilevante per la sicurezza, ovvero all'eliminazione del sistema automatico di arresto del treno. Come il precedente caso, questo tipo di modifica rende necessaria la rielaborazione dei dati di input del modello. L'assenza del sistema di arresto determina un progressivo aumento della  $P(I)$  all'aumentare della probabilità di errore umano. In termini di sicurezza, ciò rappresenta un peggioramento rispetto ai due casi precedenti (Figura 6.12).

Figura 6.12 - Caso 3. Andamento della  $P(I)$  in funzione della  $P_{err\_umano}$ .



Il quarto caso, infine, prevede una gestione dell'allarme Caldissimo senza l'ausilio del sistema informativo (PI-RTB) tra il PR-RTB e il PdC e senza il possibile apporto del sistema automatico di arresto del treno, in caso di fallimento della componente umana. La modalità di gestione è basata sull'invio dell'informazione di presenza allarme Caldissimo al solo DCO da parte del PR-RTB. Dovrà essere, quindi, il DCO a comunicare verbalmente, o con altro sistema, l'informazione al PdC. Questo caso è equivalente al terzo, in termini di valori e andamento della probabilità di svio in funzione della probabilità di errore umano.

Figura 6.13 - Caso 4. Andamento della  $P(I)$  in funzione della  $P_{err\_umano}$ .



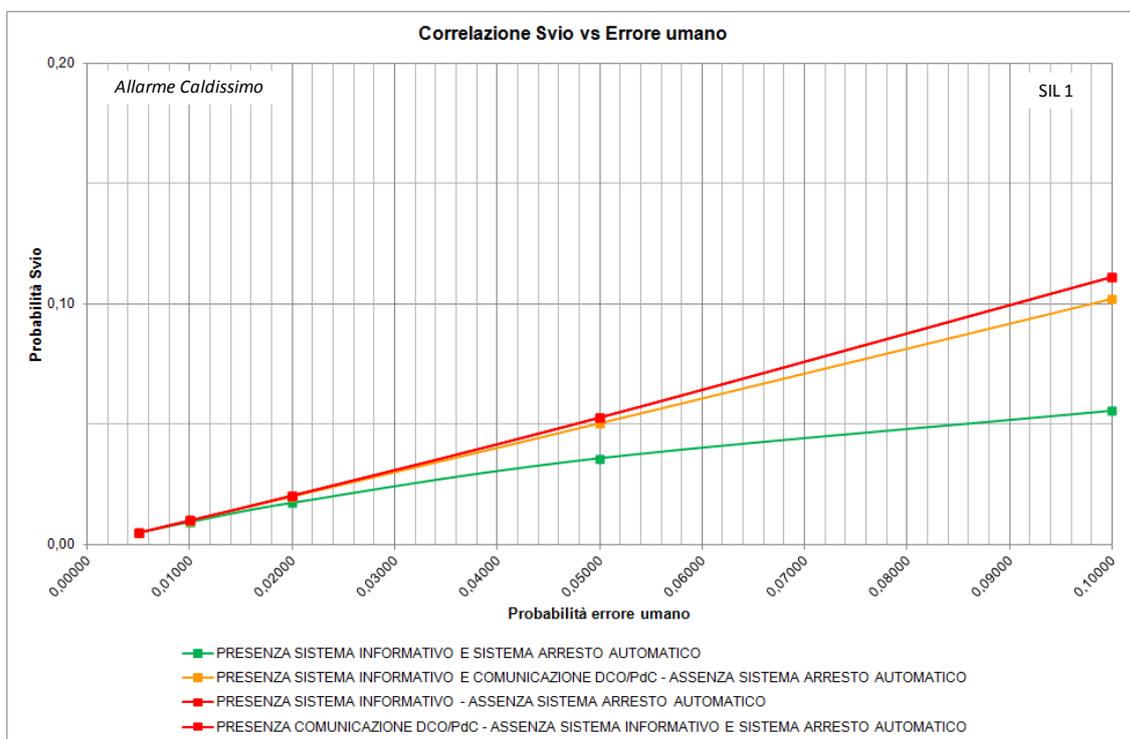
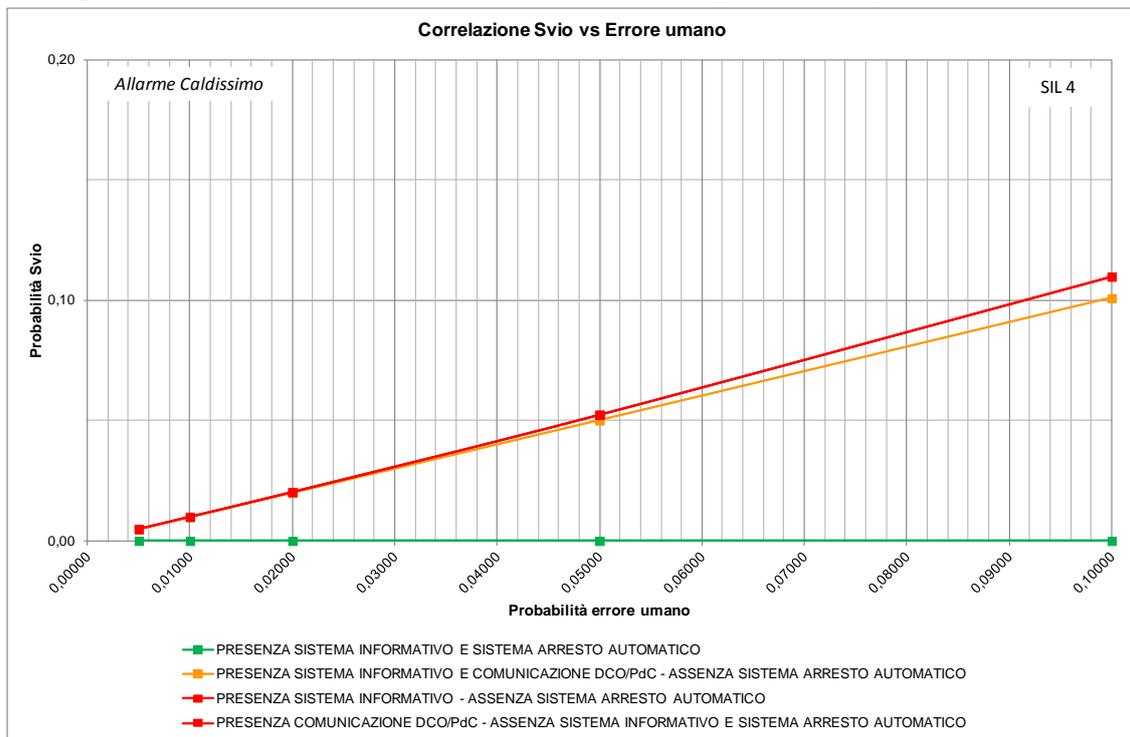
I quattro casi finora trattati, hanno tenuto in considerazione il massimo Livello di Integrità della Sicurezza per gli apparati tecnologici (SIL 4).

La metodologia consente, anche, di effettuare delle analisi di sensitività variando i valori SIL relativi al PR-RTB e al PI-RTB. A titolo di confronto, nella Figura 6.14, si riportano due diagrammi che rappresentano, rispettivamente per livelli SIL 4 e SIL 1, l'andamento delle probabilità di accadimento dello scenario critico "svio" in funzione dell'andamento crescente della probabilità di errore umano, per ogni caso di studio trattato in questo specifico paragrafo.

Dal confronto dei due diagrammi nascono alcune considerazioni relative alle due curve corrispondenti di colore verde (rappresentano l'attuale modo di gestione dell'allarme Caldissimo su linee AV/AC attrezzate con ERTMS/ETCS L2).

Dalla prima immagine, come già scritto, si deduce l'indipendenza di  $P(I)$  dalla probabilità di errore umano. Ciò sembra vero, però, solo per SIL 4; infatti, considerando un SIL 1, la curva non è più piatta ma si inarca a causa della presenza di valori della probabilità di errore delle apparecchiature tecnologiche che sono più prossimi a quelli della probabilità di errore della componente umana. Quest'ultima applicazione mette in luce l'utilità della metodologia nelle fasi di valutazione di diverse soluzioni progettuali o applicazioni normative.

Figura 6.14 - Confronto tra i risultati dei casi trattati (SIL 4 e SIL 1).



## 7. Sintesi dei risultati ottenuti

Il caso di studio trattato si riferisce agli impianti RTB della linea ferroviaria AV/AC Roma – Napoli, attrezzata con sistema ERTMS/ETCS L2.

Un apparato RTB è in grado di fornire le seguenti tipologie di allarme:

- *Allarme selettivo (Caldissimo; Caldo; Relativo);*
- *Allarme non selettivo*, determinato nel caso in cui non sia possibile rilevare l'ubicazione di tutte le boccole in allarme. Analogamente all'allarme selettivo, possiede tre possibili stati.

Le fasi operative, svolte nel processo di analisi, sono state le seguenti:

- definizione del sistema (*fase 1*);
- analisi della normativa ed elaborazione degli schemi procedurali (*fase 2*);
- individuazione dei possibili eventi pericolosi (*fase 3*);
- individuazione degli scenari critici (*fase 4*);
- analisi e valutazione dei livelli di rischio degli scenari critici (*fase 5*).

Nella fase 1 sono state individuate le componenti del sistema:

- *Software* (RCT, RS, PGOS, ecc.);
- *Hardware* (PR-RTB, PI-RTB, ecc.);
- *Environment* (caratteristiche della linea);
- *Liveware* (DCO e PdC).

Nella *fase 2*, applicando i processi di gestione degli allarmi RTB descritti nella Disposizione 51/2005 di RFI, sono state individuate le interazioni tra le componenti Hardware e Liveware, nonché le responsabilità e le funzionalità che ogni componente deve rispettare al fine di garantire la gestione del servizio in sicurezza.

Nella *fase 4* è stato individuato lo scenario critico “*svio*” in corrispondenza dell'evento pericoloso preventivamente individuato “*boccola calda*” (*fase 3*).

L'analisi dei livelli di rischio dello scenario critico individuato (*fase 5*) ha richiesto l'assegnazione dei valori delle  $p_i(N)$  a ogni componente Hardware e Liveware.

I valori delle  $p_i(N)$  adottati per la componente umana sono stati determinati dall'applicazione del modello TESEO, per:

- Operatore (PdC)  $\rightarrow p_i(N) = 0,005000$ ;
- Dirigente (DCO)  $\rightarrow p_i(N) = 0,000175$ .

I valori di  $p_i(N)$  adottati per la componente fisica non umana sono stati desunti dai livelli SIL delle apparecchiature tecnologiche (PR-RTB e PI-RTB).

Il modello fornisce le probabilità per ogni combinazione possibile individuata, mentre per le combinazioni critiche fornisce la probabilità di accadimento.

Il valore della probabilità di accadimento dello scenario critico “svio”  $P(I)$  risulta pari a:

$$P(I) = \sum_{j=1}^{cc} (p'_{c_i})_j = 0,000098058395707$$

Il valore della frequenza di accadimento dello scenario critico “svio”  $F(I)$  è funzione del rapporto  $N/T$  (frequenza di accadimento dell’evento pericoloso “boccola calda”):

- per  $N/T < 50$  eventi/anno, risulta  $F(I) < 0,005$  (“inverosimile”);
- per  $50 \leq N/T < 295$  eventi/anno, risulta  $0,005 \leq F(I) < 0,029$  (“improbabile”).

Il rischio residuo è considerato accettabile (livello “trascurabile”) solo per un livello di gravità delle conseguenze pari a “insignificante”; oppure per un livello pari a “marginale” o “critico” solo se  $N/T < 50$  eventi/anno.

La metodologia, mediante l’utilizzo del software di simulazione OpenTrack<sup>®</sup>, ha messo in luce i possibili effetti sulla circolazione dei treni, essenzialmente funzione della localizzazione dei PR-RTB, dell’ubicazione dei PVB, nonché dello schema funzionale dei PdS.

L’applicazione della metodologia, ad alcune modifiche significative, ha consentito di effettuare delle analisi di sensitività sulla base di differenti SIL per le componenti tecnologiche e di differenti valori di probabilità di errore umano. A titolo di confronto, sono stati riportati due diagrammi che rappresentano, rispettivamente per livelli SIL 4 e SIL 1, l’andamento delle probabilità di accadimento dello scenario critico “svio” in funzione dell’andamento crescente della probabilità di errore umano, per ogni caso studiato.

## CONCLUSIONI

*“C'è vero progresso solo  
quando i vantaggi di una nuova  
tecnologia diventano per tutti”*

(Henry Ford)

## 8. Obiettivi raggiunti, applicazioni possibili, sviluppi futuri

Nei paragrafi che seguono vengono elencate le potenzialità scientifiche della ricerca ovvero le prospettive e i nuovi canali di ricerca emergenti.

### 8.1 Obiettivi raggiunti e applicazioni possibili

L'obiettivo specifico della ricerca è stato lo sviluppo di una metodologia di valutazione quantitativa delle prestazioni del sistema ferroviario in termini di sicurezza della circolazione e della capacità dell'infrastruttura, nella definizione del ruolo delle componenti umane, tecnologiche e normative.

La metodologia proposta è applicabile a diversi casi specifici del settore ferroviario, previa definizione del sistema in termini di infrastruttura, tecnologia, sistemi di sicurezza, materiale rotabile, regolamenti e perfino modello di esercizio; ovvero previa definizione del contesto d'analisi di cui si vuole valutare il rischio.

L'applicazione della metodologia a casi di studio consente di:

- schematizzare le procedure operative applicabili;
- valutare la possibilità che possano originarsi situazioni critiche per la sicurezza secondo scenari critici;
- stimare la probabilità di accadimento di ogni scenario critico individuato e determinare il corrispondente livello di rischio;
- esaminare, nei processi operativi, l'influenza della componente umana e di quella tecnologica;
- determinare i possibili effetti sulla circolazione ferroviaria, in termini di ritardo, di irregolarità, di modifiche al modello di esercizio, ecc.

La schematizzazione delle procedure operative può contribuire certamente all'analisi e alla valutazione delle stesse. Gli schemi procedurali, elaborati a valle dell'analisi della normativa, prendendo in considerazione tutte le attività da svolgere nel procedimento (azioni/operazioni e responsabilità/funzionalità), possono evidenziare eventuali lacune.

Conoscendo con chiarezza su quali punti intervenire, è possibile proporre le azioni di intervento e miglioramento più efficaci.

L'immediatezza con cui possono essere individuati gli scenari critici, mediante l'adozione di un programma di calcolo realizzato ad hoc, rappresenta un vantaggio nel valutare la possibilità che possano originarsi situazioni critiche per la sicurezza. A tal proposito, la metodologia proposta permette di individuare univocamente le responsabilità di ogni singolo attore preso in considerazione e di evidenziare la sistematicità degli errori.

La determinazione della probabilità di accadimento, relativa a ogni scenario critico individuato, risolve in parte il problema di stimare quantitativamente la frequenza di

accadimento dello scenario critico (dato di input nella matrice dei rischi definita dalla normativa vigente) in assenza di sufficienti dati statistici. A tal proposito, è opportuno sottolineare che, allo stato dell'arte, si possono considerare definiti i livelli di gravità delle conseguenze in termini quantitativi; non altrettanto può dirsi per le categorie della frequenza, per le quali sono indicate praticamente solo le definizioni qualitative.

Collocato ogni evento studiato nella matrice dei rischi, nel settore definito dalla categoria determinata della frequenza di accadimento e dal livello considerato di gravità delle conseguenze, è possibile ottenere una rappresentazione visiva del rischio associato a ogni scenario critico. Nel caso in cui un evento si collochi in una zona considerata a rischio non accettabile, esso può essere portato in una zona di accettabilità operando sulla probabilità di accadimento, mediante l'adozione di misure volte a incrementare il livello di protezione o a ridurre la frequenza di accadimento dell'evento pericoloso iniziatore.

Valutare l'influenza della componente umana e di quella tecnologica nei processi operativi, significa poter disporre di uno strumento di analisi che metta in evidenza i possibili vantaggi o svantaggi, in termini di sicurezza e di operatività, nell'adottare un modello operativo piuttosto che un altro.

Per valutare i possibili effetti sulla circolazione ferroviaria, nella metodologia sviluppata, si è ricorso all'utilizzo della simulazione. Il software *OpenTrack*<sup>®</sup> è uno dei molteplici strumenti validi di simulazione, avente i requisiti richiesti per effettuare un'efficiente ed efficace analisi.

Il metodo sviluppato, può essere esteso all'analisi di altri casi adottando opportuni accorgimenti e può fornire un valido strumento di valutazione e verifica.

## 8.2 Sviluppi futuri

L'affinamento delle metodologie per misurare le prestazioni di sicurezza e stimare i valori di capacità dell'infrastruttura ferroviaria, è un interesse costante e attuale sia a livello nazionale sia internazionale; basti pensare alla necessità, a livello comunitario, di elaborare "metodi comuni di sicurezza" al fine di valutare in modo uniforme il livello di sicurezza ferroviaria di ogni Stato membro.

La ricerca si è prefissa l'obiettivo di contribuire, in relazione al contesto scientifico e normativo europeo, allo sviluppo di una metodologia che consenta di definire i possibili effetti sulla sicurezza della circolazione (in funzione delle componenti del sistema e dei processi operativi adottati) e sulla capacità dell'infrastruttura (in funzione dei parametri infrastrutturali, tecnologici e gestionali) a partire dall'analisi di eventi pericolosi preventivamente individuati.

Durante i tre anni di ricerca, sono stati affrontati alcuni dei punti critici incontrati. Per alcuni la risoluzione è rimasta in una fase iniziale.

La principale difficoltà emersa durante lo svolgimento delle attività della ricerca è stato il reperimento di dati relativi all'incidentalità.

Per quanto mostrato finora, gli sviluppi futuri della ricerca dovrebbero riguardare soprattutto i temi dell'applicazione della metodologia proposta a ulteriori casi di studio.

La metodologia applicata ad altri casi di studio, potrebbe essere utile per:

- esaminare situazioni di esercizio complesse;
- analizzare l'influenza del fattore umano e della tecnologia;
- valutare la struttura dei processi operativi;
- confrontare i risultati con quelli di altri metodi.

La metodologia, se affinata e sviluppata ulteriormente, potrebbe essere utile nella fase di redazione o modifica delle procedure operative. Analizzando uno schema procedurale è possibile valutare se il numero delle azioni/operazioni e delle responsabilità/funzionalità deve essere diminuito o aumentato per migliorare l'interpretazione delle procedure stesse da parte del personale; onde ridurre la probabilità di accadimento degli scenari critici.

La formulazione della metodologia è tale da ipotizzare la completa ingegnerizzazione dei suoi processi.

## Glossario

### ANALISI DEI RISCHI

Impiego sistematico di tutte le informazioni disponibili per individuare gli *eventi pericolosi* e stimare il *rischio*.

### APPARATO CENTRALE

Apparato di sicurezza di una *Stazione* o *Posto di Servizio* che consente il controllo e il comando centralizzato della manovra dei deviatori e degli enti di piazzale.

### AUDIT

Attività finalizzata a determinare e valutare attraverso test e verifiche se le attività svolte e le pratiche operative sono realizzate in conformità alle norme e procedure di sicurezza da parte dell'organizzazione, del personale e del materiale rotabile.

### BLOCCO AUTOMATICO A CORRENTI CODIFICATE (BA/CC)

Sistema che prevede la divisione della linea in tratte elementari con l'utilizzo di Circuiti di Binario (CdB) e segnali luminosi. Il BA/CC consente mediante apposita disposizione di captazione, la ripetizione in macchina dei segnali (v. Regimi di circolazione).

### BLOCCO AUTOMATICO BANALIZZATO A CORRENTI CODIFICATE (BAB/CC)

Sistema che consente la marcia dei treni sullo stesso binario nei due sensi prevedendo doppio segnalamento (v. Regimi di circolazione).

### BLOCCO CONTA ASSI (BCA)

Sistema elementare ad alta affidabilità che consiste in pedali che, una volta azionati dalle ruote, contano gli assi, permettendo di controllare il passaggio del treno. Non offre alta capacità alla linea ma rappresenta la migliore soluzione per linee a velocità normali (v. Regimi di circolazione).

### BLOCCO MOBILE

Sistema di circolazione realizzato mediante il *distanziamento* dinamico secondo il principio delle sezioni di blocco variabili in lunghezza, in funzione delle velocità e delle caratteristiche di frenatura dei treni.

### CAPACITA'

Potenzialità riferita a una linea o a un impianto o a un *nodo ferroviario*.

### CARATTERISTICA DI TRAZIONE

Diagramma che definisce lo sforzo di trazione in funzione della velocità; dipendente dal tipo di materiale rotabile, definisce la potenza utilizzabile al cerchione (prodotto sforzo di trazione per velocità), le condizioni della potenza oraria e continuativa. Unitamente alla funzione di resistenza, la caratteristica di trazione consente il calcolo dell'equazione del moto, nelle fasi di avviamento e a regime, la velocità massima del treno, nonché la costruzione delle tabelle di percorrenza.

#### CATEGORIA DELLA LINEA

Classificazione delle linee ferroviarie secondo il massimo peso consentito dei rotabili, espresso in tonnellate per asse e per metro corrente. Le linee della rete RFI sono distinte da categorie espresse da una lettera alfabetica e un indice numerico.

#### CERTIFICATO DI SICUREZZA

Certificato rilasciato dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF) alle imprese ferroviarie che attesta la conformità agli standard e alle norme definite dalle normative vigenti, e autorizza l'espletamento dei servizi con caratteristiche di sicurezza e affidabilità relative all'organizzazione interna, al personale e al materiale rotabile.

#### CODICE DI BUONA PRATICA

Serie di regole scritte che, se applicate correttamente, possono servire a contenere uno o più *eventi pericolosi* specifici.

#### CODIFICA PER TRASPORTO COMBINATO

Classificazione del profilo limite di ingombro relativo a una determinata codifica dei carichi, in particolare del trasporto combinato. Per trasporto combinato ferroviario si intende un trasporto intermodale la cui percorrenza si effettua per ferrovia, i percorsi iniziali e terminali si realizzano su strada.

#### COMBINAZIONE CRITICA

Situazione potenzialmente pericolosa che si potrebbe verificare quando una o più responsabilità/funzionalità non sono rispettate.

#### CONTROLLO DEL TRAFFICO CENTRALIZZATO (CTC)

Sistema per la regolazione operativa della circolazione ferroviaria. Consiste in un impianto di telecomando e telecontrollo della circolazione in linea e nell'ambito delle stazioni, permettendo un tipo di dirigenza movimento centralizzata.

#### CRITERI DI ACCETTAZIONE DEI RISCHI

Criteri di riferimento con cui è valutata l'accettabilità di un *rischio* specifico; tali criteri servono a determinare se il livello di un determinato rischio è sufficientemente basso da rendere superflua qualsiasi azione immediata volta a ridurlo ulteriormente.

#### DETERMINAZIONE DEI RISCHI

Procedimento basato sull'*analisi dei rischi* e inteso a determinare il *rischio* accettabile.

#### DIRIGENTE MOVIMENTO (DM)

Chi regola ed è responsabile della circolazione dei treni in una *stazione* (non altrimenti gestita o telecomandata).

#### DIRIGENZA CENTRALE (DC)

La mansione essenziale della Dirigenza Centrale è quella di assicurare la *regolarità* della circolazione dei treni (anche in situazioni di degrado) ponendo in essere tutte le scelte di circolazione necessarie, compatibilmente al rapporto di reciproca tolleranza

tra i treni e garantendo i livelli di puntualità a destino per le diverse categorie di treni; di evitare gli ingombri e di ottenere in generale il miglior impiego del personale e il più intenso sfruttamento dei mezzi di cui la linea dispone (cfr. Disposizioni per l'Esercizio con Dirigente Centrale). Le stazioni sono normalmente presenziate dai DM (v. Dirigente Movimento) che sono responsabili dei provvedimenti a loro spettanti per assicurare la *regolarità* e la *sicurezza* della circolazione dei treni. Nel sistema con DC, l'operatore svolge la sua funzione di regolazione della circolazione sulla base delle informazioni che riceve.

#### DIRIGENZA CENTRALE OPERATIVA (DCO)

Sistema in cui una linea viene divisa in una o più sezioni su ciascuna delle quali la circolazione dei treni viene direttamente comandata da un PC (v. Posto Centrale) dal quale è possibile telecomandare gli enti di campagna delle stazioni e dei PM (v. Posto di Movimento) della linea, che rientrano nella giurisdizione della DCO, e seguire l'andamento della circolazione per mezzo di adatte indicazioni riportate otticamente su un quadro luminoso che riproduce lo schema geografico della linea. Le *stazioni* e i posti in linea vengono provvisti di scambi telecomandati dal PC e protetti da segnali anche essi telecomandati in relazione alle esigenze della circolazione. Le stazioni della linea in regime di CTC (v. Controllo del Traffico Centralizzato) possono essere:

- di tipo normalmente impresenziato, provviste di Apparato Centrale a Itinerari (ACEI) telecomandato dal Posto Centrale;
- di tipo presenziabile, con ACEI predisposto per il presenziamento con Dirigente di Movimento (stazione gestita in regime di teleconsenso) ma idoneo a essere utilizzato in qualche turno della giornata senza presenziamento (stazione gestita in regime di telecomando).

Le stazioni che delimitano la sezione di linea gestita con CTC denominate *stazioni porta*, sono sempre rette da *Dirigente Movimento* e per inviare un treno nella sezione devono chiedere apposito consenso al DCO.

#### DISTANZIAMENTO

Per assicurare il corretto distanziamento fra i treni sono necessari un complesso di provvedimenti organizzativi e tecnici (v. Regimi di circolazione). I sistemi di circolazione, attualmente in uso, sono basati su una logica definita "distanziamento a spazio" (il "distanziamento a tempo" non è più utilizzato praticamente): la linea ferroviaria è suddivisa in sezioni di blocco (o di *distanziamento*) e la regola fondamentale, per la sicurezza della circolazione, è che non può esserci più di un treno, contemporaneamente, in ciascuna sezione di blocco. In corrispondenza dell'ingresso di ogni sezione è presente un impianto di segnalamento che indica, al macchinista del treno che sopraggiunge, la via libera o impedita per la sezione in questione.

#### ESERCIZIO FERROVIARIO

Insieme delle regole che disciplinano il trasporto ferroviario atte a soddisfare le esigenze della domanda del traffico, della *sicurezza* del trasporto e della *regolarità* del servizio.

### ESERCIZIO OMOTACHICO/ETEROTACHICO

La circolazione dei treni su una linea ferroviaria può essere caratterizzata dalla medesima velocità per cui le tracce orario dei treni, comprensive degli intervalli di sosta, risultano tutte parallele fra loro (esercizio omotachico) o da velocità diverse (esercizio eterotachico). L'esercizio omotachico comporta effetti tangibili di aumento della capacità di circolazione rispetto a una situazione di marcia eterotachica; ancora più benefico è l'esercizio tramite una circolazione di tipo cadenzato, con le caratteristiche di ripetitività, simmetria di linea e nodo, integrazione delle coincidenze e localizzazione sistematica degli incroci.

### EUROPEAN RAIL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM (ERTMS)

Avanzato sistema di gestione, controllo e protezione del traffico ferroviario e relativo *segnalamento* a bordo, progettato allo scopo di sostituire i molteplici e, tra loro incompatibili, sistemi di circolazione e *sicurezza* delle varie ferrovie europee. Lo scopo è garantire l'interoperabilità dei treni soprattutto sulle nuove reti ferroviarie europee AV.

### EVENTO INIZIATORE

Evento che pone inizio ad una catena incidentale.

### EVENTO PERICOLOSO

Situazione che potrebbe sfociare in un *incidente*.

### GESTIONE DEI RISCHI

Applicazione sistematica di strategie, procedure e pratiche di gestione all'analisi, alla valutazione e al contenimento dei *rischi*.

### GLOBAL SYSTEM FOR MOBIL COMMUNICATIONS-RAILWAY (GSM-R)

Sistema di radiotrasmissione digitale GSM che offre un supporto per tutti i tipi di comunicazione che interessano le ferrovie. Il GSM-R si occupa di fonia e dati, comunicazioni fra il personale a bordo dei treni e il personale di terra, e del controllo automatico remoto per mezzo della trazione.

### INCIDENTE

Evento indesiderato che origina morti, ferimenti, malattie, danni materiali o altre perdite.

### INCIDENTI UIC

Evento, previsto nella famiglia degli incidenti "Tipici" (in circolazione, in manovra, ai mezzi speciali e ai PL) o in quella degli incidenti "Atipici" (accaduti individualmente alle persone in relazione al movimento dei rotabili), che ha causato conseguenze gravi così definite:

- la morte delle persone (persone morte sul colpo o decedute nei trenta giorni successivi, in seguito all'incidente) o il ferimento grave (persone che hanno subito ferite che hanno comportato un ricovero superiore alle 24 ore), 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 a 150.000 €), o una perturbazione importante per il traffico (interruzione della circolazione dei treni sulla via principale per più di sei ore, deviazione o trasbordo dei viaggiatori).

#### INDIVIDUAZIONE DEGLI EVENTI PERICOLOSI

Procedimento consistente nell'individuare, elencare e caratterizzare gli *eventi pericolosi*.

#### MARCIA A VISTA

Modalità di guida adottata in situazioni particolari e che impone al PdC di regolare la marcia in modo da poter arrestare il convoglio nello spazio di visuale libero.

#### MISURE DI SICUREZZA

Interventi finalizzati a ridurre la probabilità di un *evento pericoloso* o ad attenuarne le conseguenze affinché sia raggiunto e/o preservato un livello di rischio accettabile.

#### MODULO DELLA LINEA

Misura espressa in metri corrispondente ai binari di circolazione nonché alla lunghezza del treno di massima composizione che può circolare su di una linea in relazione alla capacità dei binari di incrocio e di precedenza delle stazioni.

#### NODO FERROVIARIO

Nodo ferroviario è quell'area ferroviaria di norma coincidente con importanti insediamenti metropolitani, caratterizzata da un'alta densità e relativa complessità di *stazioni* medio – grandi e di altri impianti ferroviari (smistamento, depositi locomotive, parchi materiali, ecc.) interconnessi da varie linee, che rappresentano la prosecuzione dei principali itinerari che entrano nello stesso nodo nonché altre linee, realizzate per facilitare la gestione di circolazione di diverse correnti di traffico e percorsi alternativi.

#### PASSAGGIO A LIVELLO (PL)

Apparecchiatura elettromeccanica che costituisce il sistema di protezione dell'omonimo attraversamento a raso tra sede ferroviaria e rete stradale in cui il piano del ferro si trova alla stessa quota del manto stradale.

#### PERICOLO (HAZARD)

Indica una condizione dei sistemi di sicurezza in cui uno stato di avaria e/o ambientale del sistema e del comportamento umano ha il *rischio* di provocare un danno. La condizione di pericolo può essere caratterizzata da uno o più eventi in sequenza.

#### PIANO DEL FERRO

Disposizione dei binari e dei vari enti di una località di servizio.

#### POSTO CENTRALE (PC)

Sede di un operatore che ha il compito di organizzare la circolazione in un'area ferroviaria.

#### POSTO DI BLOCCO (PB)

Ogni località di servizio dedicata al distanziamento dei treni. Può coincidere in generale con una *Stazione* o con un Posto di Blocco Intermedio (PBI).

#### POSTO DI COMUNICAZIONE (PC)

Località di servizio, normalmente impresenziata, munita di dispositivi che consentono il passaggio del treno da un binario all'altro.

#### POSTO DI MOVIMENTO (PM)

Località di servizio abilitata ad attività di circolazione (incroci, precedenza, ecc.), ovvero stazione non adibita al servizio pubblico.

#### POSTO DI SERVIZIO (PdS)

Locuzione generica di una località ferroviaria che può essere attrezzata con apparecchiature e impianti per il comando e il controllo degli enti di piazzale.

#### PRECEDENZA

Operazione di movimento nella circolazione ferroviaria che consente il sorpasso di un treno su un altro, in *stazione* o in un *Posto di Movimento*. La precedenza riguarda i treni che marciano sullo stesso binario o nella stessa direzione.

#### PROSPETTO INFORMATIVO RETE (PIR)

Documento periodicamente aggiornato dal Gestore dell'Infrastruttura (GI). Presenta le caratteristiche della rete (planimetria, elettrificazione, velocità, pesi assiali, gabarit, vincoli alla lunghezza dei treni, nuove opere e corse marittime), la disponibilità per il traffico (fasce di manutenzione, periodi d'abilitazione delle linee, stazioni e loro abilitazione, terminali merci e loro abilitazione), le condizioni tecniche/commerciali di accesso, le eventuali linee specializzate per tipologia di servizio e nodi, e altre informazioni necessarie per la formulazione delle richieste di servizio da parte delle Imprese Ferroviarie (IF).

#### REGIMI DI CIRCOLAZIONE

Riguardano i sistemi atti a garantire il *distanziamento* fra i treni. La tecnologia applicata determina la capacità degli impianti di linea. Rappresentano, nel momento in cui si devono prendere dei provvedimenti di circolazione, uno dei vincoli da considerare. I regimi di circolazione principali presenti sull'Infrastruttura Ferroviaria Nazionale (IFN), sono i seguenti:

- Blocco Conta Assi (BCA). E' uno dei sistemi più elementari, con alta affidabilità. Consiste in pedali che, una volta azionati dalle ruote, contano gli assi, permettendo di controllare il passaggio del treno. Non offre alta capacità alla linea ma rappresenta la migliore soluzione per linee a velocità normali;
- Blocco Automatico a Correnti Codificate (BA/CC). Prevede la divisione della linea in tratte elementari con l'utilizzo di Circuiti di Binario (CdB) e segnali luminosi. Il BA/CC consente mediante apposita disposizione di captazione, la ripetizione in macchina dei segnali;
- Blocco Automatico Banalizzato a Correnti Codificate (BAB/CC). Consente la marcia dei treni sullo stesso binario nei due sensi prevedendo doppio segnalamento (linea banalizzata).

#### REGISTRO DEGLI EVENTI PERICOLOSI

Documento nel quale vengono registrati, con tutti gli estremi necessari, gli *eventi pericolosi* individuati, le misure connesse, l'origine di tali eventi e l'organizzazione incaricata di gestirli.

#### REGOLARITA'

Puntualità dei treni e loro capacità di rispettare l'orario prestabilito. Rappresenta la qualità della circolazione dei treni che costituisce un aspetto fondamentale della qualità al servizio della clientela.

#### REQUISITI DI SICUREZZA

Caratteristiche di *sicurezza* (qualitative o quantitative) che un determinato sistema e il relativo funzionamento (comprese le norme operative) devono presentare affinché siano conseguiti gli obiettivi di sicurezza fissati dalla legge.

#### RIPETIZIONE SEGNALI

Apparecchiatura di ripetizione segnali che consente la visualizzazione in cabina di guida delle informazioni relative alle condizioni di libertà della via.

#### RISCHIO

Probabilità che si verifichi un *incidente* o un inconveniente dannoso (causato da un *evento pericoloso*) e livello di gravità del danno, ovvero, combinazione di probabilità di accadimento e possibili conseguenze legate al verificarsi di una specifica situazione di pericolo.

#### SCENARIO CRITICO

Insieme di "combinazioni critiche" (v.) associate a un potenziale incidente.

#### SEGNALAMENTO

Insieme dei segnali, degli strumenti e delle norme che regolano la circolazione ferroviaria per mezzo di segnalazioni automatiche, manuali, ottiche o sonore.

#### SICUREZZA

Assenza di un *rischio* inaccettabile di danno.

#### SITUAZIONE ANOMALA

Condizione di esercizio pericolosa che può potenzialmente evolvere dando luogo ad un *incidente*.

#### SISTEMA

Qualsiasi parte del sistema ferroviario soggetta a modifica.

#### SISTEMA COMANDO E CONTROLLO (SCC)

Sistema di regolazione della circolazione ferroviaria delle direttrici e dei *nodi ferroviari*, in cui le attività di comando, controllo, coordinamento e comunicazione verso le stazioni dell'area controllata, sono elaborate presso il *Posto Centrale*, dove sono riposte tutte le funzioni, l'organizzazione e le relative tecnologie.

### SISTEMA CONTROLLO MARCIA TRENO (SCMT)

Sistema che attua la protezione della marcia del treno, istante per istante, rispetto alle condizioni imposte dai segnali, alla velocità massima consentita dalla linea in condizioni normali e di degrado, alla velocità massima ammessa dal materiale rotabile attivando la frenatura d'emergenza, in caso di superamento dei limiti di controllo.

### SISTEMA DI GESTIONE DELLA SICUREZZA

Sistema comprendente l'organizzazione e i provvedimenti messi in atto per assicurare la gestione sicura delle operazioni.

### SISTEMA DI RIFERIMENTO

Sistema che, nella pratica, ha dimostrato di presentare un livello di sicurezza accettabile e rispetto al quale è possibile valutare, per comparazione, l'accettabilità dei rischi derivanti da un sistema soggetto a valutazione.

### SISTEMI DI ESERCIZIO

Riguardano i sistemi atti a garantire la regolazione centrale della circolazione. I principali sistemi di esercizio presenti sull'Infrastruttura Ferroviaria Nazionale, sono: Dirigenza Centrale (v.) e Dirigenza Centrale Operativa (v.).

### STAZIONE

Località di servizio delimitata da segnali di protezione, in cui si regola la circolazione dei treni tramite incroci e/o precedenza. La stazione è dedicata ai servizi commerciali di accesso al trasporto viaggiatori e/o merci, nonché ad altre attività connesse al ciclo di utilizzo dei rotabili. Si possono distinguere le seguenti tipologie:

- Stazione capotronco. Stazione che delimita la divisione della linea in sezioni; svolge particolari compiti in materia di circolazione, che riguardano principalmente le effettuazioni e le soppressioni dei treni;
- Stazione di diramazione. Stazione in cui si diramano due o più linee; in questo impianto confluiscono almeno una linea da un lato e due linee dall'altro;
- Stazione disabilitata. Stazione temporaneamente non presenziata da DM (v. Dirigente Movimento). Durante il periodo di disabilitazione non si possono effettuare incroci o precedenza fra treni. Può tuttavia essere adibita a PBI (v. Posto di Blocco);
- Stazione porta. Stazione normalmente abilitata da DM (v. Dirigente Movimento), che delimita sezioni di linea eserciti con regime di esercizio a DCO (v. Dirigenza Centrale Operativa). Sovrintende all'entrata e all'uscita dei treni nell'area controllata con un sistema di telecomando (v. Controllo del Traffico Centralizzato).

### STIMA DEI RISCHI

Procedimento utilizzato per misurare il livello dei *rischi*, comprendente le seguenti fasi: stima della frequenza, analisi delle conseguenze, combinazione di tali fattori.

### TRAIN DESCRIBER

Sistema computerizzato che rende visibile il movimento dei treni in una sezione di linea o in un'area controllata e che consente di visualizzare su un apposito video i

binari di linea e di *stazione*, la posizione dei treni in tempo reale e altre informazioni sullo stato della linea.

#### VALUTAZIONE DEI RISCHI

Procedimento complessivo comprendente l'*analisi dei rischi* e la determinazione dei rischi.

#### VELOCITÀ COMMERCIALE

Per un treno, rapporto fra la distanza tra la *stazione* di origine e quella di fine corsa, e il tempo impiegato a percorrere il tratto di linea considerato, comprensivo di tutti i tempi di sosta intermedi.

#### VELOCITÀ DI RANGO

Velocità massima ammissibile rispetto al raggio di curvatura del binario e alla tipologia (Rango) dei treni. Si ottiene dal prodotto della radice quadrata del raggio per una costante (coefficiente di esercizio) variabile a seconda del Rango (A, B, C, P).

## Bibliografia

- [1] ABRIL M., BARBER F., INGOLOTTI L., SALIDO M.A., TORMOS P., LOVA A. – *An assesment of railway capacity* – ScienceDirect, Transportation Research Part E 44 774–806, Elsevier, 2007.
- [2] ACCATTATIS F.M.D, DICEMBRE A., MANCINI R., OFRIA P., POLITO F., SORACE F. – *Carrying capacity of railway stations in relation to operation improvement: the Rome–Airport link* – The capacity of transport systems: Arcs, Nodes, Services and Technologies, Venezia, 2009.
- [3] ACCATTATIS F.M.D., CASTRIOTA I., CUTRERA G., MALAVASI G., MARGARITA G., SAPORITO M.R., SORACE F. – *Rischio nei sistemi ferroviari: studio di metodologie applicative* – Sicurezza ed Esercizio Ferroviario – Innovazione e Nuove Sfide nei Sistemi Ferroviari Edizioni Ingegneria 2000, Roma, 2011.
- [4] AMICI A. – *Potenzialità e regolarità dei servizi sulla linea ferroviaria Roma – Cassino* – Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria dei Trasporti Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma, 2011.
- [5] ANSF – *L’andamento della sicurezza della circolazione nel 2010. Benchmarking sui dati di incidentalità ferroviaria* – ANSF, 2010.
- [6] ANTOGNOLI M., CORAZZA G.R., GUIDA P. – *Analisi di un impianto di stazione, mediante osservazioni in condizioni reali di esercizio* – Ingegneria Ferroviaria, 7/2001.
- [7] ARU A. – *Sicurezza e produttività nello scarico delle merci alla rinfusa in ambito portuale* – Tesi di Laurea in Ingegneria della Sicurezza e Protezione Civile, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma, 2011.
- [8] BACCELLI O., CATTANEO F. – *Scenari e prospettive del sistema ferroviario italiano nel contesto di liberalizzazione europea* – Università Luigi Bocconi, 2011.
- [9] BALDASSARRA A. – *Modelli per la quantificazione del rischio nei sistemi ferroviari in relazione alle componenti tecnologica, normativa ed umana* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma, 2010.
- [10] BALFE N. – *Appropriate automation of rail signalling systems: a human factors study* – Doctor of Philosophy, University of Nottingham, Nottingham, 2010.
- [11] BELLO G.C., COLOMBARI V. – *Empirical technique to estimate operator’s error (TESEO)* – Reliab Eng,1(3):3–24.
- [12] BIANCHI M. – *Potenzialità di linee ferroviarie* – Ingegneria Ferroviaria, 12/1964.
- [13] BIANCHI M. – *Circolazione di treni a velocità diverse su linee a doppio binario* – Ingegneria Ferroviaria, 1/1967.
- [14] BIANCHI M., CESARI F. – *Aspetti organizzativi e tecnici dell’esercizio ferroviario* – CAFI, 1991.
- [15] BIANCHI M., RIZZO V. – *Tecnica della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1980.

- [16] BONFIGLI G., MAZZEO R. – *Sicurezza e sicurezza equivalente* – Ingegneria Ferroviaria, 11/1988.
- [17] BONORA G. – *La normativa di esercizio* – Ingegneria Ferroviaria, ottobre 1980.
- [18] BONORA G., GIULIANI L. – *I criteri di calcolo della potenzialità delle linee ferroviarie* – Ingegneria Ferroviaria, 7/1982.
- [19] BURKOLTER D.M. – *Capacity of railways in station areas using Petri Nets* – Doctor of Sciences, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2005.
- [20] CAMETTI C., DI BIASIO A. – *Introduzione all'elaborazione dei dati sperimentali* – CISU, Roma, 1994.
- [21] CAMPBELL J.M. – *Safety hazard and risk identification and management in infrastructure management* – Doctor of Philosophy, The University of Edinburgh School of Engineering and Electronics, Edinburgh, 2008.
- [22] CANTARELLA G.E. – *Introduzione alla tecnica dei trasporti e del traffico con elementi di economia dei trasporti* – UTET, Torino, 2001.
- [23] CASCETTA E., NUZZOLO A. – *Un modello analitico per il calcolo della capacità di circolazione delle linee ferroviarie* – Ingegneria Ferroviaria, 2/1980.
- [24] CENELEC EN 50126 – *La specificazione e la dimostrazione di Affidabilità, Disponibilità, Manutenibilità e Sicurezza (RAMS)* – Eurailpress, 2000.
- [25] CENTI P. – *Infrastrutture – circolazione: i confini regolamentari* – La Tecnica Professionale, 5/1992.
- [26] CESARI F., LUCCHETTI S., RIZZO V. – *Elementi generali dell'esercizio ferroviario* – CIFI, Roma, 1999.
- [27] CHIAVACCI E. – *Relazione introduttiva al Convegno sulla sicurezza nelle ferrovie europee* – Ancora in marcia, 1990.
- [28] CHIUSOLO S. – *Costruzione e validazione di un modello di simulazione dell'esercizio di una linea di metropolitana* – Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2010.
- [29] CHIUSOLO S., DICEMBRE A., RICCI S., SORACE F. – *Automation of high density metro lines: Rome line A case study* – Automated People Movers and Transit Systems, Parigi, 2011.
- [30] CIRILLO B. – *Riflessioni e considerazioni sulla normativa dell'esercizio ferroviario* – Ingegneria Ferroviaria, gennaio 1991.
- [31] CIRILLO M. – *La lettera e lo spirito dei regolamenti* – La Tecnica Professionale, 9/1974.
- [32] CIRILLO M. – *Finalità ed evoluzione della regolamentazione nell'esercizio ferroviario* – La Tecnica Professionale, 9/1974.
- [33] CIUFFINI F. – *Sistemi di offerta ad orario cadenzato. Parte prima: elementi teorici* – La Tecnica Professionale, 2/2003.
- [34] CIUFFINI F. – *Sistemi di offerta ad orario cadenzato. Parte seconda: la progettazione di rete* – La Tecnica Professionale, 3/2003.
- [35] CORAZZA G.R., FLORIO L. – *Il problema del nodo e la verifica dei piani di stazione* – Ingegneria Ferroviaria, 4/1979.
- [36] CORAZZA G.R., MALAVASI G. – *Tecnica della circolazione* – Dispense del corso, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2010.

- [37] CORAZZA G.R., MUSSO A. – *Gli impianti di stazione e la loro analisi topologica* – Ingegneria Ferroviaria, novembre 1987.
- [38] CORAZZA G.R., MUSSO A. – *La circolazione ferroviaria e gli impianti di stazione. Lo stato dell'arte della metodologia per la verifica* – Ingegneria Ferroviaria, luglio–agosto 1991.
- [39] CORAZZA G.R., MUSSO A. – *La circolazione e gli impianti ferroviari. La verifica a lungo termine* – Ingegneria Ferroviaria, ottobre 1991.
- [40] CORAZZA G.R., ROTA M. – *Osservazioni sull'impiego della simulazione per lo studio di nodi ferroviari complessi* – Ingegneria Ferroviaria, giugno 1992.
- [41] CORRIERE F. – *Potenzialità e regolarità di esercizio nelle linee ferroviarie* – Ingegneria Ferroviaria, 1–2/1984.
- [42] COSTA B. – *Nuovi approcci di sicurezza nel segnalamento ferroviario* – Ingegneria Ferroviaria, 3/2001.
- [43] CRENCA D., MALAVASI G., MANCINI R. – *Effects of stations layout on railway lines carrying capacity* – Zilina, 2006.
- [44] D'AVOLIO E. – *Analisi e simulazione d'esercizio della linea ferroviaria Roma – Pescara* – Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria dei Trasporti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2011.
- [45] DE FALCO F. – *Il regolamento di esercizio componente essenziale di un sistema di trasporto metropolitano per la sicurezza e la regolarità di funzionamento* – Ingegneria Ferroviaria, dicembre 1981.
- [46] DE LUCA M. – *Tecnica ed economia di trasporti* – CUEN, Napoli, 1989.
- [47] DE PALATIS P. – *L'avvenire della sicurezza. Esperienze e prospettive* – CIFI, Roma, 2000.
- [48] DE PALATIS P. – *Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria* – CIFI, Roma, 1995.
- [49] DE PALATIS P. – *Il mondo regolamentare all'orizzonte del 2000* – La Tecnica Professionale, 1/1992.
- [50] DE PALATIS P., MAESTRINI E. – *L'importanza del fattore umano* – La Tecnica Professionale, 5/1992.
- [51] DE PALATIS P., ZENODOCCHIO L. – *Ritorni d'esperienza* – CIFI, Roma, 1997.
- [52] DECRETO MINISTERIALE 28 ottobre 2005. – *Sicurezza nelle gallerie ferroviarie* – Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- [53] DELFINO A., GALAVERNA M. – *Blocco fisso e blocco mobile: analisi di potenzialità* – Ingegneria Ferroviaria, 6/2003.
- [54] DELORME X., GANDIBLEUX X., RODRIGUEZ J. – *Stability evaluation of a railway timetable at station level* – ScienceDirect, European Journal of Operational Research 195 780–790, Elsevier, 2009.
- [55] DI MARCO G. – *Effetti delle avarie sulla circolazione in reti ferroviarie. Valutazione mediante simulazione* – Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 1997.
- [56] DI MARCO G., MALAVASI G., RICCI S. – *Affidabilità dei sistemi ferroviari. Analisi e valutazione mediante modelli di simulazione* – Ingegneria Ferroviaria, gennaio/febbraio 2000.
- [57] DICEMBRE A. – *Studio della circolazione in linee e nodi complessi: l'esercizio dei corridoi ferroviari urbani* – Tesi di Dottorato di Ricerca in

- Infrastrutture e Trasporti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2011.
- [58] DIODATO M. – *Principali metodologie per l'identificazione e la valutazione dei rischi* – Servizio Sanitario Regionale Emilia Romagna, Bologna, 1996.
- [59] DIRETTIVE EUROPEE – 2004/49/CE; 2004/50/CE; 2004/51/CE – Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea.
- [60] ELMS D. – *Rail safety* – ScienceDirect, Reliability Engineering and System Safety, 74 291–297, Elsevier, 2001.
- [61] ERKUT E., GLICKMAN T.S. – *Assessment of hazardous material risks for rail yard safety* – ScienceDirect, Safety Science 45 813–822, Elsevier, 2007.
- [62] FEDELE L. – *Progettare e gestire la sicurezza* – McGraw-Hill Companies, 2008.
- [63] FLORIO L. – *Potenzialità di un sistema ferroviario* – Metodi e modelli per la pianificazione e la gestione dei sistemi di trasporto collettivo, Franco Angeli, Milano, 1995.
- [64] FLORIO L. – *La determinazione della potenzialità dei nodi ferroviari* – Strumenti analitici dei sistemi di trasporto, Franco Angeli, Milano, 1992.
- [65] FLORIO L., MALAVASI G. – *Principi teorici per la verifica di un impianto ferroviario complesso e la determinazione dei margini di potenzialità* – Ingegneria Ferroviaria, 12/1984.
- [66] FLORIO L., MALAVASI G., SALVINI M. – *Analisi dei ritardi e verifica di un nodo ferroviario complesso* – Ingegneria Ferroviaria, 7/1985.
- [67] FUMI A. – *Introduzione all'alta velocità in Italia* – La Tecnica Professionale, 3/2002.
- [68] GALATOLA M. – *Analisi della circolazione ferroviaria. Gli indici di compattezza e di qualità* – Ingegneria Ferroviaria, 7–8/2004.
- [69] GALATOLA M. – *La potenzialità delle linee ferroviarie e la qualità del servizio offerto* – Ingegneria Ferroviaria, 1/2005.
- [70] GALAVERNA M., SCIUTTO G. – *Influenza delle stazioni nella potenzialità di ferrovie a traffico misto* – Ingegneria Ferroviaria, dicembre 1999.
- [71] GENOVESI P., MALAVASI G., MARGARITA G., RAZIONALE P., RICCI S. – *Metodologia di valutazione del rischio nei sistemi ferroviari sulla base dei regolamenti e degli inconvenienti di esercizio* – Ricerca e sviluppo nei sistemi ferroviari, CIFI, Roma, 2003.
- [72] GIULIANI L., MALAVASI G., RICCI S. – *Analisi di un impianto di stazione sulla base del programma di esercizio* – Ingegneria Ferroviaria, ottobre 1989.
- [73] GUIDA P.L., MILIZIA E. – *Dizionario Ferroviario* – CIFI, Roma, 2000.
- [74] HANSEN I.A., PACHL. J. – *Railway timetable and traffic: analysis–modeling–simulation* – Eurail Press, 2008.
- [75] HANSEN I.A., YUAN J. – *Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays* – ScienceDirect, Transportation Research Part B 41 202–217, Elsevier, 2007.
- [76] HARROD S. – *Capacity factors of a mixed speed railway network* – ScienceDirect, Transportation Research Part E, Elsevier, 2008.
- [77] HEINRICH H.W. – *Industrial accident prevention: a safety management approach* – McGraw–Hill, 1980.

- [78] HOJ N.P., KROGER W. – *Risk analyses of transportation on road and railway from a European Perspective* – Pergamon, Safety Science 40 337–357, Elsevier, 2002.
- [79] HSU Y.L. – *Airline Safety Management: The development of a proactive safety mechanism model for the evolution of safety management system* – Doctor of Philosophy, College of Aeronautics Air Transport Group, Cranfield, 2004.
- [80] HUERLIMANN D., NASH A.B. – *OpenTrack – Simulation of Railway Networks* – User Manual – ETH, Zurich, 2007.
- [81] IMPASTATO S. – *La sicurezza nei sistemi di trasporto ferroviari* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Trasporti, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma, 2004.
- [82] KONTAXI E., RICCI S. – *Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive di integrazione* – Sicurezza ed Esercizio Ferroviario: sviluppi attuali e prospettive della ricerca, Aracne Editrice, Roma, 2009.
- [83] LA PLACA C. – *Sistemi di segnalamento e sicurezza di circolazione negli impianti ferroviari* – Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma, 2001.
- [84] LEUZZI V. – *Fondamenti di trasporti* – Edizioni ESA, Roma, 1981.
- [85] LIVERANI A. – *La regolazione del traffico* – Ingegneria Ferroviaria, gennaio 1980.
- [86] LOMBARDI M. – *Rischio e sicurezza nei cantieri* – Dispense del corso, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma, 2010.
- [87] LONGO G., MEDEOSSI G. – *Un approccio per determinare il trade-off tra infrastruttura ed esercizio* – MobilityLab, 15/2007.
- [88] LORUSSO R., MALAVASI G., PERESSO A. – *Automazione e applicazioni delle procedure di analisi della capacità di circolazione degli impianti ferroviari* – Ingegneria Ferroviaria, 6/2009.
- [89] MADONNA M., MARTELLA G., MONICA L., PICHINI M.E., TOMASSINI L. – *Il fattore umano nella valutazione dei rischi: confronto metodologico fra le tecniche per l'analisi dell'affidabilità umana* – Prevenzione Oggi Vol. 5, n. 1/2, 67–83, 2009.
- [90] MALASPINA R., REITANI G. – *Un criterio di calcolo della potenzialità di circolazione ferroviaria su linee a doppio binario* – Ingegneria Ferroviaria, 8/1995.
- [91] MALASPINA R., REITANI G. – *La potenzialità di circolazione ferroviaria su linee a singolo binario: un modello di calcolo* – Ingegneria Ferroviaria, 8/1995.
- [92] MALAVASI G. – *Metodi di analisi della regolarità di esercizio in campo ferroviario* – Sviluppi della ricerca sui sistemi di trasporto, Franco Angeli, Milano, 1995.
- [93] MALAVASI G., MARGARITA G., RICCI S. – *Railway traffic management systems: effect of operating rules on safety* – Modelling and Management in Transportation, Volume 1, EURO Working Group on Transportation, Poznan – Krakow, 1999.
-

- 
- [94] MALAVASI G., MARGARITA G., RICCI S. – *Integrazione dei sistemi di sicurezza della circolazione e norme regolamentari* – La tecnologia del trasporto su ferro e l'orientamento al mercato, CIFI, Napoli, 1998.
- [95] MALAVASI G., MARINI C., PETRILLI G. – *Interruzione di esercizio per avaria. Valutazione mediante simulazione* – Ingegneria Ferroviaria, aprile 1992.
- [96] MALAVASI G., RICCI S. – *La modellazione dell'esercizio ferroviario attraverso le Reti di Petri* – Ingegneria Ferroviaria, 3/2005.
- [97] MALAVASI G., RICCI S. – *Regolamenti ed inconvenienti d'esercizio per la valutazione del rischio nel sistema ferroviario* – Metodi e tecnologie dell'ingegneria dei trasporti, Franco Angeli, Milano, 2005.
- [98] MALAVASI G., RICCI S. – *Circolazione dei treni merci sulle linee AV/AC con i sistemi di segnalamento ERTMS e tradizionali* – Limiti e prospettive di sviluppo del trasporto ferroviario delle merci, Franco Angeli, Milano, 2006.
- [99] MALVEZZI M., PRESCIANI P., ALLOTTA B., TONI P. – *Probabilistic analysis of braking performance in railways* – Journal of Rail and Rapid Transit, 2003.
- [100] MANCINI R., MARZULLO D. – *Il traffico e l'ipotesi di esercizio sulla linea ad alta velocità Roma – Napoli* – Ingegneria Ferroviaria, 12/1998.
- [101] MANTOVANI G. – *Ergonomia – Lavoro, sicurezza e nuove tecnologie* – Il Mulino, Bologna, 2000.
- [102] MARGARITA G., SORACE F., TIERI A. – *Risk analysis in railway system: an application on hot box detection system (RTB)* – External costs of Transport systems: theory and applications, Roma, 2010.
- [103] MARTINOLI B. – *Guida alla simulazione* – Franco Angeli, Milano, 1988.
- [104] MASSACCI G. – *Tecniche di analisi e valutazione dei rischi* – Dispense del corso, Università degli Studi di Cagliari, Cagliari, 2008.
- [105] MAYER L. – *Incidenza della lunghezza delle sezioni di blocco sulla potenzialità di una linea ferroviaria* – La Tecnica Professionale, 3/1978.
- [106] MAYER L. – *Impianti ferroviari* – CIFI, Roma, 2004.
- [107] MAZZARELLO M., OTTAVIANI E. – *A traffic management system for real-time traffic optimization in railways* – ScienceDirect, Transportation Research Part B 41 246–274, Elsevier, 2007.
- [108] MINGOZZI D. – *La nuova concezione della ferrovia europea dalle reti nazionali a una rete integrata. Effetti delle direttive sulla liberalizzazione, interoperabilità, sicurezza* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Trasporti, Università degli Studi di Bologna, Bologna, 2007.
- [109] MULLER W. – *Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik* – Vol. 1 – 2, Springer, Berlino, 1960.
- [110] NANNI C. – *Valutazione degli effetti dell'automazione e dell'incremento delle frequenze sulla regolarità d'esercizio delle metropolitane* – Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi di Trasporto, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2010.
- [111] NORRIS B. J., WILSON J. R. – *Rail human factors: Past, present and future* – ScienceDirect, Applied Ergonomics 36 649–660, Elsevier, 2005.
- [112] ORLANDI A. – *Tecnica della circolazione* – Pitagora Editrice, Bologna, 1987.
- [113] PICIOCCHI A. – *Considerazioni sulla sicurezza nell'esercizio ferroviario* – Ingegneria Ferroviaria, dicembre 1981.
-

- [114] POLICICCHIO F. – *Lineamenti di infrastrutture ferroviarie* – University Press, Firenze, 2007.
- [115] POMPONI C. – *Analisi dei rischi nelle operazioni di partenza dei treni passeggeri all'interno delle stazioni ferroviarie* – Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza e Protezione Civile Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2011.
- [116] POTTHOFF G. – *Verkehrstromungslehre* – Vol. 1 – 5, Trans-Veb, Berlino, 1965.
- [117] RAZIONALE P. – *Studio di una metodologia di analisi e verifica dei regolamenti di circolazione ferroviaria applicata ai carrelli* – Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2002.
- [118] REASON J. – *L'errore umano* – Il Mulino, Bologna, 1994.
- [119] RICCI S. – *Elaborazione di una metodologia di analisi e verifica dei regolamenti di circolazione ferroviaria e sua applicazione comparata ai regolamenti FS, SNCF e DB* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Trasporti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 1993.
- [120] RICCI S. – *Metodologia di analisi e verifica dei regolamenti di circolazione ferroviaria* – Ingegneria Ferroviaria, gennaio 1992.
- [121] RICCI S. – *Tecnologia e comportamenti umani nella sicurezza della circolazione ferroviaria* – Ingegneria Ferroviaria, 5/2001.
- [122] RICCI S. – *Modelli di Esercizio Ferroviario* – Dispense del corso, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2008.
- [123] RICCI S. – *Tecnica ed Economia dei Trasporti* – Dispense del corso, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2009.
- [124] RICCI S. – *Trasporti Ferroviari* – Dispense del corso, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2010.
- [125] ROGIONE E. – *Sicurezza ferroviaria: quale evoluzione?* – Ingegneria Ferroviaria, 11/1988.
- [126] SANTOS J.L. – *Quantitative risk analysis* – Theory and model.
- [127] SCOZZAFAVA R. – *Probabilità soggettiva: significato, valutazione, applicazioni* – Masson, Milano, 1997.
- [128] SORACE F. – *"Sciogliere i nodi" per far circolare meglio i treni* – Economia dei servizi, Vol. 3 437–446, Il Mulino, Bologna, 2009.
- [129] TIERI A. – *Verifica e previsione della regolarità del traffico ferroviario con un modello di simulazione basato sulle Reti di Petri* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2009.
- [130] VESTRUCCI P. – *Modelli per la valutazione dell'affidabilità umana* – Franco Angeli, Milano, 1990.
- [131] VICUNA G. – *Organizzazione e tecnica ferroviaria* – CIFI, Roma, 2001.
- [132] YELLOW BOOK – *Engineering Safety Management. Fundamentals and Guidance* – Rail Safety and Standards Board on behalf of the UK rail industry, 2007.
- [133] ZIO E. – *An introduction to the basics of reliability and risk analysis* – World Scientific, Singapore, 2007.

## Webgrafia

Si riportano in questo paragrafo i siti web maggiormente consultati:

- [www.era.europa.eu](http://www.era.europa.eu) (European Railway Agency – ERA);
- [www.cenelec.eu](http://www.cenelec.eu) (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique);
- [www.ansf.it](http://www.ansf.it) (Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie – ANSF);
- [www.eba.bund.de](http://www.eba.bund.de) (Eisenbahn-Bundesamt – EBA);
- [www.securite-ferroviaire.fr](http://www.securite-ferroviaire.fr) (Établissement Public de Sécurité Ferroviaire – EPSF);
- [www.mit.gov.it](http://www.mit.gov.it) (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – MIT);
- [www.rfi.it](http://www.rfi.it) (Rete Ferroviaria Italiana SpA – RFI);
- [www.trenitalia.it](http://www.trenitalia.it) (Trenitalia SpA);
- [www.icao.int](http://www.icao.int) (International Civil Aviation Organization – ICAO);
- [www.aircraftsystemsafety.com](http://www.aircraftsystemsafety.com) (Aircraft System Safety – ASS);
- [www.imo.org](http://www.imo.org) (International Maritime Organization – IMO);
- [www.uscg.mil](http://www.uscg.mil) (U.S. Coast Guard);
- [www.alstom.com](http://www.alstom.com) (Alstom SpA);
- [www.ansaldobreda.it](http://www.ansaldobreda.it) (AnsaldoBreda SpA);
- [www.bombardier.com](http://www.bombardier.com) (Bombardier SpA);
- [www.siemens.com](http://www.siemens.com) (Siemens SpA).



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

Tesi di Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti

Ciclo XXIV

Curriculum Ingegneria Ferroviaria

Sicurezza e capacità della circolazione ferroviaria:  
ruolo delle norme regolamentari

APPENDICE

Tutore  
Prof. Ing. Gabriele Malavasi

Dottorando  
Ing. Francesco Sorace

Febbraio 2012

## Indice dei contenuti

<b>Indice dei contenuti</b> .....	2
<b>Indice delle figure</b> .....	3
<b>Indice delle tabelle</b> .....	3
<b>Acronimi</b> .....	4
<b>A. Metodologie di Analisi dei rischi</b> .....	5
A.1 Metodologie di origine normativa.....	5
A.2 Metodologie proposte da standard tecnici.....	7
A.3 Metodologie di derivazione affidabilistica .....	8
A.4 Metodologie avanzate per l'analisi dei rischi .....	13
A.5 Considerazioni sulla scelta della metodologia .....	13
A.6 Schede di sintesi delle principali metodologie .....	14
<b>B. OpenTrack<sup>®</sup>: simulazione della circolazione ferroviaria</b> .....	26
B.1 Il materiale rotabile.....	27
B.2 L'infrastruttura .....	29
B.3 L'orario .....	32
B.4 La simulazione .....	34
B.5 Output .....	35

## Indice delle figure

Figura A.1	-	Esempio di Albero dei guasti.....	11
Figura A.2	-	Esempio di Albero degli eventi.....	12
Figura B.1	-	Principio di funzionamento e processi di OpenTrack®.....	26
Figura B.2	-	Finestra <i>Engines</i> con esempio di caratteristica meccanica.....	27
Figura B.3	-	Finestra <i>Trains</i> .....	28
Figura B.4	-	Rappresentazione dei <i>Vertex</i> e degli <i>Edges</i> .....	30
Figura B.5	-	Finestre <i>Vertex</i> , <i>Edge</i> e <i>Signal</i> .....	31
Figura B.6	-	Finestra <i>Courses</i> .....	32
Figura B.7	-	Finestra <i>Timetable</i> .....	33
Figura B.8	-	Finestra <i>Simulation</i> .....	35
Figura B.9	-	Esempi di output grafico – <i>Orario grafico</i> e <i>Diagramma spazio-velocità</i> .....	36

## Indice delle tabelle

Tabella A.1	-	Matrice rischio-intervento.....	6
Tabella A.2	-	Matrice di rischio.....	7
Tabella A.3	-	Esempio di Modulo FMEA.....	9
Tabella A.4	-	Formato del modulo per l'analisi HAZOP.....	10
Tabella A.5	-	Confronto dei metodi di analisi di derivazione affidabilistica.....	15



## A. Metodologie di Analisi dei rischi

In letteratura esistono diverse metodologie di Analisi dei rischi. Una prima classificazione le distingue in:

- metodologie di origine normativa;
- metodologie proposte da standard tecnici;
- metodologie di derivazione affidabilistica;
- metodologie avanzate.

Un'altra classificazione distingue i metodi di analisi in:

- *metodi induttivi*, si analizzano le situazioni (eventi base) che possono condurre al verificarsi del danno o dell'incidente;
- *metodi deduttivi*, si ipotizza l'evento finale per risalire a eventi (eventi base) che potrebbero causarlo.

Un'ulteriore classificazione dei metodi è la seguente:

- *metodi qualitativi*, utilizzano algoritmi semplici e permettono di ottenere un giudizio qualitativo della situazione oggetto di analisi. Si utilizzano, soprattutto, nelle fasi iniziali di un'analisi per approfondire la conoscenza del sistema;
- *metodi quantitativi*, utilizzano espressioni matematiche ove le relative funzioni possono assumere anche forme complesse per tener conto della maggior parte dei parametri relativi all'insorgere e all'evoluzione dell'evento dannoso. Tali parametri possono essere legati ai fattori umani, agli apparati, ai processi e all'ambiente. Questi metodi sono utilizzati quando si vuole analizzare il rischio in modo dettagliato consentendo la riduzione della soggettività;
- *metodi semi-quantitativi (o semi-qualitativi)*, si basano sull'analisi quantitativa ma consentono un approccio semplificato nella determinazione dei valori dei parametri che intervengono nell'analisi;
- *metodi multicriterio*, considerano contemporaneamente diversi fattori, attraverso la formulazione del problema decisionale in una struttura gerarchica. Permettono di mantenere una visione sintetica della percezione del rischio, senza perdere di rigore quantitativo; di formulare giudizi omogenei, rispetto alle diverse situazioni e ai diversi fattori che si prendono in considerazione. Un approccio di questo tipo è molto flessibile.

### A.1 Metodologie di origine normativa

Nella letteratura tecnico-scientifica sono disponibili alcuni metodi di analisi dei rischi di origine normativa che fanno riferimento alla sicurezza dei macchinari e delle apparecchiature, alla prestazione fisica umana, all'economia dell'ambiente, ecc.

I suddetti metodi si articolano principalmente in tre passi successivi:

- identificazione dei fattori di rischio;
- analisi del rischio;
- selezione delle misure di sicurezza.

L'identificazione dei fattori di rischio ha lo scopo di individuare tutti gli aspetti che possono essere fonte di pericolo. L'uso di *check-list* rappresenta un ausilio in questa fase, in quanto occorre elencare tutti i potenziali fattori di rischio e analizzarli tenendo in considerazione gli aspetti più importanti relativi alla sicurezza.

Le liste di controllo sono redatte considerando:

- le richieste specifiche della normativa cogente applicabile;
- gli standard internazionali di buona tecnica;
- la rispondenza al buon senso sotto il profilo tecnico-ingegneristico;
- gli standard e le leggi specifiche di settore.

Il processo inizia con l'individuazione di tutti i possibili fattori di rischio. L'elenco è integrato con le indicazioni di eventi che, associati a un pericolo, possono essere causa di un danno.

Identificati i fattori di rischio si procede alla fase successiva, ovvero l'analisi del rischio. L'aspetto più importante è l'oggettività della misura del rischio, che spesso è affidata a valutazioni qualitative e dipendenti dal valutatore. Il primo passo riguarda l'identificazione dei parametri che influenzano la frequenza di accadimento dell'evento e la gravità delle conseguenze. Il secondo passo consiste nel calcolare i valori suddetti in funzione dei valori assunti dai parametri che li influenzano. Il terzo passo prevede l'identificazione del legame funzionale che consente la stima quantitativa del rischio. La misura del rischio associato a ciascun pericolo esaminato è ricavata attraverso legami funzionali tra i fattori di rischio che possono essere di varia natura. In genere si costruisce una *matrice rischio-intervento* (Tabella A.1) utile per evidenziare le aree di criticità e stabilire il grado di urgenza degli interventi.

Tabella A.1 - Matrice rischio-intervento.



Terminata la fase d'analisi, la riduzione del rischio avviene in due direzioni: l'una volta a ridurre la frequenza di accadimento dell'evento (prevenzione) e l'altra a contenere le eventuali conseguenze (protezione). La scelta relativa al tipo di intervento da effettuare segue la logica di privilegiare le misure che consentono la riduzione del rischio alla fonte:

- eliminazione del pericolo;
- riduzione del pericolo;

- riduzione del rischio alla fonte;
- gestione ottimale della situazione di pericolo;
- protezione personale;
- informazione e formazione.

Pregi:

- semplicità di applicazione;
- possibilità di integrare tra di loro i fattori eterogenei che concorrono alla determinazione del rischio;
- possibilità di utilizzare rappresentazioni grafiche che forniscono indicazioni di priorità nella pianificazione degli interventi di prevenzione e protezione.

Limiti:

- la natura semi-quantitativa di questi metodi permette la loro applicazione anche nel caso in cui sia difficile reperire dati quantitativi. Questa caratteristica costituisce però anche un potenziale limite legando il successo dell'applicazione alla competenza del valutatore e al suo grado di conoscenza dei fattori che compongono il sistema oggetto di analisi;
- scarsa flessibilità.

## A.2 Metodologie proposte da standard tecnici

Alcuni standard tecnici (p.e. MIL-STD-882, CENELEC EN 50126, ecc.) individuano un insieme di norme pratiche atte a sviluppare un sistema di sicurezza (*Standard practice for System Safety*) con l'obiettivo di fornire specifiche progettuali e strumenti di controllo operativo in grado di eliminare i pericoli individuati o ridurre il rischio a livelli accettabili. Queste norme propongono metodologie semi-quantitative per l'identificazione dei pericoli. L'analisi del rischio si basa sulla stima della frequenza di accadimento dell'evento e della gravità delle conseguenze. Questi metodi di stima sono utili in tutte quelle situazioni in cui non sono disponibili dati quantitativi.

Tabella A.2 - Matrice di rischio.

FREQUENZA DI ACCADIMENTO DI UNA SITUAZIONE PERICOLOSA	LIVELLI DI RISCHIO			
	FREQUENTE	INDESIDERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE
PROBABILE	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	INTOLLERABILE	INTOLLERABILE
OCCASIONALE	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE
REMOTO	TRASCURABILE	TOLLERABILE	INDESIDERABILE	INDESIDERABILE
IMPROBABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TOLLERABILE	TOLLERABILE
INVEROSIMILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE	TRASCURABILE
	INSIGNIFICANTE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
	LIVELLI DI GRAVITA' DELLE CONSEGUENZE DELLA SITUAZIONE PERICOLOSA			

Fonte: CENELEC EN 50126.

Gli output sono:

- una matrice di rischio;
- un indice di rischio, attraverso il quale è possibile individuare le condizioni di maggiore criticità e le priorità degli interventi correttivi volti all'eliminazione e alla riduzione del rischio.

Queste metodologie sono le più adottate, anche in forme personalizzate nelle quali sono modificate le scale relative alla frequenza di accadimento dell'evento e alla gravità delle conseguenze, oppure sono modificati i giudizi relativi ai diversi livelli di rischio.

Pregi:

- semplicità e flessibilità di applicazione, i fattori che si considerano per l'analisi del rischio sono solo la frequenza di accadimento dell'evento e la gravità delle conseguenze, pertanto si ha la possibilità di applicare questi metodi a situazioni e realtà diverse tra loro;
- metodi utili quando non sono a disposizione dati quantitativi;
- forniscono una priorità d'intervento attraverso l'indice di rischio.

Limiti:

- la natura semi-quantitativa di questi metodi permette la loro applicazione anche nel caso in cui sia difficile reperire dati quantitativi. Questa caratteristica costituisce però anche un potenziale limite legando il successo dell'applicazione alla competenza del valutatore e al suo grado di conoscenza dei fattori che compongono il sistema oggetto di analisi;
- questi metodi non considerano alcuni fattori importanti nell'analisi del rischio quali l'ambiente, l'adattamento fisico e psichico umano, ecc.

### **A.3 Metodologie di derivazione affidabilistica**

Il fondamento che giustifica l'utilizzo di tali metodi di analisi, originariamente dedicati allo studio dell'affidabilità di un sistema, risiede nelle seguenti due circostanze:

- gli ambiti di applicazione della sicurezza possono essere riguardati alla stregua dei sistemi tecnici; essi, dunque, possono essere fatti oggetto di analisi mediante le metodologie di derivazione affidabilistica;
- uno dei due meccanismi principali attraverso cui si possono verificare danni e incidenti sono i fenomeni di guasto i quali, appunto, sono investigabili grazie all'affidabilità.

#### FMEA/FMECA

E' un metodo induttivo (*bottom up*) e qualitativo d'analisi dell'affidabilità, adatto allo studio di guasti di apparati e ai loro effetti sul livello funzionale del sistema.

Successive integrazioni, identificazione dei singoli modi di guasto e valutazioni dei loro effetti sullo stadio seguente, portano alla possibile identificazione di tutti i modi di guasto del sistema.

Tale metodologia è applicabile a qualsiasi tipo di sistema, sia esso di natura tecnica sia esso di natura organizzativa gestionale. Questa sua versatilità lo ha reso un valido strumento per effettuare anche l'analisi delle criticità in termini di sicurezza.

La FMEA (Failure Modes Effects Analysis) si presta all'analisi dei sistemi con semplici strutture funzionali. La FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis) estende la FMEA all'analisi di criticità, quantificando gli effetti dei guasti in termini di frequenza e di severità degli effetti.

Tabella A.3 - Esempio di Modulo FMEA.

Team: \_\_\_\_\_

Foglio n°: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

Revisione n°: \_\_\_\_\_

ID	COMPONENTE	FUNZIONE	MODI DI GUASTO E CAUSE	FASE DEL PROCESSO	EFFETTI DEL GUASTO	METODO DI SCOPERTA DEL GUASTO	INTERVENTI TAMPONE	CLASSE DI SEVERITA'	NOTE

Il metodo prevede, come prima fase, la scomposizione dell'intero sistema fino agli elementi (*entità*) che possono essere considerati singolarmente ai fini della valutazione di criticità. Successivamente, per ogni entità, si individuano i relativi modi di guasto e per ciascuno di questi si individuano gli effetti e le cause. Infine, il metodo consente di associare a ciascun modo di guasto individuato un livello di criticità che è dato dal prodotto della stima della frequenza (*Occurrence*) del verificarsi del guasto, della stima della gravità delle conseguenze (*Severity*) del verificarsi del guasto e della stima del parametro *Detectability*, che tiene conto della difficoltà di individuare preventivamente il verificarsi del guasto. La quantificazione della criticità relativa a un guasto permette di selezionare e scegliere le azioni correttive da effettuare, la loro priorità, e di stabilire la demarcazione tra una criticità accettabile e una inaccettabile.

**Pregi:**

- identifica con sistematicità le relazioni causa-effetto;
- può fornire una stima iniziale di quali modi di guasto possono essere più critici;
- risulta utile nella scansione di possibili uscite (non preventivamente considerate) e nell'identificazione delle conseguenze di cause specifiche;
- può mettere in luce le uscite spurie, come pure scostamenti da comportamenti normali;
- utile nelle analisi preliminari di nuove strutture.

**Limiti:**

- non produce, da sola, un modello per valutazioni quantitative;

- può portare a sviluppi molto numerosi, complessi anche per sistemi semplici;
- può risultare complicata e non utilizzabile, a meno che non vi sia un rapporto pressoché diretto tra causa ed effetto, vale a dire non può essere applicata a strutture ridondanti.

### HAZOP

La HAZOP (HAZard and OPerability analysis) è una metodologia di natura qualitativa, che presenta sia aspetti deduttivi (analisi delle cause) che induttivi (analisi delle conseguenze) e ha come obiettivo principale quello di identificare gli eventi iniziali che conducono a incidenti.

Il concetto base di tale metodologia è che un processo si svolge in sicurezza se si trova a operare nelle condizioni di progetto, pertanto, per fare in modo che il processo operi correttamente, è necessario identificare tutte le possibili deviazioni. Il metodo presenta due principali sotto obiettivi fra di loro collegati:

- identificare i rischi e i problemi relativi che degradano le prestazioni dei processi di primaria importanza;
- trovare soluzioni ai problemi individuati.

Tabella A.4 - Formato del modulo per l'analisi HAZOP.

Team: \_\_\_\_\_

Foglio n°: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

Revisione n°: \_\_\_\_\_

COMP. N.	DEVIAZIONE	CAUSE	CONSEGUENZE	SISTEMI DI SICUREZZA	AZIONI DA INTRAPRENDERE
<p>Descrizione del nodo o della sezione del processo allo studio</p> <p>Definizione delle intenzioni di progetto</p>					

Il metodo HAZOP si fonda su un'attività di brainstorming e sulla creatività individuale, in modo da concepire e identificare tutti i possibili modi in cui gli eventi dannosi e i problemi operativi possono concretizzarsi. La tecnica richiede l'analisi sistematica dei parametri di processo e una lista di parole chiave da utilizzare come combinazione con i parametri, per individuare tutte le possibili situazioni di *deviazione* rispetto alle *intenzioni* di progetto che saranno oggetto di analisi e valutazione durante il processo.

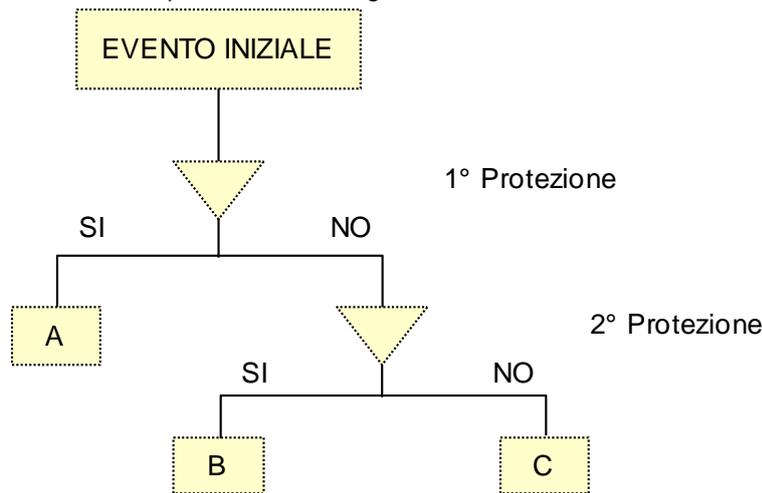
### FTA

E' un metodo deduttivo (*top down*) per analizzare l'affidabilità di un sistema. Riguarda l'identificazione e l'analisi delle condizioni e dei fattori che causano o

possono causare un definito evento indesiderabile (*top event*), che influenza le prestazioni, la sicurezza o altre specifiche caratteristiche di un sistema.

A partire dall'evento iniziatore dell'albero, vengono identificate le possibili cause (o i modi di guasto) dello stadio immediatamente precedente; il processo viene iterato fino al livello più basso desiderato.

Figura A.1 - Esempio di Albero dei guasti.



I risultati dell'analisi sono illustrati sotto forma di albero e utilizzando l'algebra Booleana o l'analisi dell'insieme di taglio, è possibile effettuare un'analisi quantitativa del sistema.

La FTA (Fault Tree Analysis) inizia con l'individuazione di un evento indesiderato (*top event*) e prosegue con la determinazione di tutte le possibili modalità di accadimento dell'evento analizzato. In tal modo si costruisce il cosiddetto albero dei guasti (*fault tree*), che è una rappresentazione logica di un sistema, ovvero un insieme di gruppi, componenti, funzioni, modi di guasto e relative cause associate, secondo la loro struttura relazionale. Le catene di eventi sono costruite tramite l'utilizzo di operatori. L'albero così realizzato mostra i percorsi di guasto e gli scenari che possono condurre all'accadimento di un evento indesiderato; associando le probabilità di accadimento ai singoli eventi costituenti l'albero, è possibile determinare la probabilità di accadimento del *top event* tenendo conto delle interconnessioni presenti fra i vari eventi.

Pregi:

- identifica e documenta con sistematicità il cammino logico da uno specifico effetto, a ritroso, fino alla causa primaria;
- può trattare con sistemi che hanno sottosistemi incrociati;
- può fornire una stima sull'importanza relativa delle varie cause di guasto (o modi di guasto) ai fini dell'evento di interesse;
- può essere trattata con l'ausilio del calcolatore.

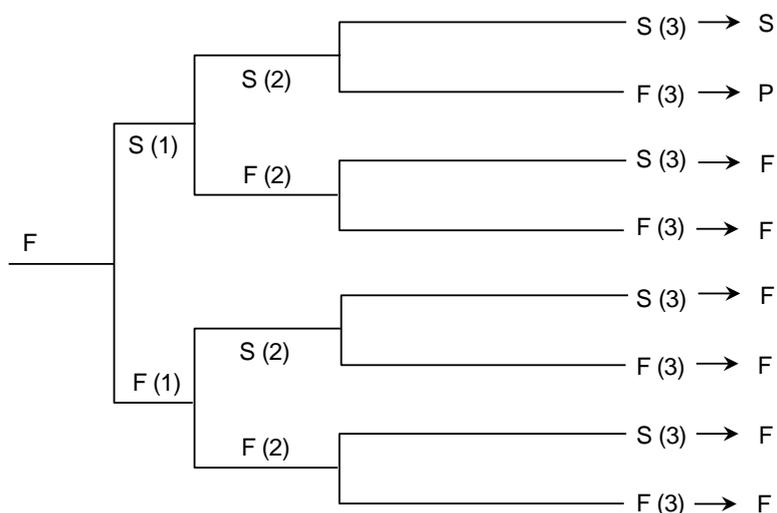
**Limiti:**

- se l'analisi è estesa in profondità può portare ad alberi molto complessi;
- non rappresenta i percorsi di transizione tra gli stati di un qualsiasi evento;
- richiede alberi separati per ciascun top event;
- le cause prime identificate che conducono al top event, sono correlate solo alla specifica conseguenza realizzata in quel momento (tali cause possono portare ad altre conseguenze che possono essere non evidenziate).

**ETA**

La ETA (Event Tree Analysis) presenta alcune caratteristiche simili alla FTA e si differenzia da essa in quanto si parte da un evento iniziale e si sviluppano tutti gli scenari possibili costruendo l'*albero degli eventi* (l'*event tree* è un mezzo per descrivere tutti potenziali cammini nei quali un evento può svilupparsi attraverso il sistema) e considerando il successo o l'insuccesso degli eventi successivi (che possono includere sistemi di protezione attiva o passiva). In tal modo si ottiene un'analisi sistemica degli scenari che possono presentarsi, consentendo una loro valutazione in termini di probabilità di accadimento, semplicemente attraverso il prodotto delle probabilità di tutti gli eventi lungo un ramo che hanno portato il singolo scenario. Alla base di questa modalità di calcolo c'è l'ipotesi di *indipendenza degli eventi* che deve essere comunque verificata. Le conseguenze di un evento richiedono una loro descrizione e quantificazione in generale, all'interno di un albero degli eventi, potranno esserci più modi di misurare le conseguenze. A ogni ramo di un albero degli eventi si può dunque associare un certo livello di rischio dal prodotto tra la probabilità di accadimento e l'entità delle conseguenze.

Figura A.2 - Esempio di Albero degli eventi.



**CCA**

La CCA (Cause Consequence Analysis) si può definire come una via di mezzo tra la FTA e la ETA. Essa, infatti, cerca di mettere insieme i risultati ottenuti dalle due tecniche e cioè le cause che hanno portato al verificarsi del top event (ottenute dalla FTA) e le conseguenze di esso sul sistema (ottenute dalla ETA); avendo a

disposizione i dati appropriati, è possibile quantificare la frequenza di accadimento delle conseguenze di un certo evento incidentale.

#### Safety Review

Questa tecnica fornisce i risultati migliori se viene utilizzata nella fase iniziale della vita di un sistema o se si desidera un'analisi generica delle principali fonti di rischio associate a un processo.

Una verifica di sicurezza effettuata periodicamente identifica le procedure operative che necessitano di essere riviste, gli eventuali cambiamenti del sistema che possono aver introdotto nuove fonti di rischio oppure inadeguatezze nella manutenzione o nella sostituzione di componenti. Deve essere rivolta non solo alla parte produttiva del sistema, ma anche a tutti i settori corollari a esso.

Una verifica di sicurezza passa attraverso l'effettuazione di interviste ai dipendenti per poter analizzare la situazione dei diversi punti di vista, la verifica delle azioni non di routine che vengono effettuate perché spesso fonti di gravi rischi e l'analisi delle conoscenze del personale di sicurezza e, se necessario, l'istituzione di corsi di formazione.

Nella Tabella A.5 è riportato il confronto tra i metodi di analisi di derivazione affidabilistica, descritti nel presente paragrafo.

### **A.4 Metodologie avanzate per l'analisi dei rischi**

Le metodologie avanzate si basano su algoritmi che non si limitano semplicemente a elaborare le informazioni che ricevono, bensì creano altri algoritmi e procedure adatti a questo compito. In pratica, si può parlare di meta-algoritmi in grado di generare gli algoritmi necessari al trattamento dei dati ai quali sono sottoposti.

Le caratteristiche di queste tecniche possono essere utili nel campo della sicurezza per l'analisi dei rischi, anche utilizzate insieme ad altri metodi, in considerazione della difficoltà di esprimere in termini oggettivi e matematici il rischio associato a un potenziale evento dannoso.

Le tecniche più utilizzate sono:

- le reti neurali artificiali;
- la fuzzy logic;
- gli algoritmi genetici.

### **A.5 Considerazioni sulla scelta della metodologia**

Al fine di scegliere una delle tecniche di analisi del rischio, è opportuno considerare in maniera particolare cinque caratteristiche del sistema oggetto d'esame:

- la complessità e le dimensioni;
- il tipo di sistema;
- il tipo di operazioni che vengono effettuate;

- la natura dei rischi eventuali associati ai processi;
- principali eventi incidentali di interesse.

Sulla complessità e le dimensioni, si è già detto quali siano i limiti di applicabilità delle singole metodologie. È importante selezionare un livello di approfondimento dell'analisi compatibile con il sistema (p.e. un processo di notevoli dimensioni, è consigliabile suddividerlo in sotto-processi più semplici a cui applicare la tecnica di analisi più appropriata). In generale, è possibile affermare che all'aumentare degli elementi del sistema, il tempo e i costi dell'analisi crescono proporzionalmente.

Il tipo di sistema influenza la scelta della metodologia di analisi. Ad esempio, la FMEA è riconosciuta essere efficiente per i rischi associati ai sistemi elettronici, a differenza della HAZOP che viene usata soprattutto con i componenti meccanici.

Il terzo punto (tipo di operazioni che vengono effettuate) abbraccia una casistica talmente ampia da poter essere difficilmente classificato; è evidente che le operazioni svolte dal sistema, siano esse per loro dipendenti o indipendenti, costanti o variabili nel tempo, sono un fattore determinante del processo decisionale.

La quarta caratteristica del processo (natura dei rischi associati) non ha un'importanza fondamentale nella scelta della metodologia di analisi. Infatti, tutte le tecniche adottabili trattano il rischio indipendentemente dalla sua natura specifica.

Infine, per l'ultimo punto (principali eventi incidentali di interesse) è importante che sia nota la presenza di:

- rischi singoli o multipli;
- perdite delle funzioni del sistema;
- stravolgimenti dei processi;
- eventuali guasti agli apparati o riconducibili all'uomo.

In particolare, la presenza di rischi singoli o multipli ha un peso rilevante; la FTA, la ETA e la CCA possono essere utilizzate in presenza di più eventi incidentali, mentre la HAZOP, la FMEA non sono normalmente prese in considerazione per questo scopo, sebbene possono essere estese alle valutazioni di semplici incidenti causati da più di un evento.

## **A.6 Schede di sintesi delle principali metodologie**

In questo paragrafo, mediante l'uso di schede di sintesi, vengono descritti gli elementi fondamentali che caratterizzano le metodologie più diffuse in ambito tecnico-ingegneristico. Alcune di queste si basano sugli insegnamenti acquisiti in passato e sull'aderenza delle situazioni agli standard di buona tecnica presentando forti limitazioni come la totale inapplicabilità a tecnologie nuove o a situazioni non espressamente previste. Altre si basano su schemi analitici complessi e altamente strutturati permettendo una valutazione preventiva dei rischi. La grande limitazione posta da questi metodi consiste nelle ampie risorse che richiedono.

Tabella A.5 - Confronto dei metodi di analisi di derivazione affidabilistica.

METODO	APPROCCIO DEDUTTIVO	APPROCCIO INDUTTIVO	ANALISI QUALITATIVA	ANALISI QUANTITATIVA	SIMULAZIONE DEI PROCESSI	RAPPRESENTAZIONE SIMBOLICA	COSTO DELL'ANALISI QUALITATIVA	COSTO DELL'ANALISI QUANTITATIVA
FMEA	(NA)	A	A	NA	NO	LISTA	Elevato	-
FMECA	NA	A	A	(A)	NO	LISTA	Elevato	Basso
HAZOP	A	A	A	NA	NO	LISTA	Medio	-
FTA	A	NA	A	A	NO	ALBERO	Elevato	Medio
ETA	A	A	(NA)	A	SI	ALBERO	Basso	Basso
OCA	(A)	A	A	A	NO	DIAGRAMMA	Elevato	Basso/Elevato <sup>(1)</sup>
Safety Review	NA	A	A	NA	-	TABELLA	Elevato <sup>(2)</sup>	-

SIMBOLI	( )	Restrizioni/Eccezioni	<sup>(1)</sup>	Basso per il tasso di eventi, Elevato per l'indisponibilità
	NA	Non Applicabile	<sup>(2)</sup>	Dipende dalla complessità del sistema (processo stocastico da simulare) e dalle possibili approssimazioni (troncamento delle sequenze di eventi)
	A	Applicabile		

<b>METODOLOGIA FMECA</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>La FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis) è una metodologia strutturata che consiste in una tabulazione delle singole componenti del sistema, delle relative modalità di guasto e delle corrispondenti conseguenze. Di ogni componente studia, inoltre, gli eventi iniziatori del “peggior caso” verificabile.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Si presta particolarmente allo studio di sistemi di tipo componentistico, costituiti cioè da 10 o più “items”; può fornire informazioni utili all’applicazione di metodologie sistemistiche (p.e. FTA (Fault Tree Analysis), ecc.).</p> <p>Utilizzata da sola, la metodologia non è sufficiente a identificare le possibili interazioni di guasto tra le varie componenti del sistema. Non è adatta all’identificazione delle cause di processo, di utilities, ecc. A volte, la valutazione quantitativa dei singoli livelli si dimostra complessa e il risultato è un giudizio relativamente soggettivo.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>Può essere eseguita da due o più analisti. Applicata con maggior dettaglio risulta essere onerosa per cui può essere sostituita da PHA (Preliminary Hazard Analysis) o “What-if”. Ad ogni analista è sufficiente un tempo relativamente breve per 2 - 4 operazioni di controllo.</p> <p>Gli errori umani non vengono presi in considerazione ma i loro effetti sono comunque descritti. I risultati sono fortemente dipendenti dall’esperienza di tipo tecnico dell’analista.</p>

<b>METODOLOGIA HAZOP</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>La metodologia HAZOP (HAZard and OPerability Analysis) identifica gli eventi iniziatori del caso peggiore ipotizzabile. Il risultato finale consiste nell'identificazione dei rischi e dei problemi operativi che potrebbero compromettere il corretto funzionamento di un sistema.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Si tratta di una metodologia molto articolata che garantisce un alto livello di completezza. Rispetto alla FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis) mantiene un margine di vantaggio perché nonostante la loro similarità nella sistematicità adottata, la HAZOP non studia solo i singoli items, ma anche le interrelazioni di ciascuno di essi con il resto della struttura.</p> <p>Richiede un team dotato di una grande conoscenza nel campo dei processi e dei sistemi. Non è idoneo per l'identificazione degli errori umani.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>Relativamente frequente, si rivela particolarmente adatta all'analisi dei processi e ottima dal punto di vista economico se riferita a un nuovo impianto. Il team deve essere preferibilmente costituito da 5 - 7 professionisti.</p> <p>Può essere applicato ai fini di un risultato di tipo semi-quantitativo. In generale, i costi e i tempi relativi sono strettamente correlati alle dimensioni e alle caratteristiche del sistema considerato.</p>

<b>METODOLOGIA FTA</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>La FTA (Fault Tree Analysis) parte da un evento incidentale procedendo per metodo deduttivo alla stesura di una sequenza logica di cause iniziali e intermedie che ne determinano, singolarmente o per interconnessione, la possibilità di accadimento. Il grafico che ne risulta è una rappresentazione ad “albero” composto da vari livelli alla fine di ciascuno dei quali gli eventi intermedi si trasformano a loro volta in cause iniziali con una loro probabilità di accadimento. La frequenza dell’evento principale dipende da quella dei vari insiemi. Minore è il numero degli eventi intermedi, maggiore è la probabilità di verificarsi dell’evento finale.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Analizza l’evento principale studiando le possibili combinazioni degli eventi intermedi individuando i punti “a rischio” che più contribuiscono al verificarsi dell’incidente e quindi anche le misure preventive più idonee per ridurre la probabilità. E’ una tecnica molto utile per lo studio degli errori umani e delle “cause” comuni di guasto.</p> <p>Se applicato dettagliatamente può essere molto oneroso perciò, è consigliabile effettuare l’applicazione agli eventi più rappresentativi.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>Limitata. L’analista addetto deve consultarsi frequentemente con tecnici e operatori.</p> <p>Il risultato, di tipo qualitativo, ma potenzialmente anche quantitativo, è un’elencazione degli scenari dei fallimenti della componente tecnologica e/o umana relativa ad un determinato evento. Il tempo necessario a questo tipo di analisi può essere di un giorno, se si tratta di una piccola unità di processo, o di più settimane se l’apparecchiatura è grande e complessa.</p>

<b>METODOLOGIA ETA</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>A partire da una condizione potenzialmente pericolosa o da un incidente complesso generato da una deficienza del sistema o da errore umano, la ETA (Event Tree Analysis) costruisce, per metodo induttivo, le possibili evoluzioni, assegnando a ogni scelta una determinata probabilità di accadimento. Si ottiene un duplice percorso evolutivo per ogni fase da considerare e il risultato è un numero di scenari incidentali proporzionale alla quantità di proposizioni inserite.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Questo tipo di analisi è utile ai fini dell'identificazione delle situazioni critiche che più contribuiscono allo sviluppo negativo dell'evento iniziatore o, al contrario, a una sua attenuazione (p.e. nuovi interventi). Riesce a evidenziare lo "sviluppo cronologico" degli incidenti susseguenti un evento iniziale, in base a risposte positive o fallimentari dei dispositivi di sicurezza.</p> <p>Nel caso di sviluppi paralleli o cause comuni di guasto, si possono presentare difficoltà di elaborazione. La valutazione quantitativa di alcune opzioni rischia di essere molto soggettiva. L'incertezza dei risultati ottenuti dipende dalla stessa incertezza presente in ogni singola possibilità introdotta e aumenta ampliando il loro numero.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>E' auspicabile non adottare un numero elevato di opzioni per non complicare eccessivamente l'albero, se però si tratta di "cause comuni di guasto", allora devono essere considerate attentamente.</p> <p>Può essere utilizzata anche come sistema diagnostico e decisionale. Questa analisi può essere eseguita da un analista, preferibilmente da un gruppo di 2-4 persone. Un'unità di processo di piccole dimensioni può richiedere pochi giorni, mentre sono necessarie molte settimane per quelle più grandi e complesse.</p>

<b>METODOLOGIA HEA</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>La HEA (Human Error Analysis) è un insieme di tecniche che descrive le condizioni fisiche e ambientali in cui l'operatore svolge i propri compiti tenuto conto delle capacità e delle abilità a lui richieste e valutandone gli errori. I dati raccolti sono utilizzati sia per l'individuazione degli elementi ergonomici che più influiscono sia per la creazione di un data-base utilizzabile in altre tecniche quali la FTA e la ETA. L'errore umano è inteso nel suo senso più ampio in quanto sono studiati anche gli errori di gestione, di revisione o di progettazione e non solo quelli operativi o di manutenzione.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Permette la comprensione dell'influenza dei fattori umani nello svolgimento di operazioni normali o di emergenza (come cause iniziali o come concause incidentali) e di riconoscerne il meccanismo di formazione. Conseguentemente, vengono fatte proposte di modificazione al sistema per ridurre l'incidenza.</p> <p>La materia è in una fase iniziale rispetto al livello raggiunto dalle altre metodologie, inoltre, coinvolgendo argomenti e situazioni non facilmente razionalizzabili, è ancora soggetta a molte incertezze.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>E' rara e richiede molta attenzione. Il tempo necessario a identificare l'origine di un errore varia secondo i compiti richiesti all'operatore, ma l'analisi può in ogni caso essere completata in poco tempo. I dati necessari all'analista sono quelli relativi alle procedure del sistema, altri desumibili da interviste rivolte al personale.</p> <p>Si può utilizzare anche nella progettazione di strumenti o ambienti di lavoro, nella gestione del personale, nello studio dei procedimenti operativi, ecc.</p>

<b>METODOLOGIA PHA</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>La PHA (Preliminary Hazard Analysis) è utilizzata nella fase di ideazione di un sistema (o parte di esso) o quando il progetto è ancora scarsamente dettagliato o se l'esperienza precedente non può fornire i dati necessari alla sicurezza e alle procedure adottate. L'analisi procede item per item fornendo un giudizio di criticità di tipo semiquantitativo.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Si dimostra molto flessibile e può essere considerata un precursore per l'applicazione di altre metodologie quali la FTA. Avendo come scopo quello di riconoscere con anticipo i rischi questo si traduce in un risparmio di tempo e di denaro in quanto i rischi possono essere ridotti o quantomeno controllati già a uno stadio iniziale.</p> <p>Non garantisce carattere di sistematicità, né per l'identificazione dei rischi né per l'individuazione delle cause.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>Relativamente frequente; viene applicata più o meno dettagliatamente. Questo tipo di analisi deve essere preferibilmente condotta da 1 o 2 tecnici esperti nel settore della sicurezza.</p> <p>Il risultato finale consiste in un'elencazione di rischi relativi al sistema e in una serie di consigli ai progettisti onde ridurre gli incidenti.</p>

<b>METODOLOGIA CHECKLIST</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>Una Checklist consiste in una lista di voci di controllo basate sulle esperienze precedenti e da utilizzare in caso di determinate analisi per evitare situazioni già verificatesi, per attivare i procedimenti necessari o confrontare la rispondenza di apparecchiature, materiali, procedure e sistemi di sicurezza con standard di buona tecnica ingegneristica e normative vigenti. Con questo metodo è assicurato il livello minimo richiesto nella valutazione dei rischi.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Si tratta di uno dei metodi più semplici e meno costosi per la valutazione dei rischi; molto utile per rilevare gli errori più comuni e di grande aiuto per tecnici con poca esperienza in questo campo.</p> <p>Ha il limite di essere fortemente dipendente dall'esperienza acquisita dal suo o dai suoi autori per cui non è in grado di identificare rischi non esplicitamente già previsti.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>Semplice e frequente, può evidenziare una situazione che richiede una valutazione più dettagliata.</p> <p>Di checklist ne esistono più tipi, ognuna utilizzabile per scopi specifici e dovrebbero essere regolarmente verificate e aggiornate.</p>

<b>METODOLOGIA CCA</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>A partire da un possibile evento, la metodologia CCA (Cause Consequence Analysis) studia le possibili vie di sviluppo tramite un procedimento che è una combinazione tra il “pensare in anticipo” della ETA (Event Tree Analysis) e il “pensare a ritroso” della FTA (Fault Tree Analysis). Il risultato è un diagramma che si sviluppa appunto in due direzioni, perché considera l’interrelazione tra le conseguenze dell’incidente e le cause su cui queste si basano. La sequenza dell’incidente è scomposta in una serie di eventi, ognuno dei quali rappresenta l’evento “top” per un’analisi del tipo FTA.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>E’ uno strumento molto duttile che racchiude alcuni vantaggi sia della FTA sia della ETA. Come analisi può essere utilizzata per fare una previsione della frequenza di accadimento delle conseguenze.</p> <p>Risulta essere piuttosto complessa anche se utilizzata in sequenze relativamente semplici. Presenta tutti gli svantaggi della FTA e della ETA.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>Il team addetto all’analisi è preferibilmente costituito da 2 - 4 persone con svariate esperienze: una persona pratica della FTA e della ETA e le altre esperte delle interazioni tra i sistemi oggetto dell’analisi.</p> <p>La sua complessità logica ne rende difficile l’utilizzo al fine di ottenere una visione completa e più incisiva delle sequenze evolutive o causali. Un’analisi dettagliata può richiedere alcune settimane, essendo in relazione soprattutto alla complessità del supporto fornito dalla FTA.</p>

<b>METODOLOGIA SAFETY REVIEW</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>La Safety Review consiste nel controllo degli aspetti tecnici e/o operativi di un sistema sotto l'aspetto della sicurezza eseguita da un gruppo di esperti in chiave di brainstorming; comprende generalmente una serie di interviste rivolte al personale presente all'interno dell'impianto quali lo staff della sicurezza, gli ingegneri, gli addetti all'amministrazione e altri operatori a seconda del tipo di organizzazione.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Questo metodo risulta efficace nell'impiego dell'esperienza ingegneristica, in quanto, basandosi sul contributo di più gruppi di persone nell'ambito dello stesso sistema, dà la possibilità di ottenere un controllo particolareggiato sotto vari punti di vista.</p> <p>Non è garante né di completezza né di sistematicità, inoltre, non prende in considerazione i rischi legati alle modifiche del sistema.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>Il ricorso a questa metodologia è relativamente frequente e in particolare si applica ai processi operativi. Un'analisi completa richiede un gruppo di 2-5 persone esperte.</p> <p>Le persone designate per l'effettuazione della revisione devono avere una buona esperienza in procedure e modelli di sicurezza e hanno il compito di stendere un rapporto finale che includa tutte le variazioni dei procedimenti rispetto a quanto pianificato in origine. Raramente il procedimento e i risultati sono formalizzati. Nel corso della revisione possono essere utilizzate tecniche di valutazione dei rischi quali "Checklist" e "What-if".</p>

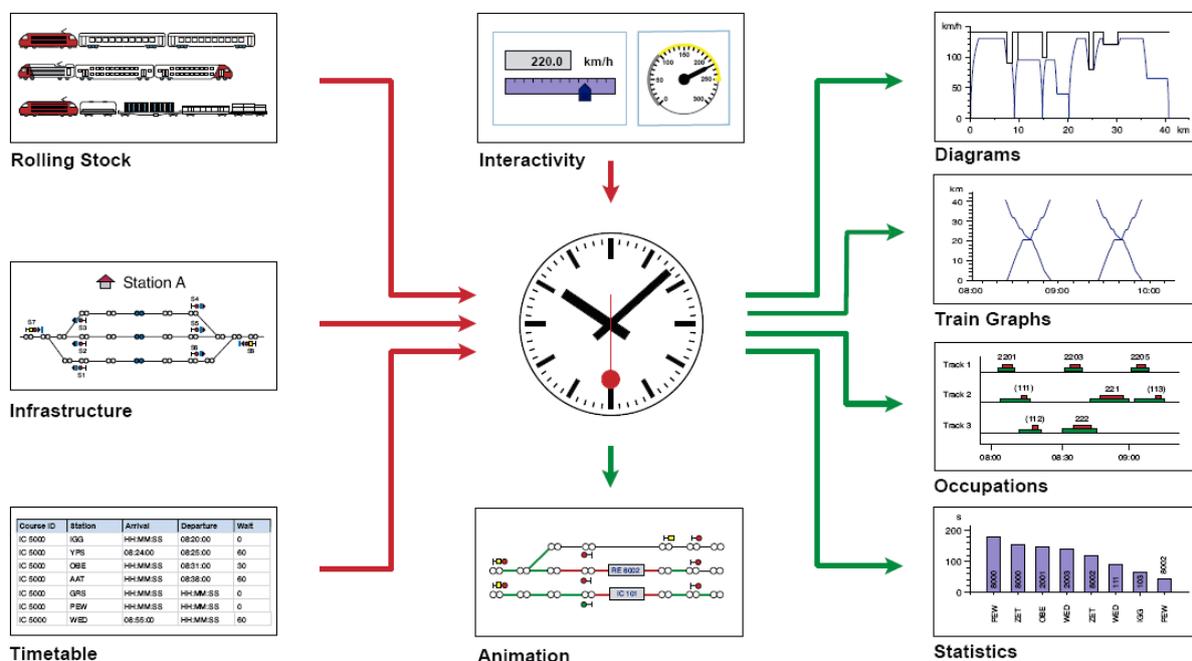
<b>METODOLOGIA WHAT-IF</b>	
<b>CARATTERISTICHE</b>	<p>Con l'analisi What-if vengono considerate le sequenze di eventi imprevisti identificandone al tempo stesso le probabili conseguenze e di queste le varie combinazioni e i mezzi per ridurle. E' così chiamata perché pone domande che iniziano con "What if"; le domande costituiscono poi vari gruppi secondo l'area studiata e ognuna di queste è seguita da un team di 2-3 esperti.</p>
<b>PREGI E LIMITI</b>	<p>Rende più completa la Safety Review, ma risulta essere meno utilizzabile come fonte d'informazioni per altri tipi d'analisi. Fra i suoi scopi primari è compresa la stima delle conseguenze del "peggior caso" verificabile. Ha il pregio di poter essere applicata, secondo le esigenze, più o meno dettagliatamente.</p> <p>Applicata in modo dettagliato può essere molto onerosa senza però ottenere il grado di completezza della HAZOP essendo, rispetto a quest'ultima e anche alla FMECA, meno strutturata.</p>
<b>APPLICAZIONE</b>	<p>E' comunemente applicata a sistemi esistenti e nel caso di proposte di modifiche relative agli stessi. I tempi e i costi per la sua applicazione sono proporzionali al tipo di sistema e al numero delle "aree" oggetto dello studio.</p> <p>Può rivelarsi potente se applicata da un esperto. I dati richiesti per una sua applicazione sono costituiti dalla documentazione relativa al sistema, alle procedure e al processo più le interviste fatte al personale operativo.</p>

## B. OpenTrack©: simulazione della circolazione ferroviaria

OpenTrack© (OT) è un software commerciale progettato e sviluppato dall'Institute for Transport Planning and Systems (ETH) di Zurigo per simulare la circolazione dei treni su una data infrastruttura ferroviaria.

Nella Figura B.1 è rappresentato il principio di funzionamento ed i processi di input, simulazione e output. In particolare, i dati di input fanno riferimento al materiale rotabile, all'infrastruttura e all'orario che ne esplicita anche il modello di esercizio adottato.

Figura B.1 - Principio di funzionamento e processi di OpenTrack©.



Fonte: OpenTrack© Manual.

OpenTrack© utilizza i dati tecnici di ogni locomotiva e treno, tra cui il diagramma di sforzo di trazione/velocità, la massa, la lunghezza e il peso aderente. In uno specifico database le locomotive sono organizzate in gruppi; un treno simulato ha una composizione formata da una locomotiva (o treno automotore) e un certo numero di carrozze o carri.

L'infrastruttura è rappresentata mediante un tipo di grafo denominato *Double Vertex Graph*. La topologia viene inserita mediante un editor grafico. I diversi elementi contengono una serie di attributi che ne rappresentano le caratteristiche (p.e. un arco ha una data lunghezza, pendenza longitudinale, velocità per i diversi ranghi).

Un database contiene l'orario dei treni, definito da partenze, transiti e arrivi, tempi minimi di fermata e coincidenze con altri servizi. L'orario può essere modificato da

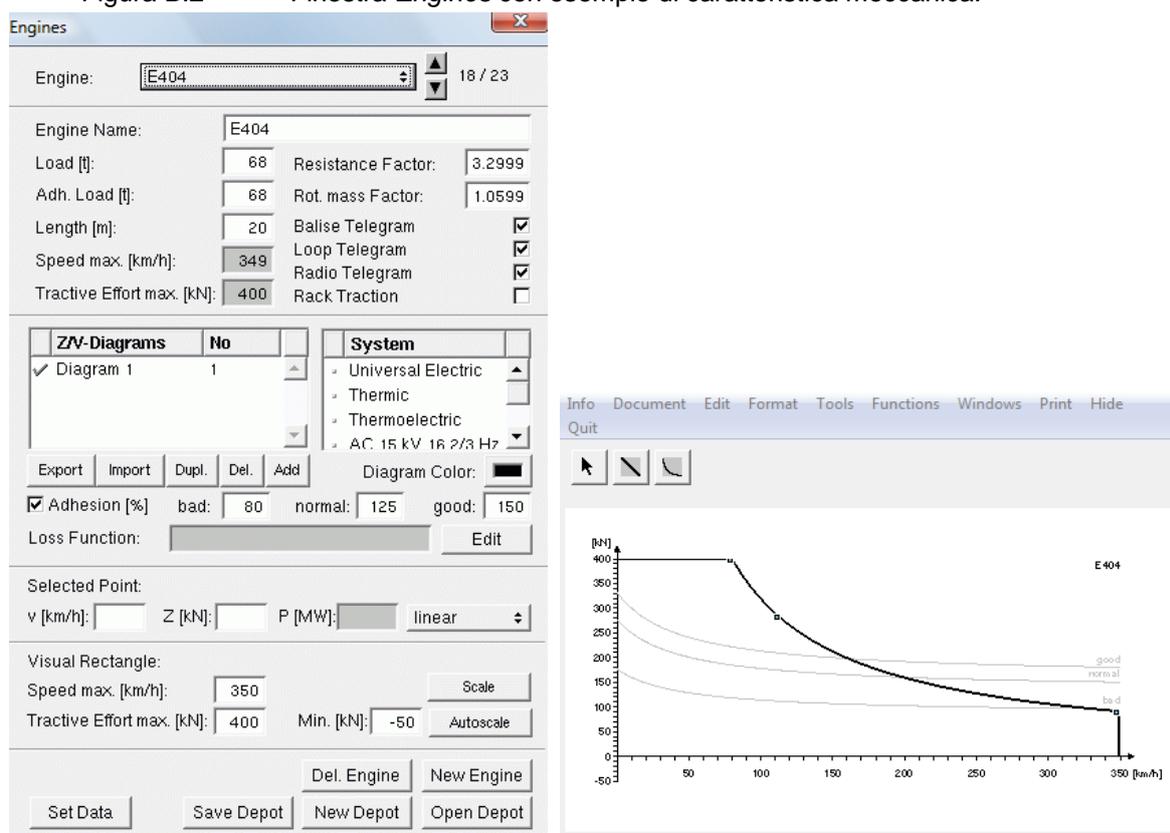
tabella oppure con il mouse sull'orario grafico. Le differenze tra orario pianificato e simulato sono osservabili sia nella tabella che sul grafico.

Dopo una simulazione, il software consente la visualizzazione dei risultati della simulazione sotto forma di testo o grafici; offre diverse possibilità di rappresentazione e analisi dei risultati. Per ogni treno, può rappresentare diagrammi come ad esempio spazio/accelerazione o spazio/tempo; orari grafici, occupazioni e profili di linea.

## B.1 Il materiale rotabile

La rappresentazione dei treni in OpenTrack© avviene mediante la composizione di locomotive (*engines*) e carrozze/carri (*trailers*). Le caratteristiche tecniche delle locomotive (nome, massa, massa aderente, lunghezza, velocità massima, sforzo di trazione massimo, coefficienti per il calcolo della resistenza al moto, tipo di segnalamento a bordo, sistema di alimentazione, prestazioni in condizioni di aderenza e caratteristica meccanica del motore, ecc.), sono contenute all'interno di un database. Nella Figura B.2 è riportata la finestra di dialogo "Engines" necessaria per l'inserimento dei dati relativi a una locomotiva.

Figura B.2 - Finestra *Engines* con esempio di caratteristica meccanica.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack©.

La caratteristica meccanica, che rappresenta l'andamento della forza di trazione in funzione della velocità di percorrenza, può essere introdotta anche graficamente.

La composizione di una o più locomotive con le carrozze/carri avviene attraverso la finestra di dialogo “Trains” riportata in Figura B.3. Le caratteristiche tecniche dei trailers (nome, numero, massa, lunghezza, velocità massima, ecc.), devono essere inserite nella fase di composizione del treno.

Figura B.3 - Finestra Trains.

Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack©.

Composti i treni è possibile classificarli in categorie, a ognuna delle quali assegnare determinate caratteristiche di gruppo.

Per il calcolo delle resistenze, OT considera la resistenza totale  $R_{tot}$  come somma della resistenza al movimento  $R_m$  e di quella dovuta alle fasi di accelerazione  $R_a$ :

$$R_{tot} = R_m + R_a$$

La resistenza al movimento  $R_m$  è pari a:

$$R_m = R_r + R_i + R_c + R_d$$

ovvero somma della resistenza al rotolamento  $R_r$ , della resistenza di rampa  $R_i$ , della resistenza in curva  $R_c$  e della resistenza dovuta alla percorrenza di deviatoli  $R_d$ .

La resistenza al rotolamento  $R_r$  è composta dalla resistenza dovuta all'attrito dell'aria, dalla resistenza d'inerzia, dal contatto ruota-rotaia e da altri attriti. Nella percorrenza in galleria la resistenza dovuta all'attrito dell'aria è incrementata tramite opportuni

coefficienti in funzione della scabrezza e della forma del veicolo, della scabrezza e della forma della galleria.

Per il calcolo di  $R_r$ , il software detiene tre formule diverse: di *Sauhoff* (per carrozze passeggeri), di *Strahl* (per locomotori) e di *Strahl* modificata (per carri merci). Può essere anche adottata, in generale, la formula di *Davis* in forma di equazione quadratica.

La resistenza di rampa  $R_i$  è data come porzione della massa del treno che lavora come resistenza opposta al moto del treno.

La resistenza in curva  $R_c$  è invece causata dalla rigidità degli assili dei treni che percorrono rotaie con raggi differenti (problema dell'iscrizione in curva) ed è funzione dell'interasse tra le rotaie; il software la determina mediante la formula di *Von Roeckl*:

$$R_c = \frac{6,3}{r - 55} * m \quad \text{per } r < 300m$$

$$R_c = \frac{4,91}{r - 30} * m \quad \text{per } r > 300m$$

ove  $m$  è la massa e  $r$  è il raggio di curvatura.

La resistenza dovuta alle fasi di accelerazione  $R_a$  è pari a (equazione di *Newton*):

$$R_a = m * a * (1 + 0,01 * p)$$

ove  $m$  è la massa del treno,  $a$  è l'accelerazione e  $p$  è un fattore che dipende dalla tipologia di treno.

E' da notare che  $R_a$  si ha quando un treno accelera (o frena), quando cioè varia il suo stato cinematico, ed è proporzionale alla massa del treno stesso e alla capacità di accelerazione. Interessa sia il moto di traslazione (in parte) sia il moto di rotazione delle masse rotanti.

## B.2 L'infrastruttura

La rappresentazione dell'infrastruttura ferroviaria in OpenTrack© avviene mediante l'insieme di due elementi principali: i *vertex* (nodi) e gli *edges* (archi) come riportato nella Figura B.4.

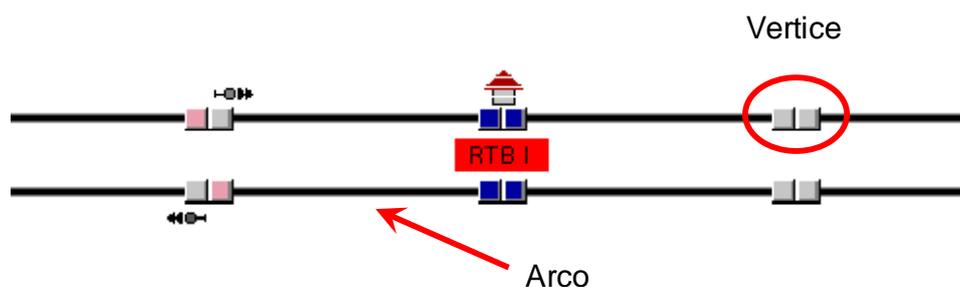
Esistono tipi particolari di nodi denominati "*station vertex*" che servono ad identificare i binari di stazione in corrispondenza dell'asse Fabbricato Viaggiatori (FV). In questi ultimi nodi non possono essere rappresentati i segnali.

I vertex, contraddistinti tra loro da un proprio nome e da una progressiva chilometrica, rappresentano i punti singolari dell'infrastruttura, quali:

- deviatoi;

- segnali;
- cambiamenti di pendenza;
- variazioni di velocità;
- inizio/fine galleria;
- passaggi a livello;
- raggi di curvatura.

Figura B.4 - Rappresentazione dei Vertex e degli Edges.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack®.

Gli edges collegano due vertex e rappresentano i binari di circolazione ai quali possono essere assegnate diverse caratteristiche, quali:

- lunghezza;
- raggio;
- pendenza;
- eventuale presenza e tipologia di tunnel;
- tipo di segnalamento esistente;
- velocità massima per ogni rango per ciascuna direzione.

I *signals* (segnali), suddivisi in luminosi e indicatori di fermata, devono essere associati ai vertex, con particolare attenzione al senso di marcia cui si riferiscono.

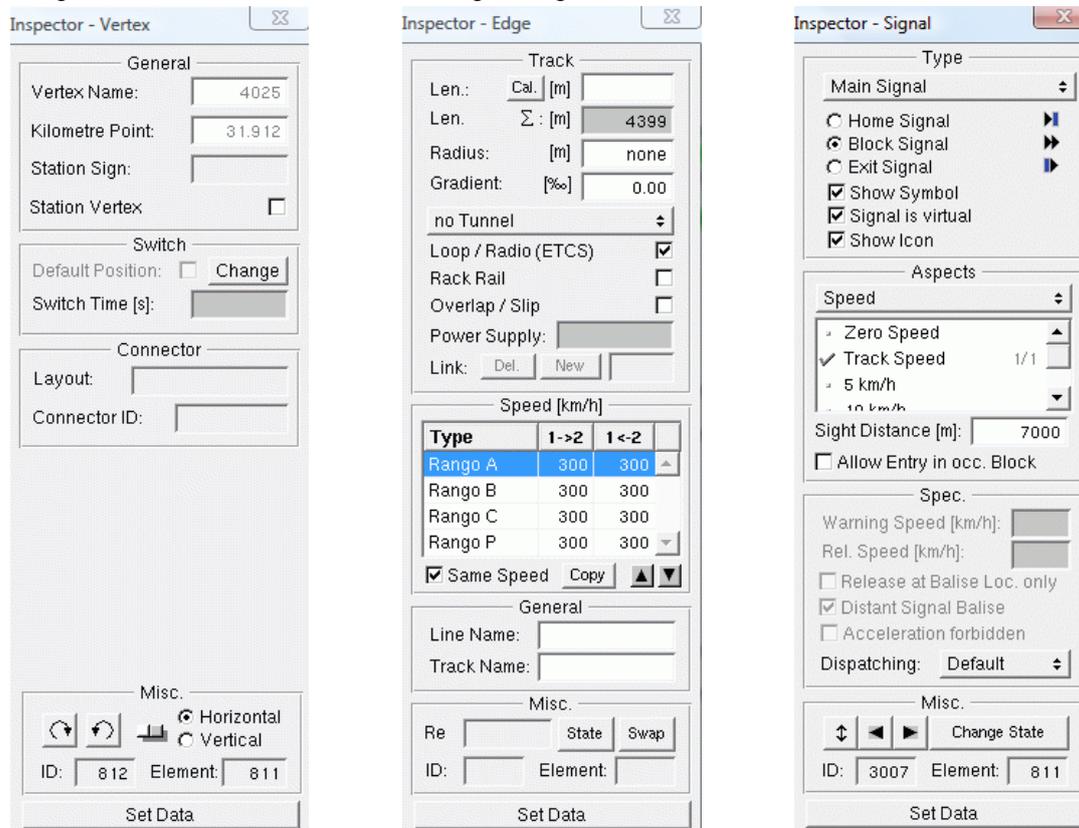
I segnali luminosi sono suddivisi in segnali di prima categoria, segnali di avviso e segnali combinati. I segnali di prima categoria possono essere a loro volta suddivisi in segnali di partenza, di protezione e di blocco. Gli indicatori di fermata servono per indicare al treno il punto di arresto in corrispondenza di una stazione.

Per la gestione delle stazioni occorre preventivamente definire un apposito database delle stazioni a ognuna delle quali è associato un nome univoco.

Successivamente, occorre definire la cosiddetta "*Station Area*", che consiste nel raggruppare un certo numero di nodi, archi e segnali sotto la stessa stazione. Tale area solitamente comprende tutto quanto rientra tra i due segnali di protezione. Se non si utilizza tale funzione un treno potrebbe non effettuare la fermata (anche se prevista) in quanto il segnale di stop relativo non è assegnato alla stazione in questione.

Infine, per ogni stazione occorre specificare il tipo di apparato che la gestisce (elettromeccanico, elettrico, computerizzato).

Figura B.5 - Finestre Vertex, Edge e Signal.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack©.

Dopo aver inserito nodi, archi, segnali, stazioni con le relative caratteristiche fisiche (Figura B.5) ovvero costruito lo schema funzionale degli impianti e delle linee è necessario specificare i percorsi che i treni potranno effettuare sull'infrastruttura realizzando così il modello di esercizio voluto.

La costruzione dei percorsi in OpenTrack© avviene per passi successivi poiché esistono tre livelli diversi di percorso: *route*, *path* e *itinerary*.

Il primo livello è definito "*route*" e consiste in un insieme di vertex ordinati per direzione a partire da un signal vertex fino a un successivo signal vertex. A partire dalla selezione di un segnale, il software individua automaticamente tutte le routes possibili fino al successivo segnale fornendo la possibilità di individuare quelle volute.

Il secondo livello è chiamato "*path*" ed è una concatenazione di routes, ordinate per direzione di viaggio. Generalmente vanno da un segnale di partenza di una stazione al segnale di partenza della stazione successiva.

Il terzo ed ultimo livello è definito "*itinerary*", costituito da un insieme di paths (non necessariamente ordinate per direzione di viaggio), che descrivono il percorso completo di un treno dalla stazione di partenza a quella di arrivo. A ciascun treno deve essere assegnato almeno un itinerario (o più itinerari con un'eventuale priorità).

Durante la simulazione i treni si muovono lungo l'itinerario prescelto e occupano gli archi corrispondenti. Durante il moto, devono interdire l'utilizzo degli archi appartenenti ad altri itinerari incompatibili; per definire le effettive incompatibilità, esiste la funzione "change state" che permette di definire quali archi debbano essere occupati durante la percorrenza di una determinata route.

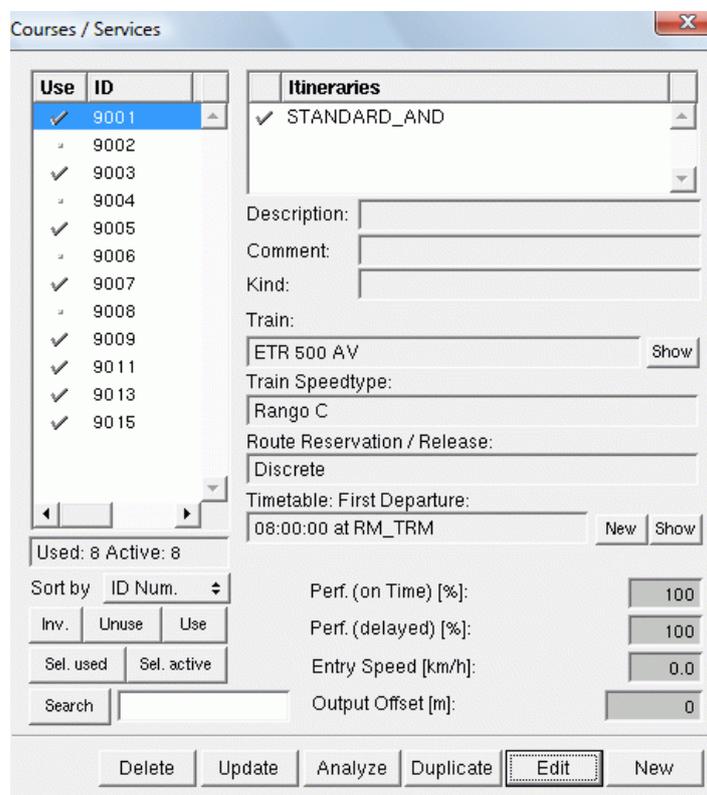
### B.3 L'orario

La simulazione della circolazione ferroviaria, in funzione del modello di esercizio desiderato, potrà essere eseguita solo dopo aver definito, per ogni singolo treno, la cosiddetta "course" (corsa) e il relativo "timetable" (orario).

Ad una corsa devono essere associati (come riportato nella Figura B.6):

- il nome;
- l'itinerario;
- l'orario;
- il materiale rotabile;
- il rango di velocità;
- la performance on time;
- la performance delayed;
- la entry speed.

Figura B.6 - Finestra Courses.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack©.

I termini *performance on time* e *performance delayed* si riferiscono alle performance che i treni devono garantire in caso di rispetto dell'orario o di ritardo; mediante le performance si definiscono i margini di recupero.

L'orario, relativo a ogni singola corsa di un treno, viene definito attraverso la finestra di dialogo "Timetable" (Figura B.7). Le informazioni necessarie per compilare l'orario fanno riferimento alle stazioni e alle fermate che il treno incontra durante l'espletamento del suo itinerario.

Figura B.7 - Finestra *Timetable*.

Course ID	Station	Arrival	Departure	Wait	Stop	M. Del.
9001	RM_TRM	HH:MM:SS	08:00:00	0	0	0
9001	RM_PRN	HH:MM:SS	HH:MM:SS	0	0	0
9001	PM_SLN	HH:MM:SS	HH:MM:SS	0	0	0
9001	RTB_I	HH:MM:SS	HH:MM:SS	0	0	0
9001	PM_LBC	HH:MM:SS	HH:MM:SS	0	0	0
9001	RTB_II	HH:MM:SS	HH:MM:SS	0	0	0
9001	PM_ANG	HH:MM:SS	HH:MM:SS	0	0	0

Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack©.

Per ogni località di servizio è possibile inserire l'orario di arrivo e/o partenza, il tempo di sosta, la sosta (indipendentemente dal tempo di sosta), il ritardo iniziale in secondi o accumulato alla generica fermata, la distribuzione di probabilità relativa al ritardo dei tempi di sosta.

Dalla finestra di dialogo è possibile anche effettuare eventuali connessioni con altre corse (per attesa coincidenza o cambio banco), oppure definire gli intervalli di ripetizione dei treni, funzione utile in fase di costruzione di un orario cadenzato.

Durante la simulazione, in ogni località di servizio, è possibile confrontare l'orario programmato con quello simulato (*Show actual data*) e con questo confronto è possibile determinare le performances per calibrare l'orario.

In OpenTrack© è anche possibile inserire le distribuzioni di probabilità relative al ritardo imputabile alle soste e a quello in partenza, per le varie corse.

---

## B.4 La simulazione

La simulazione adottata da OpenTrack<sup>©</sup> è di tipo misto, considera cioè sia le variabili continue (p.e. marcia del treno) sia le variabili discrete (p.e. stato dei segnali).

Dalla formula di Newton, si ha:

$$F = m * a$$

ove  $m$  è la massa;  $a$  è l'accelerazione.

Nel momento in cui il treno deve accelerare, la forza da trasmettere alle ruote deve essere maggiore delle resistenze; la differenza tra sforzo di trazione  $T(v)$  (determinato dalla curva di trazione del veicolo) e le resistenze  $R(v)$  è il surplus di forza  $F(v)$  che può essere utilizzato per variare il moto del veicolo:

$$F(v) = T(v) - R(v)$$

Se, al limite, tutto il surplus di forza è impiegato per accelerare il treno (caso in cui si ottiene il massimo rapporto di accelerazione ammissibile e quindi la resistenza di inerzia è uguale al surplus disponibile) si ottiene:

$$a = \frac{F(v)}{m * (1 + 0,01 * p)}$$

ove  $p$  è un fattore incrementale dovuto alle masse rotanti.

L'accelerazione massima possibile è funzione, quindi, delle caratteristiche del tracciato, della locomotiva e della massa delle carrozze/carri.

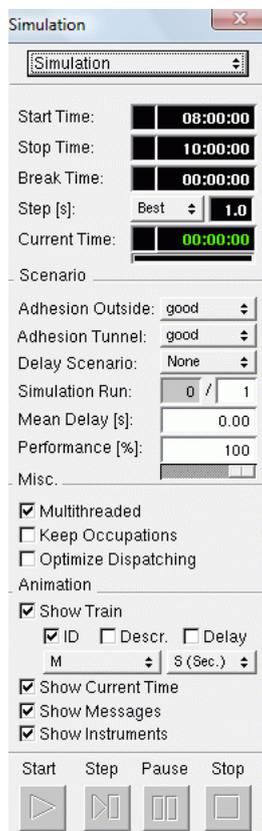
Per quello che riguarda la fase di frenatura, il software considera sia le caratteristiche dinamiche del treno sia il comportamento del macchinista e utilizza una modellizzazione semplificata che si basa sulla divisione della fase di frenatura in più sottofasi, con decelerazioni man mano decrescenti al diminuire della velocità; la curva di frenatura è calcolata così a ritroso rispetto al punto in cui il treno si deve fermare o in cui deve aver raggiunto una velocità di marcia minore.

La simulazione viene avviata tramite la finestra di dialogo “*Simulation*” riportata in Figura B.8, specificando l'orario di inizio e fine, il numero di giorni consecutivi che si desidera simulare, la velocità di scorrimento del tempo, le condizioni di aderenza, gli scenari di ritardo e la percentuale di performance, che si applica a tutte le corse in maniera aggiuntiva rispetto alla percentuale già decisa durante la definizione delle singole corse.

Durante la simulazione è possibile assistere all'animazione: i treni si muovono lungo gli archi e i nodi; effettuano le fermate; gli incroci e i segnali cambiano aspetto. E' possibile osservare, anche, alcune immagini nelle quali si vedono i treni (rettangoli grigi con scritto il numero e l'eventuale ritardo) e gli archi di diverso colore: quelli grigi

sono liberi, quelli verdi rappresentano le sezioni di blocco occupate, quelli rossi gli archi su cui si trova il treno.

Figura B.8 - Finestra *Simulation*.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack©.

## B.5 Output

Al termine di ogni simulazione vengono generati dal software numerosi output, sia di tipo grafico sia di tipo numerico. In particolare, possono essere visualizzati e memorizzati i diagrammi di marcia (grafici e tabelle), i ritardi, gli orari grafici (reali e simulati) relativi a ogni singolo treno così come l'occupazione dei binari di stazione.

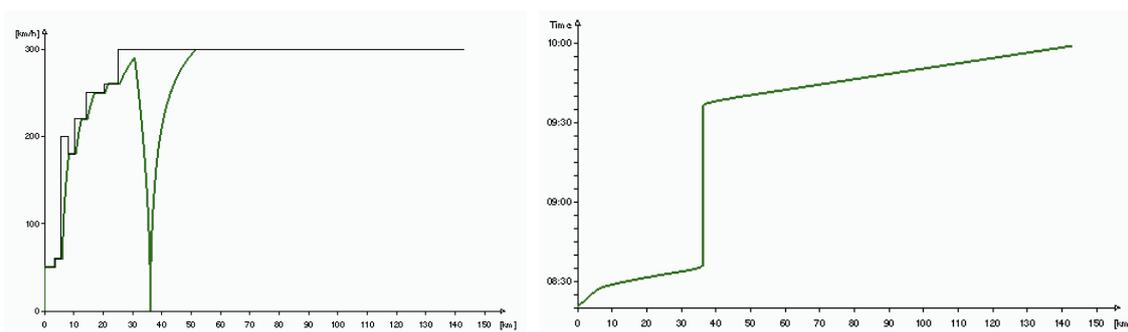
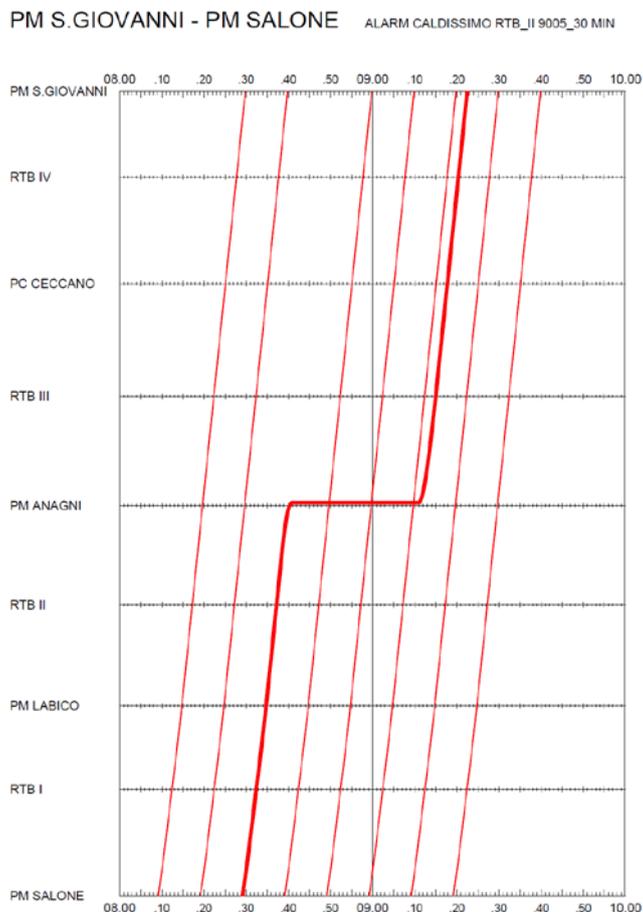
Il Diagramma spazio – velocità rappresenta l'andamento della velocità lungo il percorso ovvero in funzione della distanza percorsa (Figura B.9).

L'Orario grafico è un diagramma spazio – tempo in cui sono riportate le tracce teoriche e simulate di tutti i treni. Le linee tratteggiate rappresentano l'orario teorico, mentre le linee continue rappresentano l'orario simulato.

I dati di output sono generati e memorizzati in appositi file. L'uso dei risultati, ottenuti da ogni simulazione, relativi, ad esempio, ai ritardi (medie, valori massimi), ai tempi di percorrenza in funzione dei tempi di sosta, ecc., permettono di effettuare analisi successive di varia natura (p.e. analisi sulla qualità dei servizi).

Anche i valori relativi alle velocità di percorrenza, alle accelerazioni e decelerazioni, alle distanze percorse, allo sforzo di trazione impegnato, al consumo di energia, ecc., sono memorizzati in apposite file che possono essere facilmente interpellati per analisi di vario tipo (p.e. individuazione dei punti critici dell'infrastruttura).

Figura B.9 - Esempi di output grafico – Orario grafico e Diagramma spazio-velocità.



Fonte: Caso di studio elaborato con il software OpenTrack©.