

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Infrastrutture e Sistemi di Trasporto



**Politecnico
di Torino**

SIMULAZIONE DI ESERCIZIO FERROVIARIO SU LINEE A SINGOLO BINARIO: ANALISI E PROPOSTE RELATIVE AL CASO DELLA CHIVASSO – IVREA

Relatore: *Prof. Ing. Bruno Dalla Chiara*

Relatore esterno: *Ing. Valerio Operti (R.F.I.)*

Candidato: *Marco Velardi*

Dicembre 2021

Sommario

Obiettivo di questa tesi di laurea magistrale è, innanzi tutto, analizzare come viene utilizzata la linea ferroviaria Chivasso – Ivrea, al fine di individuare soluzioni che possano migliorare il servizio sotto molteplici punti di vista: riduzione dei tempi di percorrenza, ottimizzazione degli incroci, rinnovamento parziale del parco rotabile, aumento di capacità, stabilità dell'orario, eliminazione di alcuni passaggi a livello. Inoltre, ritenendo di fondamentale importanza le attività di manutenzione ordinaria dell'infrastruttura, si contemplano opportuni intervalli diurni, oltre che notturni di base, privi di circolazione.

La tesi risulta articolata su tre macro-tematiche.

Nella prima parte si fornisce un breve stato dell'arte su come tematiche similari a quelle della tesi vengono trattate in letteratura e s'introducono i concetti teorici che descrivono il sistema ferroviario nonché funzionali al proseguo della trattazione, con particolare attenzione ai richiami su capacità della linea e programmazione di un servizio ferroviario.

La seconda parte verte sull'utilizzo del software OpenTrack per la simulazione dei differenti scenari di esercizio proposti al fine di migliorare il servizio ferroviario esistente. Si richiamano i dati necessari in input e si esaminano nel dettaglio i dati di output, funzione delle scelte progettuali operate in fase iniziale (ad es., raddoppi selettivi lungo la linea, aumento del rango e della relativa velocità, sostituzione dei vecchi convogli); si espongono di conseguenza i diversi scenari analizzati, senza discriminarne uno rispetto ad un altro.

Nella terza ed ultima parte si confrontano le proposte di intervento avanzate nel corso degli anni e si fornisce una disamina della loro fattibilità nei limiti degli obiettivi della tesi. Inoltre, a conclusione della trattazione vengono confrontati tra loro i diversi risultati ottenuti dalle precedenti simulazioni, in modo da evidenziare in maniera sintetica ed univoca quale sia la scelta progettuale ottimale - in termini di fattibilità dell'intervento, del miglior apporto di benefici alla circolazione, dell'ottimizzazione delle risorse disponibili, ecc... - dato il contesto di analisi.

Abstract

The aim of this master's thesis is, first of all, to analyze how the Chivasso - Ivrea railway line is used, in order to identify solutions that can improve the service under multiple points of view: reduction of travel times, optimization of intersections, partial renewal of the rolling stock, increase in capacity, stability of the timetable, elimination of some level crossings. Furthermore, considering the ordinary maintenance activities of fundamental importance infrastructure, appropriate daytime intervals are envisaged, as well as basic nocturnal, free of circulation.

The thesis is divided into three macro-themes.

The first part provides a brief state of the art on how thematic similar to those of the thesis are dealt with in the literature and are introduced the theoretical concepts that describe the railway system as well as functional to the continuation of the discussion, with particular attention to the references on line capacity and scheduling of a railway service.

The second part focuses on the use of the OpenTrack software for the simulation of the different operation scenarios proposed in order to improve the existing rail service. The necessary data are recalled: input and output data are examined into detail, as a function of design choices made at an early stage (e.g., selective doubling along the line, increase in rank and related speed, replacement old convoys); the different scenarios are presented accordingly analyzed, without discriminating one over another.

In the third and last part, the proposals for interventions are compared - advanced over the years - and a review of their feasibility is provided within the limits of the objectives of the thesis. Besides, in conclusion the different results obtained are compared with each other from the previous simulations, in order to highlight in a synthetic and unambiguous way which is the optimal design choice - in terms of feasibility of the intervention, of the best contribution of benefits to operations, optimisation of available resources, etc ... - given the context of analyses.

Sommario

1.	PREMESSA	13
2.	INTRODUZIONE	14
2.1	L'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA	14
3.	GLI APPARECCHI DEL BINARIO	17
3.1	CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E DESIGNAZIONE DEI DEVIATOI IN R.F.I.	18
3.2	DINAMICA DI MARCIA SUI DEVIATOI.....	19
4.	LA LINEA FERROVIARIA: ASPETTI TECNICI E DINAMICA DI MARCIA DEI CONVOGLI	21
4.1	LA MARCIA DEI CONVOGLI	21
4.1.1	ALTIMETRIA DEL TRACCIATO	22
4.1.2	PLANIMETRIA DEL TRACCIATO	23
4.2	RANGHI DI CIRCOLAZIONE.....	27
4.3	RESISTENZE AL MOTO	30
4.4	SFORZO MOTORE – RESISTENZE AL MOTO	32
4.5	IL SISTEMA FRENANTE DEI CONVOGLI.....	33
4.6	ASPETTI TECNICI DELLE LINEE.....	34
5.	SEGNALAMENTO, REGIMI DI CIRCOLAZIONE E SISTEMI DI ESERCIZIO DELLE LINEE	36
5.1	IL SEGNALAMENTO FERROVIARIO.....	36
5.1.1	SEGNALI FISSI LUMINOSI	37
5.2	REGIMI DI CIRCOLAZIONE.....	40
5.2.1	BLOCCO ELETTRICO CONTA-ASSI.....	41
5.2.2	BLOCCO ELETTRICO AUTOMATICO	42
5.2.3	BLOCCO RADIO	42
6.	POTENZIALITA' DELLE LINEE E CAPACITA' DEI NODI.....	43
6.1	LA POTENZIALITA' DELLE LINEE	44
6.1.1	IL METODO UIC PER IL CALCOLO DELLA POTENZIALITA' DELLE LINEE	48
6.2	LA CAPACITA' DEI NODI	52
6.2.1	METODI SINTETICI COMBINATORI E PROBABILISTICI	53
6.2.2	METODI ANALITICI DESCRITTIVI	53
6.2.3	METODI DI SATURAZIONE (compattazione delle tracce)	54
6.2.4	METODI DI SIMULAZIONE.....	54

6.2.5	METODOLOGIE PER IL CALCOLO DEL NUMERO MEDIO DI CIRCOLAZIONI.....	55
7.	GESTIONE DEI PASSAGGI A LIVELLO LUNGO L'INFRASTRUTTURA.....	63
8.	LA LINEA FERROVIARIA CHIVASSO-IVREA.....	65
8.1	CARATTERISTICHE TECNICHE E TRAFFICO	66
8.2	UTILIZZO E CRITICITA' DELLA LINEA.....	70
8.3	RISCONTRO CON LA LETTERATURA SCIENTIFICA.....	74
9.	IL SOFTWARE OPENTRACK	77
9.1	INPUT DATA.....	78
9.2	SIMULAZIONE.....	82
9.3	OUTPUT	84
9.4	ULTERIORI SPECIFICHE E IMPOSTAZIONI	85
10.	SIMULAZIONE DEGLI SCENARI	88
10.1	SCENARIO 0; ATTUALE ESERCIZIO DELLA LINEA	89
10.2	SCENARIO 1; ATTUALE ESERCIZIO DELLA LINEA CON PRESENZA DI RITARDI ED EVENTI ACCIDENTALI.....	91
10.3	SCENARIO 2; ATTUALE GESTIONE DELLA LINEA E CONDIZIONI SCADENTI DI ADERENZA.....	95
10.4	SCENARIO 3; POSSIBILITA' DI EFFETTUARE INCROCI CONTEMPORANEI.....	96
10.5	SCENARIO 4; POSSIBILITA' DI EFFETTUARE INCROCI CONTEMPORANEI E SOSTITUZIONE DEI CONVOGLI E.464 CON ETR421.....	100
10.6	SCENARIO 5; RADDOPPIO SELETTIVO	102
10.7	SCENARIO 6; RADDOPPIO SELETTIVO E SOSTITUZIONE DEI CONVOGLI E.464 CON ETR421	107
10.8	SCENARIO 7; RADDOPPIO SELETTIVO CON PRESENZA DI RITARDI ED EVENTI ACCIDENTALI	110
10.9	SCENARIO 8; RADDOPPIO SELETTIVO E CONDIZIONI SCADENTI DI ADERENZA ...	111
10.10	SCENARIO 9; RADDOPPIO COMPLETO, SOSTITUZIONE DEI CONVOGLI E.464 CON ETR421 E APERTURA DEL BINARIO IV DI IVREA	112
10.11	NOTE RIASSUNTIVE	120
11.	ULTERIORI PROPOSTE	125
12.	CONCLUSIONI.....	129
13.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	132
13.1	BIBLIOGRAFIA.....	132
13.2	SITOGRAFIA	133

Indice delle figure

<i>Figura 1 - Schema generale di infrastruttura ferroviaria</i>	15
<i>Figura 2 - Infrastruttura flessibile e rigida</i>	15
<i>Figura 3 - Sezione tipologica di infrastruttura ferroviaria</i>	16
<i>Figura 4 - Direzioni consentite per uno scambio semplice</i>	17
<i>Figura 5 - Direzioni consentite per un'intersezione</i>	17
<i>Figura 6 - Direzioni consentite per uno scambio intersezione doppio</i>	18
<i>Figura 7 - Schema di deviatoio con illustrata la tangente dell'angolo tra il ramo principale e quello secondario</i>	18
<i>Figura 8 - Schema di sala montata</i>	22
<i>Figura 9 - Sopraelevazione e scartamento del binario</i>	23
<i>Figura 10 - Schema di equilibrio delle forze</i>	24
<i>Figura 11 - Resistenza specifica in curva da tabelle di R.F.I.</i>	31
<i>Figura 12 - Resistenze aggiuntive da galleria</i>	32
<i>Figura 13 - Curve di sforzo motore e resistenze al moto</i>	32
<i>Figura 14 - Fasi del moto di un convoglio</i>	33
<i>Figura 15 - In alto un esempio di segnale di prima categoria, in basso un segnale di avviso associato ad un segnale di prima categoria</i>	37
<i>Figura 16 - Avviso di via impedita con successivo segnale di prima categoria disposto a via impedita</i>	38
<i>Figura 17 - Avviso di via libera con riduzione di velocità. Il segnale di prima categoria risulta essere a luci sovrapposte</i>	39
<i>Figura 18 - Principio di distanziamento. Il treno 2 non vede il segnale di via libera in quanto il treno 1 sta occupando la sezione di blocco a valle</i>	40
<i>Figura 19 - Principio di distanziamento. Il treno 2 adesso ha il segnale di partenza disposto a via libera in quanto il treno 1 è giunto nella stazione successiva</i>	40
<i>Figura 20 - Schema di blocco elettrico conta-assi</i>	41
<i>Figura 21 - Schema di blocco elettrico automatico</i>	42
<i>Figura 22 - Distanza minima tra due treni</i>	45
<i>Figura 23 - Andamento della potenzialità in funzione della velocità</i>	46
<i>Figura 24 - Distanziamento con sezioni di blocco</i>	47
<i>Figura 25 - Distanziamento metodo FICHE</i>	49
<i>Figura 26 - Schema di orario grafico per circolazione omotachica</i>	50
<i>Figura 27 - Schema di orario grafico per circolazione eterotachica. In giallo le finestre temporali libere</i>	51
<i>Figura 28 - Piano schematico con relativa matrice degli itinerari</i>	56
<i>Figura 29 - Esempio di matrice $n_i n_j$</i>	57
<i>Figura 30 - Schema di matrici degli itinerari di primo e secondo ordine e albero delle soluzioni di circolazione</i>	58
<i>Figura 31 - Schematizzazione della stazione di Ivrea</i>	59
<i>Figura 32 - Distanze previste da R.F.I. per protezione dei p.l. automatici</i>	64
<i>Figura 33 - Estratto del profilo plano-altimetrico nei pressi della stazione di Caluso</i>	67
<i>Figura 34 - Elettrotreno BTR 813</i>	68
<i>Figura 35 - Elettrotreno ALe501</i>	68
<i>Figura 36 - Locomotiva FS E.464</i>	69

<i>Figura 37 - Estratto dell'orario grafico sulla linea Chivasso-Aosta</i>	<i>70</i>
<i>Figura 38 - Schema illustrante il funzionamento del software OpenTrack</i>	<i>78</i>
<i>Figura 39 - Estratto integrazione tabellare BTR813</i>	<i>79</i>
<i>Figura 40 - Estratto di rappresentazione dell'infrastruttura</i>	<i>80</i>
<i>Figura 41 - Visualizzazione grafica di molteplici safety elements</i>	<i>81</i>
<i>Figura 42 - Estratto di orari programmati</i>	<i>81</i>
<i>Figura 43 - Esempio di modellizzazione della frenatura per una determinata locomotiva</i>	<i>83</i>
<i>Figura 44 - Operazioni logiche che segue OpenTrack per riservare un segmento di tracciato</i>	<i>84</i>
<i>Figura 45 - Finestra per scegliere gli output da visualizzare a seguito della simulazione</i>	<i>85</i>
<i>Figura 46 - Esempio di "route"</i>	<i>86</i>
<i>Figura 47 - Esempio di definizione di una course.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 48 - Estratto orario effettivo in seguito a rottura di rotaia.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 49 - Profilo di velocità del convoglio 2721 a causa del rallentamento.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 50 - Confronto tra orario teorico ed orario simulato</i>	<i>99</i>
<i>Figura 51 - Curva meccanica di trazione del convoglio ETR421.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 52 – Composizione del convoglio ETR421.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 53 - Estratto nuovo orario grafico a seguito di raddoppio selettivo</i>	<i>105</i>
<i>Figura 54 - Diagramma Velocità-Spazio dell'ETR421, corsa 2702</i>	<i>109</i>
<i>Figura 55 - Diagramma Velocità-Spazio del E.464, corsa 2702</i>	<i>109</i>
<i>Figura 56 - Diagramma Velocità-Spazio, corsa 2717, convoglio ETR421.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 57 - In rosso il tratto di binario interessato da minor velocità di percorrenza</i>	<i>112</i>
<i>Figura 58 - Identificazione binario IV di Ivrea ed aree annesse</i>	<i>114</i>
<i>Figura 59 - Nuovo diagramma Velocità-Spazio del ETR421, corsa 2717</i>	<i>117</i>
<i>Figura 60 – Estratto del nuovo orario grafico. Si possono notare i due intervalli manutentivi ricadenti nella finestra temporale che va dalle ore 09:00 alle ore 12:00.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 61 - Orario grafico completo a seguito di raddoppio totale di binario</i>	<i>118</i>
<i>Figura 62 - Schema "lunetta" di Chivasso.....</i>	<i>126</i>

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1 - Deviatori utilizzati sull'infrastruttura nazionale</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 2 - Matrice delle incompatibilità/itinerari.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabella 3 - Tempo medio di occupazione e numero di treni/giorno per ogni itinerario</i>	<i>60</i>
<i>Tabella 4 - Matrice dei Tempi.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabella 5 - Matrice dei ritardi.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabella 6 - Riepilogo dei risultati</i>	<i>62</i>
<i>Tabella 7 - Treni del mattino diretti a Torino Porta Nuova.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabella 8 - Treni del pomeriggio/sera diretti ad Ivrea</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 9 – Orari riferiti alle nuove corse introdotte</i>	<i>116</i>
<i>Tabella 10 - Riassunto e confronto tra i differenti scenari</i>	<i>123</i>

1. PREMESSA

Praticamente ognuno di noi nell'arco della sua carriera studentesca, lavorativa o più in generale durante la propria vita, si è ritrovato a prendere il treno la mattina e recarsi nel rispettivo luogo di interesse. Lo stesso è capitato anche a me quando frequentavo i corsi del Politecnico di Torino e ricordo ancora che percepivo il sistema ferroviario come qualcosa di obsoleto, ormai lontano dalla realtà tecnologica che ci circonda. Magari non avevo tutti i torti, eppure nel momento in cui mi sono ritrovato all'interno del mondo ferroviario ho iniziato a capire che la mia visione presentava diverse imprecisioni e increspature.

Il sistema ferroviario nel suo complesso non è qualcosa di semplice o facilmente gestibile e programmabile, ma vede l'unione e la sinergia di diversi settori quali armamento, impianti di sicurezza e segnalamento, trazione elettrica, gestione della circolazione, direzione acquisti e molti altri ancora.

Ecco allora che sono giunto ad una conclusione: perché non unire ciò che mi aspettavo da utente utilizzatore del servizio ferroviario con le conoscenze teoriche acquisite durante il mio percorso accademico ed il riscontro pratico di ciò che ho appreso e sto apprendendo direttamente sul campo grazie al lavoro che svolgo presso R.F.I. ?

La risposta non poteva che essere affermativa e proprio per questo motivo mi sono dedicato ad analizzare e proporre nuove idee di esercizio sulla linea ferroviaria Chivasso – Ivrea.

Il lavoro che verrà esposto nelle pagine successive non vuole mirare a stravolgere il layout dell'attuale tracciato ferroviario, ma al tempo stesso mira ad “ammodernare” e razionalizzare la linea stessa sotto molteplici aspetti. Si terranno dunque in considerazione: le fattibilità tecniche, economiche e costruttive, le richieste dei viaggiatori, gli spazi dedicati alla manutenzione dell'infrastruttura ai fini della sicurezza ferroviaria, le norme ed i regimi di circolazione, il parco rotabile, vecchie proposte avanzate da altri enti nel corso degli anni e laddove possibile, soluzioni innovative con comprovata affidabilità operativa.

2. INTRODUZIONE

Come evidenziato nel capitolo precedente lo scopo di tale tesi è unire molteplici punti di vista (progettista, utilizzatore, manutentore, regolatore della circolazione) al fine di generare un modello finale che tenga conto proprio di tutte queste peculiarità. Il compito non è di certo semplice, ma si tenterà quanto meno di razionalizzare ogni singolo aspetto elementare, trovarne una soluzione realmente applicabile, far interagire tra loro tutti i singoli aspetti e generare un modello o soluzione che inglobi il tutto lavorando come sistema.

A tale scopo è stata individuata la linea ferroviaria Chivasso – Ivrea, della quale si parlerà con maggior dettaglio nei capitoli successivi.

Per poter comprendere appieno gli aspetti che verranno trattati di seguito si preferisce spendere qualche parola per richiamare concetti di letteratura del sistema ferroviario.

2.1 L'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA

In generale l'infrastruttura ferroviaria è costituita da due macro-elementi:

- 1) corpo stradale; è l'insieme delle opere civili, d'arte, di difesa, protezione, confine e di integrazione tra l'ambiente esterno e la circolazione ferroviaria. È la base di supporto della sovrastruttura ed ha il compito di distribuire ed attutire i carichi verticali indotti dalla circolazione.
- 2) sovrastruttura ferroviaria; fisicamente collocata al di sopra del corpo stradale. Di essa ne fanno parte la massicciata, le traverse con i loro attacchi e le rotaie. Si definisce inoltre armamento il complesso di traverse, organi di attacco e rotaie.

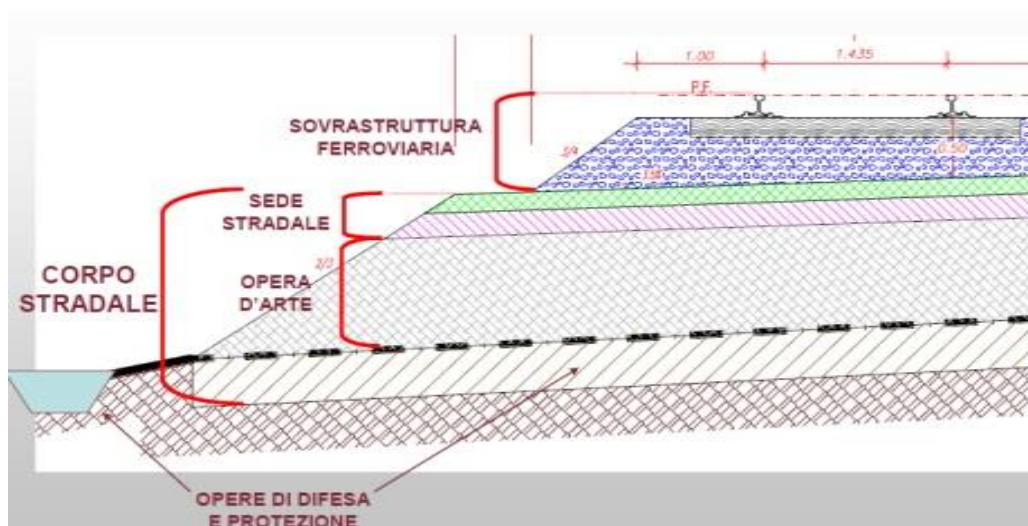


Figura 1 - Schema generale di infrastruttura ferroviaria

Il sistema infrastruttura, inoltre a seconda della tipologia di materiali che formano i vari strati, può essere suddiviso in flessibile e rigido. Il primo, impiegato in percentuali maggiori sulla rete nazionale, al di sotto dello strato di ballast (massicciata) prevede un layer denominato “subballast” composto da materiale ghiaioso compattato ed eventualmente legato con miscele bituminose. Il secondo invece prevede la sostituzione della massicciata con una lastra di calcestruzzo a sua volta sorretta da uno strato di ballast legato.

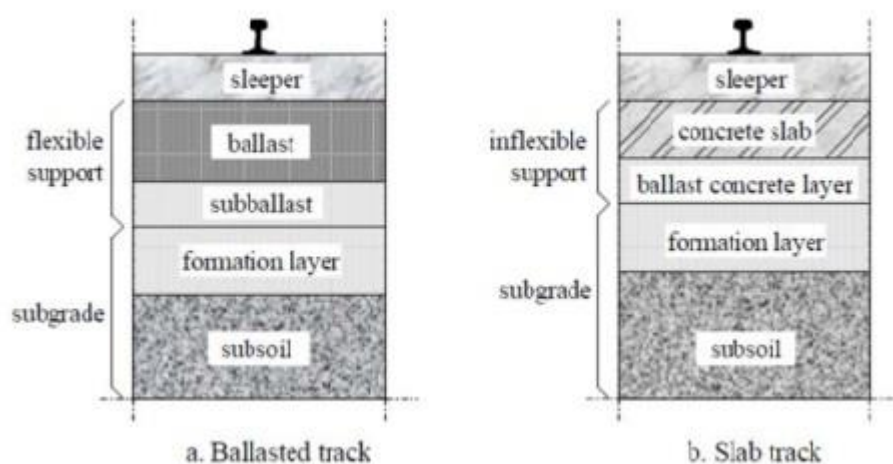


Figura 2 - Infrastruttura flessibile e rigida

Si ritiene lecito inserire in una terza immagine, una sezione tipo, con lo scopo di illustrare graficamente e sinteticamente le principali definizioni che si hanno in

ambito infrastrutturale e alcune grandezze caratteristiche inerenti la sagoma delle scarpate.

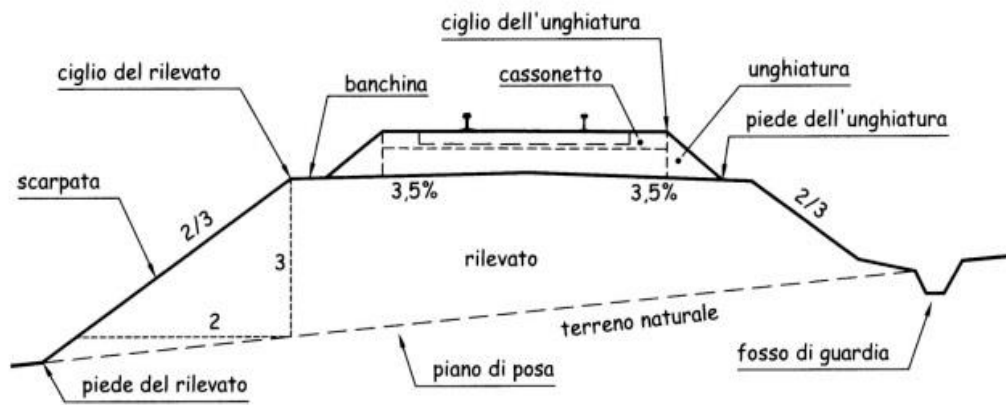


Figura 3 - Sezione tipologica di infrastruttura ferroviaria

3. GLI APPARECCHI DEL BINARIO

Sebbene facciano parte dell'armamento ferroviario si è preferito dedicare ai deviatori un capitolo a parte, considerata la loro notevole importanza. Essi sono dispositivi del binario che consentono ai mezzi circolanti di passare da un binario ad un altro, oppure permettono intersezioni tra binari.

Fondamentalmente gli apparecchi del binario possono suddividersi in tre grandi categorie;

- a) deviatori semplici o multipli; consentono di passare dal tracciato principale (ramo principale) ad uno o più tracciati secondari (rami devianti).

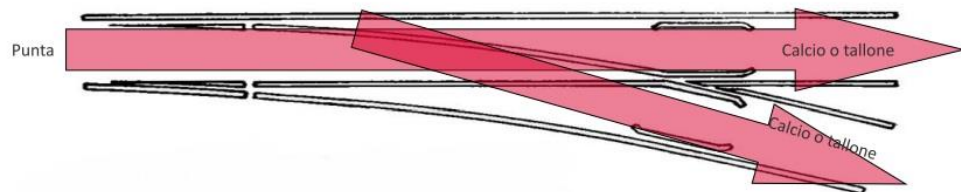


Figura 4 - Direzioni consentite per uno scambio semplice

- b) intersezioni; in questa tipologia si ha l'intersezione a raso di due tracciati differenti, senza possibilità di cambiare itinerario da parte del convoglio.

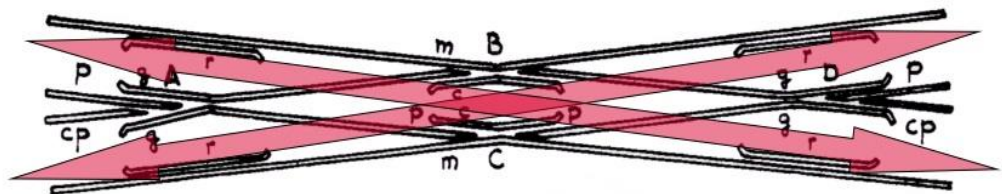


Figura 5 - Direzioni consentite per un'intersezione

- c) scambi intersezioni; sono l'unione tra intersezioni e scambi semplici. Consentono molteplici instradamenti e di norma vengono utilizzati nei piazzali per ridurre gli spazi di occupazione del deviatore stesso, ma senza precludere diversi itinerari. Risultano pertanto gli apparecchi del binario che richiedono una maggiore manutenzione.

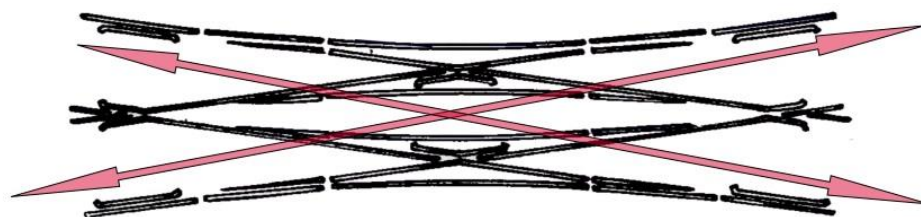


Figura 6 - Direzioni consentite per uno scambio intersezione doppio

Gli apparecchi del binario devono rispondere ad alcuni requisiti quali:

- imporre restrizioni di velocità il minore possibile
- sostenere il carico assiale dei convogli
- economicità negli interventi di manutenzione

3.1 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E DESIGNAZIONE DEI DEVIATOI IN R.F.I.

Ciò che contraddistingue un deviatoio da un altro sono le sue caratteristiche geometriche. I parametri principali di costruzione sono riassunti come segue:

- raggio di curvatura*; è il raggio di curvatura del ramo deviato, il quale limita la velocità di percorrenza sullo stesso.
- tangente*; intesa come la tangente dell'angolo α (Figura 7) formato dagli assi dei due rami del deviatoio. A parità di raggio, potranno esistere deviatoi con tangenti differenti.

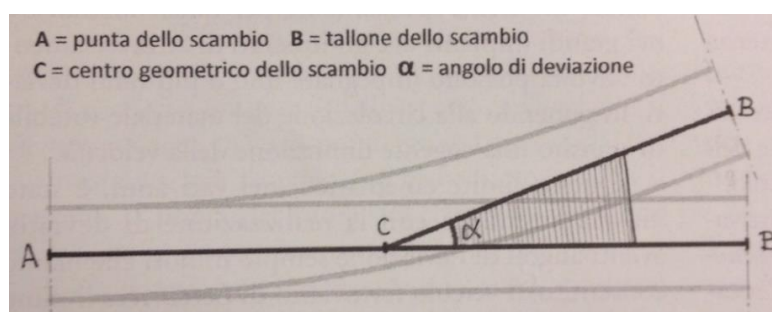


Figura 7 - Schema di deviatoio con illustrata la tangente dell'angolo tra il ramo principale e quello secondario

- armamento*; identifica il tipo di acciaio e profilo utilizzati

A questo punto è possibile introdurre la designazione dei deviatori utilizzata presso R.F.I. Essa definisce in maniera univoca la tipologia di apparecchio del binario, il suo raggio di curvatura, la tangente, l'armamento e la posa:

S.60 UNI/250/0.092/d

S.60UNI → identifica l'armamento e quindi il profilo delle rotaie utilizzato, inoltre la lettera "S" significa che si tratta di uno scambio semplice. Qualora si avessero delle intersezioni comparirebbe la lettera "I", mentre per scambi intersezione "SI".
250 → è il valore espresso in metri del raggio di curvatura del ramo deviato.

0.092 → è il valore della tangente.

d → indica che il deviatoio è destro, ovvero che osservato dalla punta degli aghi, verso il calcio, il ramo deviato gira a destra. Nel caso di deviatoio sinistro vi sarebbe stata la lettera "s".

3.2 DINAMICA DI MARCIA SUI DEVIATOI

Compresa la funzionalità degli apparecchi del binario, si vuole comprendere quale sia la dinamica di marcia dei convogli su di essi.

Obiettivo fondamentale è quello di mantenere la più elevata velocità possibile, in modo da ridurre i tempi di percorrenza e garantire un servizio efficace. Tutto ciò può essere rispettato quando il convoglio percorre il ramo principale di un deviatoio, in quanto naturale prosecuzione del binario di corsa. Quando invece un convoglio si trova a percorrere il ramo deviato dovrà ridurre la propria velocità in maniera da evitare lo svio e garantire un livello accettabile di comfort per i passeggeri.

A differenza dei binari, i deviatori (esclusi quelli delle linee AV) sono in piano, ovvero non presentano l'inclinazione di 1/20. Ciò significa che l'accelerazione centrifuga non compensata è totalmente assorbita dal convoglio, quindi dai passeggeri presenti a bordo. Proprio per garantire un adeguato livello di comfort

ed evitare svii, il gestore dell'infrastruttura impone un valore di accelerazione non compensata pari a $0.65 [m/s^2]$.

Siccome l'accelerazione può essere espressa come:

$$a_{nc} = \frac{V^2}{R}$$

la velocità di percorrenza del ramo deviato è ottenuta tramite formula inversa, sostituendo il valore di 0.65 per l'accelerazione e ricordando che la velocità è espressa in $[km/h]$ (pertanto introducendo anche il fattore di conversione di unità di misura pari a 3.6) si ottiene:

$$V = 2.91\sqrt{R}$$

Con:

-R; raggio di curvatura espresso in metri

-V; velocità di percorrenza del ramo deviato espressa in $[km/h]$

Si riassumono pertanto in tabella i deviatori utilizzati in ambito nazionale.

RAGGIO DI CURVATURA [m]	ANGOLO DI USCITA	TANGENTE	TIPOLOGIA DI CUORE	VELOCITA' SUL RAMO DEVIATO [km/h]
170	6°50'34''	0.12	<i>Retto</i>	30
250	5°15'30''	0.092	<i>Retto</i>	30
250	6°50'34''	0.12	<i>Curvo</i>	30
400	4°13'46''	0.094	<i>Curvo</i>	60
400	5°21'55''	0.074	<i>Retto</i>	60
1200	2°17'26''	0.040	<i>Retto</i>	100
3000	1°15'23''	0.022	<i>Retto</i>	160
6000	0°51'26''	0.015	<i>Retto</i>	220

Tabella 1 - Deviatori utilizzati sull'infrastruttura nazionale

4. LA LINEA FERROVIARIA: ASPETTI TECNICI E DINAMICA DI MARCIA DEI CONVOGLI

A questo punto della trattazione è essenziale comprendere come le linee ferroviarie vengano classificate, quali siano gli aspetti da tenere in maggior considerazione ai fini del moto dei treni e quali interazioni vi siano tra infrastruttura e materiale rotabile. Tali aspetti infatti condizioneranno direttamente la tipologia di linea e la sua potenzialità. Solamente avendo bene a mente cosa comporti la modifica di un aspetto rispetto ad un altro si potrà infatti intervenire sull'infrastruttura in modo da migliorare il servizio offerto e al tempo stesso proporre soluzioni compatibili con quanto già costruito. Si ricorda infatti che lo scopo di tale relazione non è quello di stravolgere la linea Chivasso – Ivrea, ma ricercare soluzioni realmente applicabili, per migliorare il servizio offerto in maniera significativa.

4.1 LA MARCIA DEI CONVOGLI

Di convogli ne esistono differenti tipologie (elettrici, diesel, bimodali, a idrogeno), ma tutti si basano sullo stesso principio di moto ed interazione con la sovrastruttura ferroviaria.

Le parti che vengono in contatto durante il moto possono essere distinte, in maniera generale, in lato infrastruttura e lato convoglio. Per quanto riguarda l'infrastruttura le rotaie sono gli elementi a diretto contatto con il convoglio e presentano inclinazione di $1/20$, mentre per quanto riguarda il convoglio si considera il carrello e nello specifico la sala montata. Essa è formata da due ruote calettate rigidamente all'assale. Le ruote presentano una forma tronco conica con inclinazione di $1/20$ oltre che una lavorazione finale particolare chiamata bordino, il quale funge da fine corsa della sala rispetto lo scartamento del binario. La geometria delle ruote è imposta a causa della mancanza di differenziale, evitando così lo strisciamento del cerchione esterno in curva.

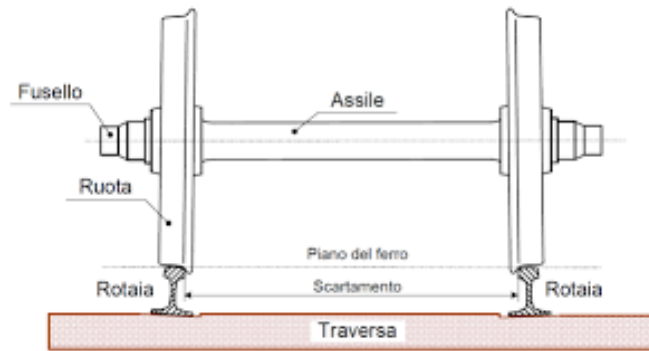


Figura 8 - Schema di sala montata

La dinamica di marcia sul tracciato ferroviario può essere separata in due macrocategorie:

- a) altimetria
- b) planimetria

4.1.1 ALTIMETRIA DEL TRACCIATO

Sul piano verticale il tracciato è composto dal susseguirsi di elementi rettilinei a pendenza costante (livellette) e curve circolari di raccordo (raccordi cilindrici). A causa della natura di contatto acciaio-acciaio fra rotaie e cerchioni le pendenze sono limitate ad un valore massimo pari a 35 ‰.

Risulta chiaro come un convoglio che si trovi su di un raccordo cilindrico subisca un'accelerazione centrifuga verso l'alto o verso il basso (a seconda della concavità dello stesso) che si aggiunge algebricamente all'accelerazione di gravità. L'espressione di tale accelerazione aggiuntiva viene quindi espressa come quota a parte dell'accelerazione di gravità:

$$\frac{V^2}{R} = \rho g$$

Dove:

-V; velocità del convoglio [km/h]

-R; raggio del raccordo cilindrico [m]

-p; quota a parte dell'accelerazione di gravità. Assunta pari a 5% nelle linee ordinarie

4.1.2 PLANIMETRIA DEL TRACCIATO

In questo caso il tracciato vede il susseguirsi di elementi rettilinei e curve circolari di raggio costante, raccordati tra loro da curve di transizione a raggio variabile. I valori dei raggi delle curve a raggio costante possono essere limitati per motivi di inserimento del tracciato nel contesto territoriale in cui si trova, ricordandosi però che i valori minimi per permettere l'iscrivibilità del veicolo in curva sono pari a 150-350 [m].

Il valore del raggio di curva è uno tra i parametri principali che caratterizzano una linea in quanto implicitamente definisce il limite superiore di velocità di circolazione, in conseguenza all'accelerazione centrifuga che ne consegue ed alla quota a parte che può essere compensata dalla componente sul piano del ferro dell'accelerazione di gravità ottenuta attraverso la sopraelevazione (h). La sopraelevazione può essere definita come la differenza di quota che sussiste tra i funghi delle due rotaie:

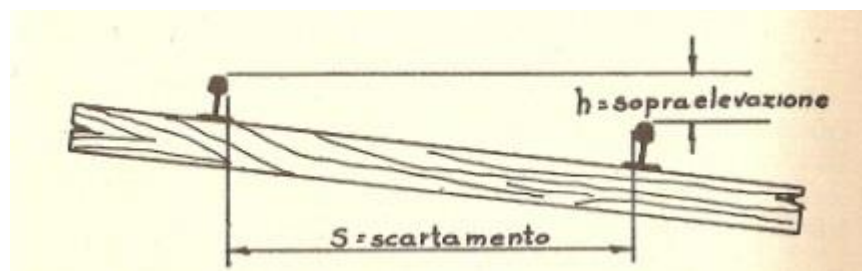


Figura 9 - Sopraelevazione e scartamento del binario

Per calcolare il valore della sopraelevazione si parte dall'espressione della forza centrifuga (F_c):

$$F_c = ma = \frac{P V^2}{g R}$$

Tale forza facilita lo svio dei rotabili, il consumo dei bordini, limita il comfort di marcia e facilita il ribaltamento verso l'esterno della curva. Se però si vuole

mantenere una determinata velocità in curva si può introdurre la sopraelevazione della corda esterna di rotaia, in modo da compensare completamente o in parte l'accelerazione che ne scaturisce.

Si impone così l'equilibrio delle forze agenti sul veicolo in curva lungo il piano del ferro, ottenendo l'equazione:

$$\frac{F_c}{P} = \frac{h}{d} \rightarrow \frac{\frac{P}{g} \frac{V^2}{R}}{P} = \frac{h}{d} \rightarrow \frac{V^2}{R} = g \frac{h}{d}$$

Dove:

-h; sopraelevazione

-d; distanza sul piano del ferro tra gli assi di simmetria del fungo delle due rotaie, pari a 1500 [mm]

-V; velocità

-R; raggio di curvatura

-g; accelerazione di gravità

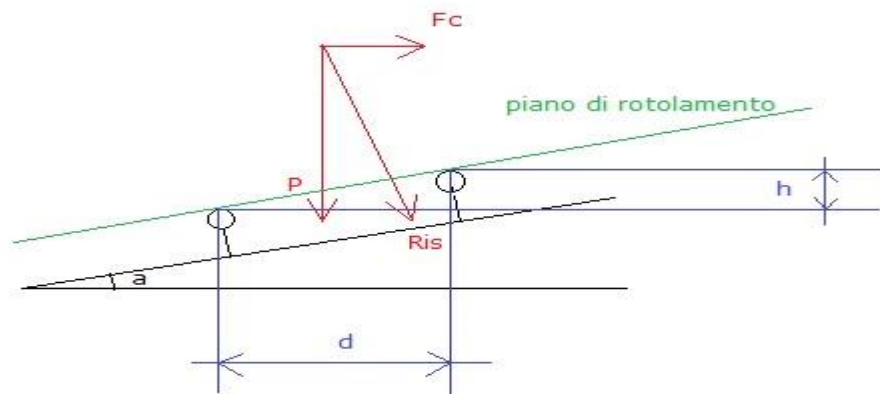


Figura 10 - Schema di equilibrio delle forze

Di conseguenza l'espressione della sopraelevazione risulta essere:

$$h = \frac{d}{g} \frac{V^2}{R} = 11.8 \frac{V^2}{R}$$

Può capitare, però, che per motivi di esercizio o logistici, su una stessa linea operino treni con diverse caratteristiche meccaniche e velocità. In questi casi si

accetta che una parte dell'accelerazione non venga compensata, continuando così ad agire una componente orizzontale sul veicolo ($a_{nc} \cdot P/g$).

Ricordando quanto ottenuto in presenza di totale compensazione ($a_{nc} = 0$), ovvero:

$$\frac{V^2}{R} = g \frac{h}{d}$$

si deduce che l'espressione dell'accelerazione non compensata risulta essere:

$$a_{nc} = \frac{V^2}{R} - g \frac{h}{d}$$

Pertanto, una quota a parte della forza centrifuga vista in precedenza non potrà essere compensata. Riscritto in termini matematici risulterà:

$$\frac{P}{g} \frac{V^2}{R} - \frac{P}{g} a_{nc} = P \frac{h}{d}$$

Dove nell'equazione appena riportata si è sostituita l'espressione dell'accelerazione non compensata.

Riportando quanto ottenuto in termini di sopraelevazione si otterranno:

$$h_j = 11.8 \frac{V_{max}^2}{R} - \frac{d}{g} a_{nc}$$

$$h_e = 11.8 \frac{V_{min}^2}{R} - \frac{d}{g} a_{nc}$$

Ovvero le espressioni della sopraelevazione senza compensare completamente l'accelerazione centripeta, rispettivamente con difetto di sopraelevazione (j) ed eccesso di sopraelevazione (e). Tale casistica si verifica ogni qualvolta una linea sia esercitata in regime eterotachico.

Fissando i valori di V_{max} , V_{min} , a_{nc} (j,e) si definisce il modello di esercizio, potendo così determinare h ed R:

$$R = \frac{\left(\frac{d}{g}\right)(V_{max}^2 V_{min}^2)}{(e + j)}$$

$$h = \frac{(e + j)V_{max}^2}{(V_{max}^2 V_{min}^2) - j} = \frac{(e + j)V_{max}^2}{(V_{max}^2 V_{min}^2) + e}$$

Scegliere un modello di esercizio è molto importante in quanto:

- le velocità di percorrenza incidono sui costi
- il difetto di sopraelevazione incide sul comfort di circolazione, sui costi di costruzione e manutenzione
- l'eccesso di sopraelevazione incide sui costi di manutenzione

I due principali modelli di esercizio in uso in Italia si possono differenziare tra rete storica e rete AV/AC e rispettivamente:

a) rete storica:

- $V_{max} = 160 [km/h]$
- $V_{min} = 80 [km/h]$
- $a_{nc} = 0.6 [m/s^2]$
- $j = 92 [mm]$
- $e = 100 [mm]$
- $h_{max} = 160 [mm]$

b) rete AV/AC:

- $V_{max} = 300 [km/h]$
- $V_{min} = 80 [km/h]$
- $a_{nc} = 0.6 [m/s^2]$
- $j = 92 [mm]$
- $e = 100 [mm]$
- $h_{max} = 106 [mm]$

Per la curva di raggio minimo si adotterà pertanto il valore massimo di sopraelevazione (h_{max}), mentre per le curve di raggio maggiore si possono adottare due criteri differenti:

a) mantenere costante l'accelerazione non compensata; $h^* = \frac{V_{max}^2 d}{gR - j_{max}}$

b) rendere l'accelerazione non compensata proporzionale alla sopraelevazione;

$$h^{**} = 7.5 \frac{V_{max}^2}{R}$$

Nella rete storica italiana, per una curva di raggio R viene fissata la sopraelevazione in modo che si abbia perfetta compensazione per una velocità pari all'80% della velocità massima.

4.2 RANGHI DI CIRCOLAZIONE

In ambito ferroviario il rango identifica una o più categorie di velocità massime raggiungibili dalle differenti categorie di treni su di un determinato tratto di linea. La velocità, pertanto non è limitata solamente dalle caratteristiche costruttive della linea, ma anche dal tipo di materiale rotabile che vi transita. Infatti, è facilmente intuibile come un treno passeggeri, a parità di velocità, generi sull'infrastruttura effetti dinamici minori rispetto ad un treno merci.

Sull'infrastruttura nazionale sono presenti quattro categorie di rango:

-Rango A; vi appartengono tutti i carri merci, vecchie carrozze passeggeri e tutte le locomotive che viaggiano isolate.

-Rango B; vi appartengono alcuni treni dedicati al trasporto passeggeri quale ad esempio le locomotive E.464 e le carrozze regionali.

-Rango C; include la maggior parte delle locomotive e delle carrozze destinate al trasporto viaggiatori, tutti gli elettrotreni articolati o bloccati (ETR) ed anche automotrici elettriche (ALe) per il trasporto regionale.

-Rango P; include tutti i treni ad assetto variabile di tipo attivo.

Come visto, ad ogni rango è associata una velocità, ovvero la velocità alla quale vengono percorse le curve di raggio minimo (R_{min}) dotate di sopraelevazione massima (h_{max}) e con valori fissati di accelerazione non compensata massima ($a_{nc,A} = 0.6 [m/s^2]$, $a_{nc,B} = 0.8 [m/s^2]$, $a_{nc,C} = 1.0 [m/s^2]$, $a_{nc,P} = 1.8 [m/s^2]$).

La velocità di rango può anche essere definita come la velocità di tracciato per ogni rango e ricordando l'espressione dell'accelerazione non compensata vista al paragrafo 4.1.2, dalla formula inversa si ottiene che:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{ghR}{d} + Ra_{nc}}$$

Sostituendo poi i termini noti per ogni rango si ottiene:

$$V_A = 4.62\sqrt{R_{min}}$$

$$V_B = 4.89\sqrt{R_{min}}$$

$$V_C = 5.15\sqrt{R_{min}}$$

$$V_P = 6.07\sqrt{R_{min}}$$

Quelle viste sono le formule per il calcolo della velocità di rango, le quali da sole risultano insufficienti a determinare quale sarà l'effettiva velocità di percorrenza dei convogli, in quanto la velocità di rango dovrà soddisfare quattro requisiti:

a) a_{nc} ; come visto i suoi valori sono limitati superiormente.

$$a_{nc,A} = 0.6 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$a_{nc,B} = 0.8 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$a_{nc,C} = 1.0 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$a_{nc,P} = 1.8 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

b) V_{max} ; impone un limite superiore di velocità per ogni rango.

$$V_A \leq 140 \left[\frac{km}{h}\right]$$

$$V_B \leq 160 \left[\frac{km}{h}\right]$$

$$V_C \leq 200 \left[\frac{km}{h} \right]$$

$$V_P \leq 250 \left[\frac{km}{h} \right]$$

c) jerk (Ψ); è la variazione nel tempo dell'accelerazione non compensata

$$\psi = \frac{da_{nc}}{dt} = \frac{va_{nc}}{3.6L}$$

Il valore limite di ogni rango risulta essere:

$$\psi_A = 0.25 \left[\frac{m}{s^3} \right]$$

$$\psi_B = 0.35 \left[\frac{m}{s^3} \right]$$

$$\psi_C = 0.40 \left[\frac{m}{s^3} \right]$$

d) rollo(ω); per definizione il rollo di qualsiasi veicolo è l'oscillazione dello stesso intorno al proprio asse longitudinale. Nel caso ferroviario si intende pertanto la velocità di rotazione che subisce la cassa quando entra in curva. In maniera del tutto generica può essere definito come:

$$\omega = \frac{hV}{3.6sL}$$

Dove s ed L indicano rispettivamente lo scartamento e la lunghezza del raccordo. Per i diversi ranghi, la velocità di rollo limite risulterà pari a:

$$\omega_A = 0.036 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega_B = 0.038 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega_C = 0.040 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

Prima di concludere il capitolo è bene ricordare che in ambito ferroviario esistono differenti velocità:

-velocità limite (V_{lim}); è la velocità alla quale si percorre una curva di raggio R con h_{max} e $a_{nc} = 0.6 [m/s^2]$.

-velocità di tracciato; è la V_{lim} per la curva con R_{min} .

-velocità di rango; velocità alla quale vengono percorse le curve di raggio minimo (R_{min}) dotate di sopraelevazione massima (h_{max}) e con valori fissati di accelerazione non compensata massima

-velocità di fiancata; può essere semplicemente espressa come
 $V_{fiancata} = \max_i(V_{rango,i})$

-velocità d'orario; quota a parte della velocità di fiancata, in modo da poter recuperare eventuali ritardi in fase di esercizio

4.3 RESISTENZE AL MOTO

Finora non si è tenuto conto delle resistenze al moto che un convoglio incontra durante la marcia. Tali resistenze possono giocare un ruolo più o meno importante a seconda del loro peso e della loro entità.

Nella maggior parte dei testi e delle pubblicazioni reperibili si può notare che le resistenze vengono suddivise in ordinarie ed addizionali: le prime fanno riferimento ad elementi che sono per così dire “permanenti”, ovvero presenti in qualsiasi momento del moto, mentre le seconde indicano quel tipo di resistenze non sempre presenti.

Seguendo tale distinzione tra resistenze si ottiene:

a) Resistenze ordinarie;

1. *resistenza al rotolamento*; dovuta al contatto ruota-rotaia ed al moto dei cuscinetti. Può essere espressa come:

$$R_{rot.} = r_o Q$$

Dove r_o è la resistenza specifica al moto, ovvero caratteristica del materiale rotabile. Pertanto, anche a velocità nulle tale resistenza è diversa da zero. Il

suo valore è espresso in ‰ e varia da 1.5 a 9. Q invece è il peso del convoglio.

2. *resistenza aerodinamica*; è proporzionale al quadrato della velocità e può essere espressa come:

$$R_{aero} = \frac{1}{2} \rho c s v^2$$

Dove ρ è la densità dell'aria, c il coefficiente di resistenza aerodinamica dipendente dalla forma del veicolo ed s l'area della proiezione della superficie investita su un piano normale alla direzione del moto.

b) Resistenze addizionali;

3. *livelletta*; in caso di salita giocherà un ruolo svantaggioso mentre in discesa favorirà il moto. A causa del contatto rigido ruota-rotaia si sviluppa poca coppia aderente e per tale motivo il valore della pendenza deve essere limitato a valori bassi, nell'ordine del ‰. Tale resistenza può essere espressa come:

$$R_i = Qi$$

4. *curva*; all'aumentare del raggio di curvatura la resistenza specifica (r_c) diminuisce, ritenendosi nulla per valori di raggio maggiori o uguali a 1000 [m]. I valori di r_c possono essere ricavati da tabelle:

R (m)	1000	900	800	700	600	500	450	400	350	300	250	200	180
r_c (kg/t)	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,4	2,8	3,4	4,2	4,5

Figura 11 - Resistenza specifica in curva da tabelle di R.F.I.

oppure per mezzo delle formule di Van Rockl:

$$r_c = f(R): r_c = \frac{a}{R-b}$$

Con a, b costanti sperimentali, funzioni dello scartamento e del raggio di curvatura.

5. *galleria*; espressa come quota a parte della resistenza aerodinamica. Infatti, in funzione della scabrezza delle pareti che rivestono il tunnel e della sezione che presenta, si avranno valori differenti.

Resistenze specifiche in rettilineo e orizzontale		
TRENO	RESISTENZA AL MOTO IN daN/t	
	all'aperto	in galleria
2 ALE 601 + Rimorchio	$0,00025 V^2 + 0,99684$	$0,00046 V^2 + 0,62017$
Locomotore + 4 Vetture	$0,00021 V^2 + 1,3845$	$0,00035 V^2 + 1,60348$
Treno DB merci	$0,00027 V^2 + 1,6952$	$0,00051 V^2 + 1,24463$
ETR 500	$0,00012 V^2 + 0,90404$	$0,00021 V^2 + 0,833$

Figura 12 - Resistenze aggiuntive da galleria

4.4 SFORZO MOTORE – RESISTENZE AL MOTO

Comprese quali siano le resistenze che entrano in gioco durante la marcia dei treni, bisogna compararle con lo sforzo motore che ciascun locomotore o elettrotreno è in grado di fornire. In questo modo è possibile capire se il convoglio possa ancora accelerare e l'entità di tale accelerazione, oppure se lo stesso non riesca nemmeno a partire, non riuscendo a vincere le resistenze iniziali. A riguardo, si consideri il grafico sforzo motore (T) – resistenze al moto (R):

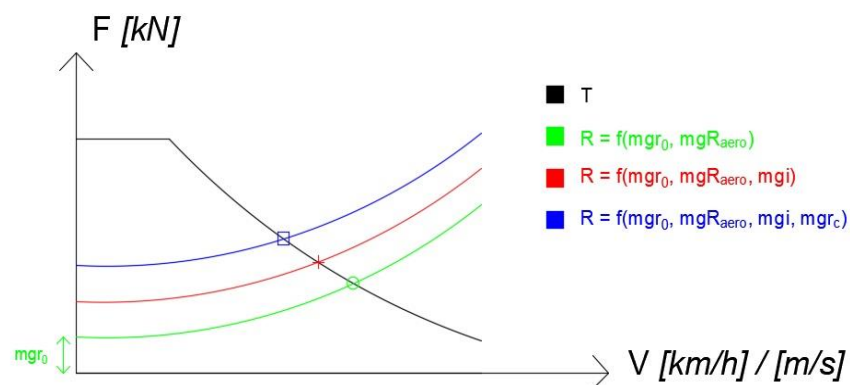


Figura 13 - Curve di sforzo motore e resistenze al moto

Per capire se un treno possa continuare ad accelerare bisogna osservare la curva di trazione (T) e confrontarla con quella delle resistenze (R). Fin tanto che $T > R$ il treno potrà accelerare e quanto più il divario risulti elevato, tanto più il convoglio riuscirà ad accelerare. Come si può notare in Figura 13 sono state rappresentate tre diverse curve di resistenza: quella verde include solamente le resistenze specifica e aerodinamica, quella rossa anche la livelletta e la blu anche la resistenza in curva. Si ottiene pertanto uno spostamento della curva di resistenza verso sinistra il che implica una riduzione in valore assoluto tra curva di trazione e di resistenza.

Un aspetto da prendere in considerazione è il fatto che oltre i punti di intersezione evidenziati in Figura 13, non significa che non possa più esistere il moto, ma un convoglio per continuare a muoversi e non rallentare non potrà fare affidamento alla sola potenza dei propri motori. Nel caso quindi di livelletta negativa questa favorirà il moto del convoglio, permettendogli di oltrepassare quel punto critico.

4.5 IL SISTEMA FRENANTE DEI CONVOGLI

Per comprendere ulteriormente la dinamica di marcia dei treni ci si focalizzi sulle fasi del moto degli stessi, osservando quanto riportato in Figura 14:

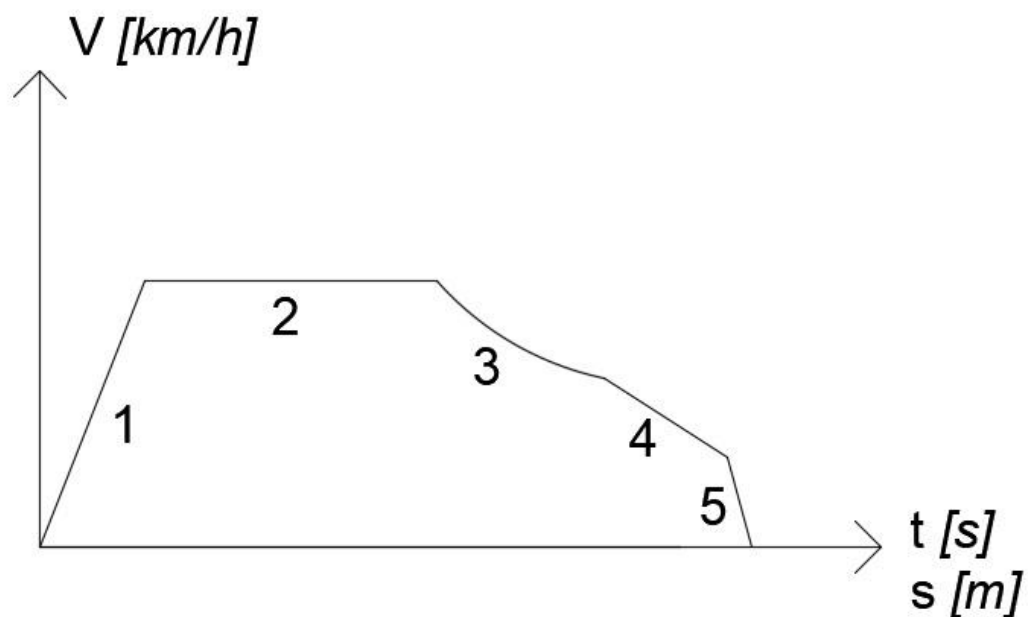


Figura 14 – Fasi del moto di un convoglio

Si possono osservare cinque istanti differenti:

- 1) Accelerazione; in questa fase il treno utilizza i propri motori e si basa sulla Figura 13, vista in precedenza, per accelerare ed arrivare alla velocità di regime.
- 2) Velocità di regime; il treno ha raggiunto la massima velocità di percorrenza sulla linea.
- 3) Lancio o coasting; il treno viaggia tramite marcia inerziale. I motori non spingono più il convoglio, il quale a causa delle resistenze al moto inizierà a decelerare.
- 4) Frenatura elettrica; è la prima frenatura “attiva” da parte del treno. Invertendo il moto dei motori elettrici a bordo si ottiene la prima parte di frenatura.
- 5) Frenatura meccanica; date le notevoli masse in gioco e le velocità elevate, il solo utilizzo di sistemi meccanici comporterebbe un eccessivo surriscaldamento dei componenti. Per questo motivo la frenatura meccanica viene utilizzata solamente nella parte finale della curva, quando ormai le velocità sono minori.

4.6 ASPETTI TECNICI DELLE LINEE

Di norma le linee vengono realizzate a resistenza di trazione costante. Ecco allora che si introduce il concetto di *resistenza fittizia* (r_{linea}):

$$r_{linea} = i + r_c$$

Ovvero pari alla somma tra la resistenza dovuta alla livelletta e quella dovuta alle curve (si hanno solo queste due componenti in quanto si sta analizzando solamente il lato infrastrutturale).

Si suddividono poi le linee in *gradi di prestazione* (1-31), dove ad ognuno corrisponde un valore di resistenza fittizia. Più basso è il grado e minor resistenza la linea oppone al moto.

Infine, ad ogni grado di prestazione è associata una massima massa rimorchiabile.
Per maggior chiarezza si schematizza quanto esposto nel seguente modo:

grado di prestazione = $f(r_{linea}) \rightarrow$ massima massa rimorchiabile

5. SEGNALAMENTO, REGIMI DI CIRCOLAZIONE E SISTEMI DI ESERCIZIO DELLE LINEE

Nel seguente capitolo saranno analizzati tutti quegli aspetti che hanno a che fare con la circolazione dei treni e che ne garantiscono il distanziamento¹. Tali concetti saranno fondamentali al fine di migliorare la capacità della linea, oltre che garantire adeguati livelli di sicurezza ai convogli che la percorrono.

Infatti, per ritenere una linea sicura non basta rispettare gli standard di armamento, ma bisogna anche ottimizzare l'utilizzo della stessa garantendo adeguati spazi (temporali) tra i convogli in modo che non si avvicinino troppo l'un l'altro, creando possibili interferenze. Infine, verrà analizzata anche la gestione dei passaggi a livello (p.l.) in quanto sede di interferenze tra mondo ferroviario ed ambiente stradale.

5.1 IL SEGNALAMENTO FERROVIARIO

A differenza dell'ambito stradale, la ferrovia è caratterizzata da notevoli masse movimentate ad alte velocità e con contatto ruota-infrastruttura considerato rigido. Inoltre, proprio la natura del contatto, da un lato permette di risparmiare in termini di energia dissipata durante il moto, dall'altro incrementa notevolmente gli spazi di frenata dei convogli. Il sistema ferroviario inoltre è un sistema a via guidata, ovvero il macchinista non decide autonomamente il percorso da intraprendere, ma seguirà quello imposto dall'infrastruttura, potendo così regolare solamente la spinta dei motori. Si può quindi intuire come la presenza di un eventuale ostacolo di qualsiasi tipologia sulla via possa scatenare eventi anche pericolosi, proprio per l'impossibilità da parte del macchinista di deviare la corsa del treno.

Per tutti i motivi sopra elencati si è quindi introdotto il segnalamento ferroviario, ovvero segnali luminosi e no, posti lungo l'infrastruttura in grado di fornire con

¹ Per chi desiderasse approfondire maggiormente l'argomento si rimanda alla lettura di due pubblicazioni di servizio di R.F.I.: "Regolamento segnali" e "Regolamento circolazione treni"

determinato anticipo le informazioni utili al macchinista per manovrare il convoglio in piena sicurezza e rispettare gli orari previsti.

5.1.1 SEGNALI FISSI LUMINOSI

In condizione di normale esercizio le informazioni vengono fornite mediante segnali fissi luminosi con un codice derivante dalla combinazione di tre colori: rosso, giallo, verde. Di regola sono installati alla sinistra del binario percorso dal treno cui comandano, ma in particolari tipi di linee sono installati anche alla destra del binario.

A loro volta i segnali luminosi si suddividono in:

- a) Segnali di prima categoria; segnali posti in precedenza al punto da proteggere, come per esempio stazioni e p.l.
- b) Segnali di avviso; posti in precedenza al segnale di prima categoria, ad una distanza tale da consentire al macchinista di rispettare le indicazioni fornite dal relativo segnale di prima categoria.

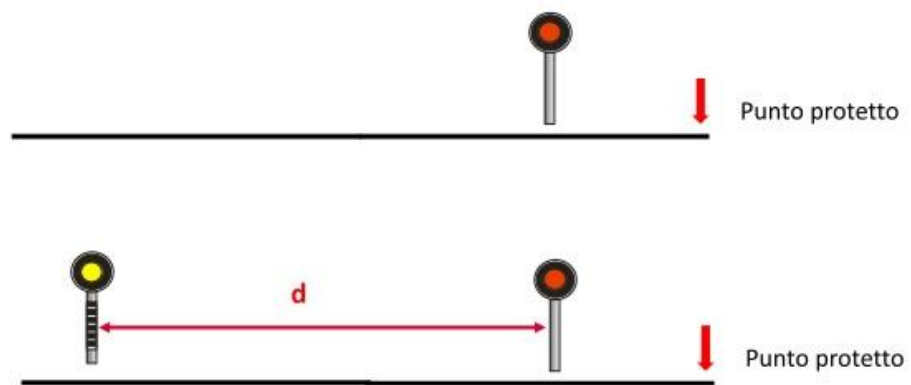


Figura 15 - In alto un esempio di segnale di prima categoria, in basso un segnale di avviso associato ad un segnale di prima categoria

I segnali di prima categoria possono assumere tre aspetti:

-segnale rosso (*via impedita*); il treno non può oltrepassare tale segnale

-*segnale verde (via libera)*; il treno può oltrepassare il segnale senza particolari limitazioni

-*a luci sovrapposte*; qualora su di uno stesso segnale vi fossero più luci e quella superiore risultasse rossa mentre quella inferiore verde. In questo caso è un via libera, ma con riduzioni di velocità

I segnali di avviso invece possono assumere i seguenti aspetti:

-*segnale giallo (avviso di via impedita)*; il successivo segnale di prima categoria è disposto a via impedita. Il macchinista potrà comunque oltrepassare il segnale, ma oltre a rispettare quello successivo dovrà portarsi ad una velocità non superiore a 30 [km/h] dal segnale stesso.

-*segnale verde (avviso di via libera)*; il successivo segnale di prima categoria è disposto a via libera.

Di seguito si riportano due esempi di segnalamento, in modo da comprendere al meglio come varia la velocità di un convoglio in base all'aspetto dei segnali che incontra.

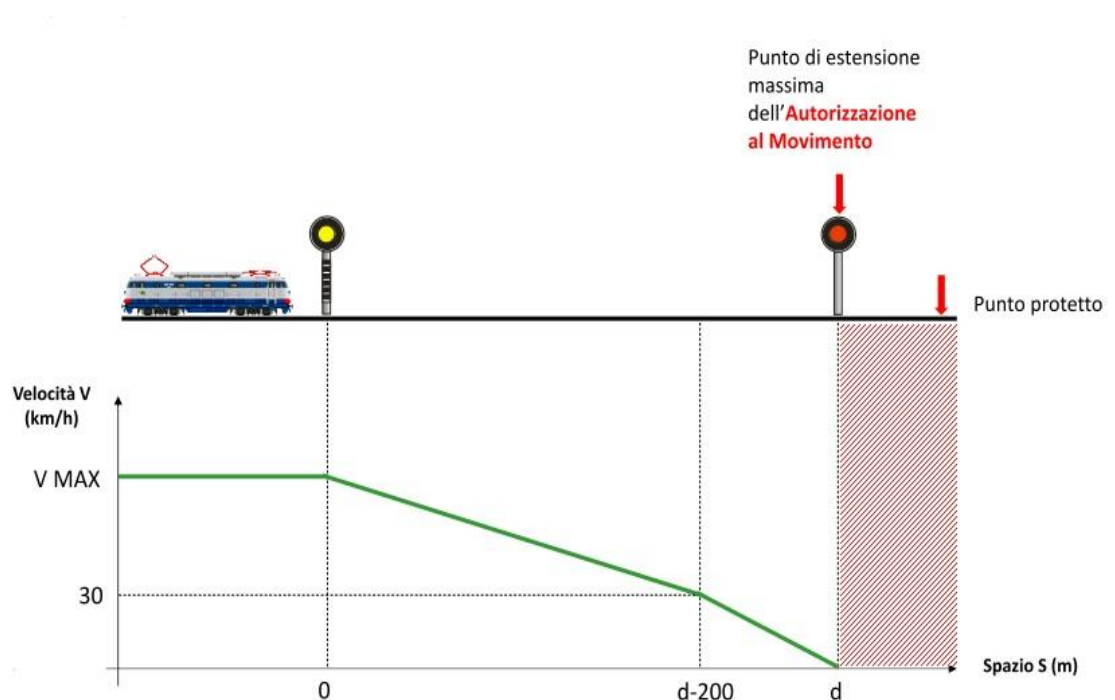


Figura 16 - Avviso di via impedita con successivo segnale di prima categoria disposto a via impedita

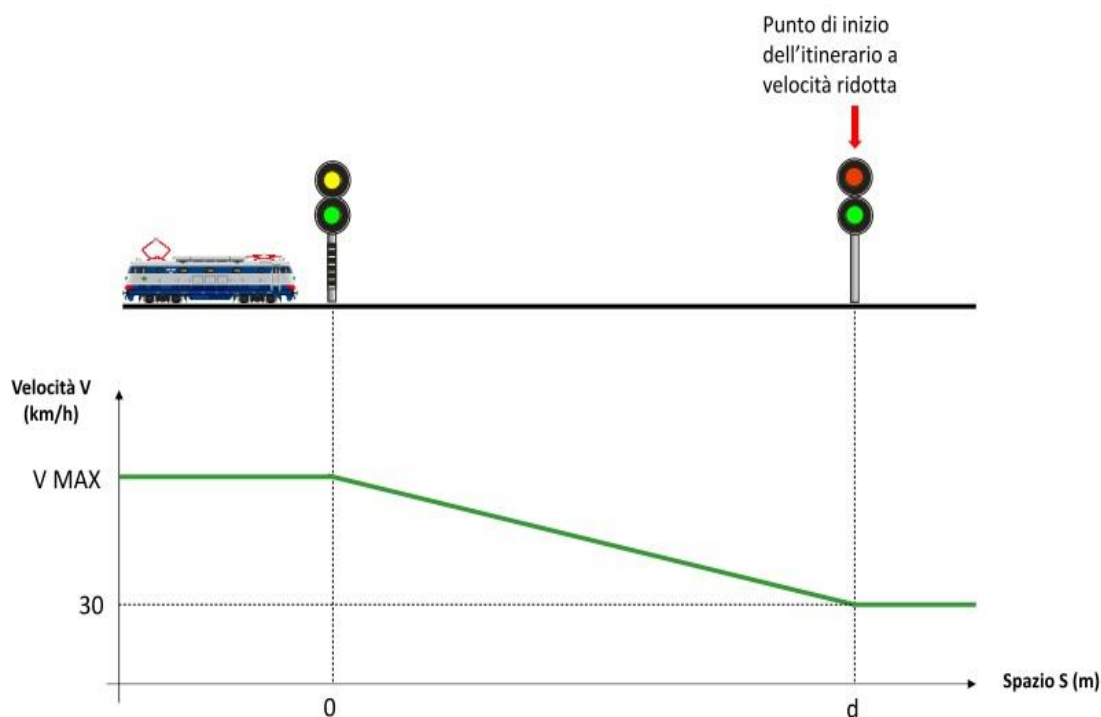


Figura 17 - Avviso di via libera con riduzione di velocità. Il segnale di prima categoria risulta essere a luci sovrapposte

I segnali di prima categoria inoltre possono essere accoppiati ai segnali di avviso, con le luci indicanti le stesse informazioni del caso precedente. In questo caso se il macchinista trovasse la luce gialla, saprebbe che il segnale è a via libera con avviso di via impedita. I segnali di prima categoria accoppiati con quelli di avviso vengono utilizzati sull'infrastruttura nazionale al fine di migliorare la capacità della rete. Infatti, in questo modo il numero di treni circolanti, a parità di altre condizioni risulta essere maggiore.

La disposizione dei segnali lungo l'infrastruttura deve essere progettata a priori in base alla velocità di percorrenza della linea. In condizioni atmosferiche normali devono essere visibili alla distanza di almeno 150 [m] se la velocità è inferiore a 90 [km/h] ed almeno 200 [m] se la velocità massima è maggiore di 90 [km/h].

5.2 REGIMI DI CIRCOLAZIONE

Prima di analizzare nello specifico quali siano i regimi di circolazione è bene focalizzarsi sui principi base della circolazione treni che possono essere riassunti nel seguente modo:

-distanziamento; si divide il tratto di linea in più sezioni

-regolazione delle precedenze; necessità di far effettuare il sorpasso di un convoglio veloce che segue rispetto ad uno più lento che precede

-regolazione degli incroci; quando i due treni sono in direzione opposta

-organizzazione del movimento nelle stazioni

Per regime di circolazione, invece, si intende il criterio attraverso il quale viene regolata la circolazione in linea, basato sull'unicità del vettore in una definita unità di spazio. Il distanziamento dei treni avviene pertanto consentendo ad un solo treno alla volta di occupare un determinato spazio, denominato sezione di blocco. Solamente dopo che il primo treno sarà giunto completamente nella stazione successiva il secondo potrà ricevere l'autorizzazione al movimento.



Figura 18 - Principio di distanziamento. Il treno 2 non vede il segnale di via libera in quanto il treno 1 sta occupando la sezione di blocco a valle



Figura 19 - Principio di distanziamento. Il treno 2 adesso ha il segnale di partenza disposto a via libera in quanto il treno 1 è giunto nella stazione successiva

La circolazione dei treni può essere regolata per mezzo di:

- a) Blocco telefonico
- b) Blocco elettrico manuale
- c) Blocco elettrico conta-assi
- d) Blocco elettrico automatico
- e) Blocco radio

5.2.1 BLOCCO ELETTRICO CONTA-ASSI

In tale regime di circolazione vi è un dispositivo che permette di capire se la linea è occupata o meno. In questo caso saranno presenti due pedali, uno all'uscita della stazione di partenza (pedale 1) ed uno all'ingresso della stazione di arrivo (pedale 2). Per rilevare la presenza di un convoglio, sul pedale viene generato un campo elettro-magnetico che al transito dell'assale del treno subisce una perturbazione. Tale perturbazione consente di contare il numero di assi che transitano in una determinata sezione. Nello specifico il pedale 1 conta gli assi in ingresso alla sezione di blocco e trasmette i dati al pedale 2. Quando il treno entrerà nella stazione successiva il pedale 2 conterà anch'esso gli assi e se il numero risulta essere uguale a quello inviato dal pedale 1, la sezione risulterà libera permettendo l'inoltro di un nuovo treno.



Figura 20 - Schema di blocco elettrico conta-assi

5.2.2 BLOCCO ELETTRICO AUTOMATICO

In questo caso le sezioni di blocco sono costituite dal binario stesso, che opportunamente sezionato per mezzo dei circuiti di binario (C.d.B.) viene fatto attraversare da una corrente elettrica. Il treno entrando nella sezione la occupa cortocircuitando il C.d.B. facendo così disporre il segnale che protegge la sezione stessa a via impedita. Il segnale potrà disporsi nuovamente a via libera solamente quando il treno che ha occupato la sezione l'avrà liberata.



Figura 21 - Schema di blocco elettrico automatico

È intuibile come tale sistema sia molto più efficiente in termini di massimo sfruttamento in capacità di una linea. In questo caso, infatti, la tratta tra due stazioni potrà essere percorsa da più treni alla volta, suddividendola in più sezioni di blocco, senza così attendere l'arrivo del treno che precede nella stazione successiva. Ovviamente gli intervalli temporali tra treni dovranno essere studiati accuratamente in modo da non rallentare un eventuale treno veloce inseguitore. Inoltre, tale sistema permette al regolatore della circolazione di conoscere la posizione del treno nella tratta grazie alla visualizzazione grafica a monitor dell'occupazione dei circuiti di binario.

5.2.3 BLOCCO RADIO

Tale blocco si basa su una comunicazione diretta e continua tra il sottosistema di terra ed il sottosistema di bordo. Il sottosistema di bordo concede delle autorizzazioni al movimento che hanno un'estensione definita e consentono una velocità massima in relazione alle condizioni del tracciato, della circolazione e delle caratteristiche tecniche del treno. Tale sistema è utilizzato sulla linea AV/AC.

6. POTENZIALITA' DELLE LINEE E CAPACITA' DEI NODI

Per quanto riguarda i mercati del trasporto passeggeri e merci, il sistema ferroviario deve offrire un servizio di alta qualità per ognuna delle seguenti voci:

- tempo di esecuzione del trasporto
- sicurezza del trasporto
- rispetto del programma d'esercizio

Elemento fondamentale per la definizione del programma d'esercizio nei servizi passeggeri è rappresentato dal tempo necessario a ciascun treno per compiere un determinato percorso, tenendo conto dei tempi di fermata previsti nelle stazioni. Per individuare tale tempo bisogna considerare aspetti tecnici quali le caratteristiche della linea, dei materiali rotabili che la percorrono e aspetti commerciali come la scelta in termini geografici e numerici del numero di stazioni.

Al giorno d'oggi sulla rete ferroviaria nazionale esistono differenti tipologie di servizi offerti per quel che riguarda il trasporto passeggeri:

- a) Treni ad alta velocità; utilizzati per collegare fra loro le principali città della penisola, viaggiando esclusivamente di giorno.
- b) Treni a marcia veloce; utilizzati per collegare fra loro località di una certa rilevanza. Il servizio è offerto sia in fasce diurne che notturne.
- c) Treni caratterizzati da più ridotta velocità commerciale; utilizzati per collegare principali poli di attrazione e destinazione degli spostamenti in ambito regionale ed interregionale. A volte sono utilizzati convogli ad alta frequentazione.
- d) Treni caratterizzati da un elevato numero di fermate; utilizzati per collegare i poli di attrazione e destinazione all'interno delle aree metropolitane e i nodi di interscambio con altri sistemi di trasporto.

Risulta perciò intuibile come in ambito ferroviario esista una vera e propria gerarchizzazione della rete. Infatti, per poter sfruttare appieno le caratteristiche di ogni servizio, la rete deve essere accuratamente progettata ed allo stesso tempo il materiale rotabile che la percorre deve essere adatto allo scopo per il quale viene

utilizzato. Riassumendo con un esempio pratico, avrebbe poco senso collocare tante stazioni e relativamente vicine sulla rete ad alta velocità in quanto non verrebbero sfruttate appieno le capacità tecniche e meccaniche dei convogli.

Infine, le limitazioni che a priori si possono riscontrare su di una linea sono:

- a) Circolazione in linea; il primo vincolo alla circolazione è dato dal numero di binari. Risulta evidente come una linea a semplice binario sia maggiormente assoggettata rispetto una a doppio.
- b) Circolazione in stazione; le stazioni sono quel luogo dove i passeggeri possono scendere o salire dal treno, ma anche dove le merci possono essere caricate o scaricate. Tutto ciò comporta il nascere di tempi tecnici necessari a svolgere tali attività, che a differenza di un semplice transito, aumentano i tempi di percorrenza, quindi la capacità stessa.
- c) Intervalli di manutenzione; come qualsiasi opera civile, anche la rete ferroviaria ha bisogno di manutenzione per garantire elevati standard di sicurezza. Di norma su ogni linea sono previsti intervalli temporali di assenza circolazione treni, dedicati ai lavori di manutenzione. Intervalli diurni di solito non superano la durata consecutiva di un'ora o un'ora e mezza.
- d) Cicli di utilizzazione del materiale rotabile; di interesse fondamentale nell'organizzazione dell'esercizio è la ricerca di un efficiente utilizzo del patrimonio rotabile a disposizione.
- e) Turni del personale; in base alle leggi sull'orario di lavoro, normativa sui congedi, normativa sulle festività infrasettimanali, specifiche mansioni del personale ed interscambiabilità si riescono a ricoprire e programmare le attività del personale.

6.1 LA POTENZIALITA' DELLE LINEE

Con il termine potenzialità di una linea si intende il numero di treni che riescono a passare attraverso una data sezione nell'unità di tempo. Principio fondamentale

della circolazione ferroviaria è che per due treni consecutivi, il treno che segue in ogni istante marci ad una distanza da quello che precede tale che possa fermarsi senza impattarvi contro anche nel caso in cui quest'ultimo si arresti istantaneamente.

Per poter calcolare la potenzialità teorica di una linea, bisogna trovare la distanza tra le teste di due treni consecutivi.

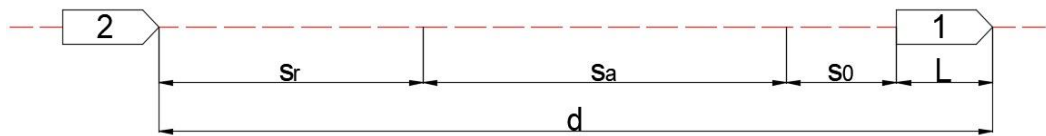


Figura 22 - Distanza minima tra due treni

Come si evince dall'immagine sovrastante, tale distanza risulta essere pari a:

$$d = s_r + s_a + s_0 + L = vt_r + \frac{v^2}{2a} + s_0 + L$$

Dove:

- s_r ; spazio percorso nel tempo di reazione
- s_a ; spazio di arresto
- s_0 ; margine di sicurezza
- t_r ; tempo di reazione
- a ; decelerazione in frenatura
- L ; lunghezza del convoglio

Nota l'espressione base della velocità, tramite formulazione inversa è possibile ricavare l'intervallo di tempo (Δt) tra due treni che viaggiano alla velocità (v) e distanza (d), quest'ultima calcolata alla formula precedente:

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

A questo punto è possibile fornire l'espressione della potenzialità teorica della linea:

$$q = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{t_r + \frac{v}{2a} + \frac{s_0 + L}{v}} \left[\frac{\text{treni}}{h} \right]$$

Il parametro di più facile intervento per migliorare la potenzialità risulta quindi essere la velocità, pertanto è di notevole interesse comprendere quale sia la velocità che massimizzi la potenzialità.

Per fare ciò basta porre uguale a zero la derivata di Δt rispetto alla velocità, ottenendo il distanziamento temporale minimo, ovvero la massima potenzialità:

$$\Delta t = \frac{\partial \Delta t}{\partial v} = \frac{1}{2a} - \frac{s_0 + L}{v^2} = 0$$

$$v = \sqrt{2a(s_0 + L)}$$

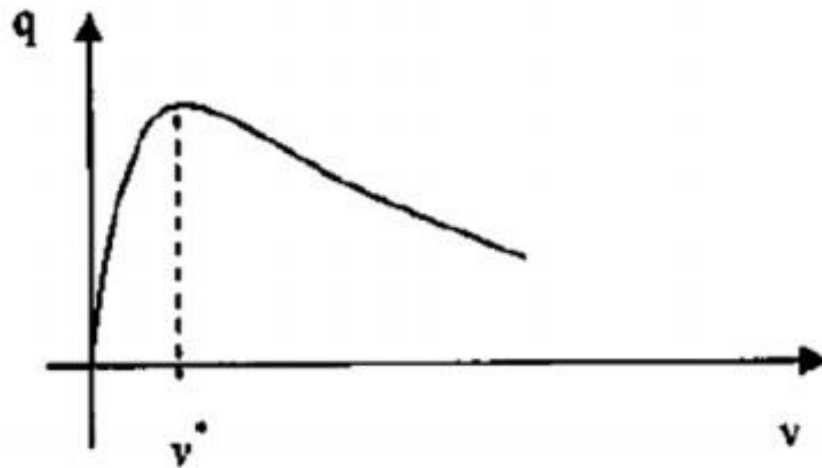


Figura 23 - Andamento della potenzialità in funzione della velocità

È bene tenere in considerazione che all'aumentare della lunghezza del convoglio, la potenzialità della linea diminuisce, ma al tempo stesso considerando costante la quantità di posti per unità di lunghezza del convoglio, aumenta la capacità dei posti. Questi due aspetti sono molto importanti da tenere in considerazione per scelte future e per non ricadere in errori grossolani è bene considerarli assieme. Come già appreso i sistemi di blocco suddividono la linea in tratti di lunghezza definita, chiamati sezioni di blocco. L'accesso da parte del treno in ogni sezione è garantito per mezzo del segnalamento ferroviario e a tal fine ogni sezione è delimitata da un

segnale di protezione. La protezione come già approfondito è preceduta dal segnale di avviso e la distanza tra i due deve rispettare:

$$\lambda + \delta \geq vt_r + \frac{v^2}{2a}$$

Dove:

- λ ; spazio di avvistamento del segnale
- δ ; distanza tra avviso e protezione

Allo stesso modo le cose sussisteranno per il segnale di avviso ed il segnale di protezione della sezione successiva; quindi, la lunghezza delle sezioni deve risultare maggiore o al più uguale alla distanza δ .

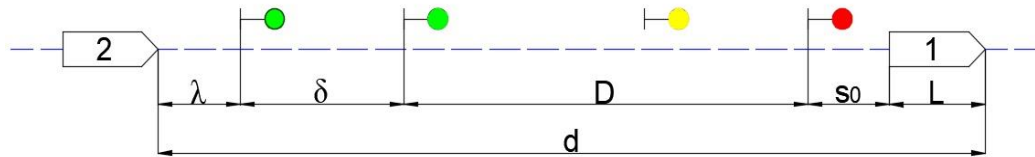


Figura 24 - Distanziamento con sezioni di blocco

Rispetto alla formula delle pagine precedenti sul distanziamento minimo in questo caso si dovrà aggiungere la lunghezza della sezione (D):

$$d = \lambda + \delta + D + s_0 + L = vt_r + \frac{v^2}{2a} + D + s_0 + L$$

Pertanto, il distanziamento temporale minimo e la potenzialità massima si ottengono in corrispondenza della massima velocità massima consentita dalla distanza δ (tra avviso e protezione) da cui dipende la lunghezza della sezione di blocco.

Si riscrive pertanto la formulazione estesa della potenzialità in presenza di segnali:

$$q = \frac{Vt}{\lambda + \delta + D + s_0 + L}$$

Espressa in questi termini si può notare come per aumentare la potenzialità sia necessario diminuire la lunghezza delle sezioni. Tale obiettivo può essere

raggiunto accoppiando i segnali, ottenendo così che il distanziamento con sezioni di blocco:

$$d = \lambda + 2\delta + s_0$$

A titolo puramente indicativo la lunghezza di una sezione di blocco per linee esercitate con blocco elettrico automatico è circa pari a 1200 [m]. Le formulazioni viste in precedenza possono ritenersi valide se applicate alla sezione più sfavorevole, ovvero quella con tempi di percorrenza maggiori.

Infine, per tenere in conto l'effetto delle diverse velocità si può ricorrere a metodi di calcolo della potenzialità che considerano come distanziamento temporale la media dei distanziamenti corrispondenti alle diverse situazioni di successione di treni che viaggiano a velocità diverse:

$$q = \frac{T}{\sum t_i}$$

Dove T è il tempo di riferimento. Proprio su tale principio si basa il metodo UIC.

6.1.1 IL METODO UIC PER IL CALCOLO DELLA POTENZIALITA' DELLE LINEE

Come visto, il metodo precedente potrebbe riscontrare delle complicazioni quando la lunghezza delle sezioni non è costante. Il metodo UIC² è di tipo induttivo/empirico: in questo caso, dato uno schema di esercizio si vuole conoscere il consumo di capacità ed eventualmente quanti treni si possano ancora inserire nell'orario programmato. Perciò il metodo non mira a comprendere la congestione, ma capire se possano essere inseriti nuovi treni sulla tratta³.

² FICHE UIC 406R

³ Un esempio pratico di utilizzo della Fiche potrebbe essere quello dell'AV. Infatti, gli operatori ferroviari in questo caso risultano essere Italo e Trenitalia. Quest'ultima resta la più importante in termini economici ed è chiamato Incumbent (era il vecchio monopolista). I servizi dell'Incumbent però sono detti incontestabili, quindi se il concorrente vuole affacciarsi sul mercato lo può fare, ma cercando di saturare gli eventuali spazi vuoti. Proprio questi spazi vuoti possono essere esaminati per mezzo del metodo proposto dalla Fiche UIC 406R

L'approccio si basa sull'analisi del singolo convoglio e su di un intervallo di tempo specifico chiamato "defined time period" maggiore almeno a $2 [h]$. Ricordandosi che lo scopo è far transitare un numero aggiuntivo di treni tra due punti di interesse, si introduce il concetto di traccia oraria. La traccia, pertanto, è significativa di ogni linea, ma la linea stessa va suddivisa in tratte, ovvero segmenti a caratteristiche circa omogenee. Il metodo va quindi ripetuto per ogni tratta, all'interno delle quali le sezioni di blocco possono non avere la stessa lunghezza.

Si introduce a questo punto il così detto "tempo di occupazione" (ovvero il tempo che resta rosso un determinato segnale perché quella sezione risulta essere occupata). Delle tratte si analizza quindi la sezione di blocco con tempo di occupazione maggiore. Per evitare condizioni di moto perturbate del treno che segue, ovvero che veda il rosso a causa della ancora mancata liberazione del treno che precede, si aggiunge una seconda sezione tra i due treni. Il tutto può essere riassunto tramite il seguente schema:

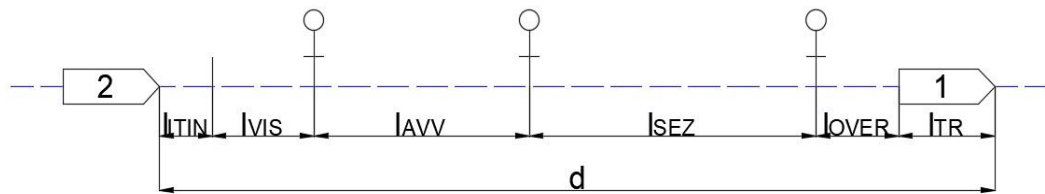


Figura 25 - Distanziamento metodo FICHE

Dove:

- l_{ITIN} ; distanza per sopperire al tempo di controllo. Ovvero il tempo fisico che il segnale ci mette ad assumere aspetto di via libera dopo che la sezione successiva è stata sgombrata.

- l_{VIS} ; distanza di visibilità. Tale da permettere al macchinista di non vedere il giallo dell'avviso, ma direttamente il verde così da non rallentare la marcia del convoglio.

Pertanto, il distanziamento minimo spaziale in questo caso risulta essere:

$$d = l_{ITIN} + l_{VIS} + l_{AVV} + l_{sez} + l_{OVER} + l_{TR}$$

Analogamente si può identificare il tempo di occupazione della sezione:

$$S = t_{ITIN} + t_{VIS} + t_{AVV} + t_{sez} + t_{OVER} + t_{TR}$$

Ricordandosi che il calcolo è svolto per la sezione critica; quindi, il tempo di occupazione risulterà essere quello massimo. La sezione critica però si ricorda che massimizza la somma $t_{sez} + t_{avv}$.

Si prenda a questo punto l'orario grafico per una circolazione omotachica:

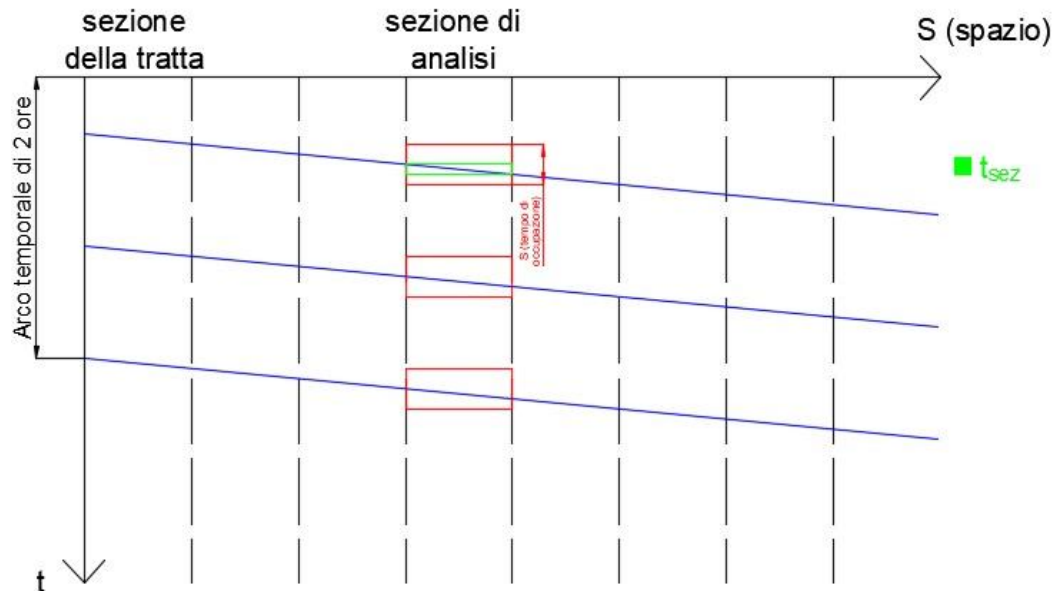


Figura 26 – Schema di orario grafico per circolazione omotachica

Come si può notare da Figura 26 il rettangolo rosso rappresenta il tempo totale di occupazione della sezione critica. Aggiungere tracce significa aggiungere ulteriori linee di velocità (blu) tra gli spazi lasciati vuoti nelle sezioni. La somma dei tre rettangoli nelle due ore prese di analisi forniscono il consumo di capacità, mentre la restante è la capacità disponibile. Nella realtà però spesso accade che i rettangoli rossi si sovrappongano, ma ciò sarebbe inammissibile ai fini della circolazione; pertanto, si introduce il concetto di “compressione dell’orario grafico”. Fondamentalmente vengono variati gli orari di partenza dei treni in modo tale da far solamente “toccare” i rettangoli così che l’intervallo di partenza tra due treni risulti essere pari al tempo di occupazione della sezione critica. In tal modo si libera spazio e si sfruttano al massimo i tempi.

Nel caso omotachico il tempo di occupazione totale risulta essere:

$$OT_{omo} = \sum_i^n S_i = nS$$

Dove S_i è il tempo di occupazione dei singoli convogli.

Il vero problema però, si verifica quando sulla tratta operano treni con diverse velocità (circolazione eterotachica):

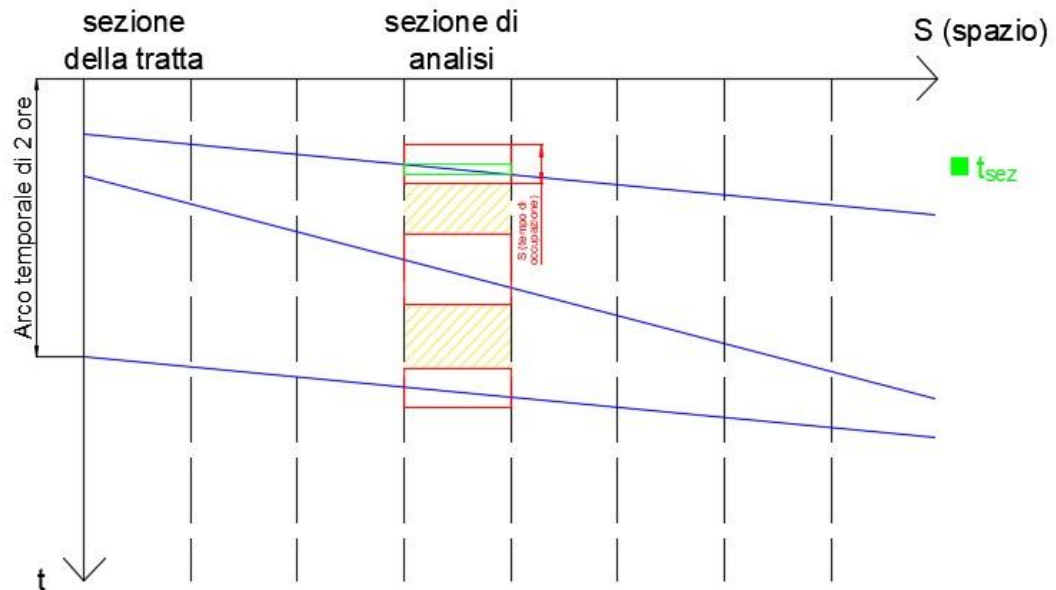


Figura 27 - Schema di orario grafico per circolazione eterotachica. In giallo le finestre temporali libere

In questo caso non si possono far toccare i rettangoli rossi, altrimenti si avrebbe un conflitto a monte o a valle, essendo le linee di velocità a pendenza differente. Si possono solamente effettuare manovre di precedenza. Risulta pertanto evidente come la circolazione di mezzi con diverse velocità causi un consumo aggiuntivo in termini di capacità. Al tempo stesso però si riusciranno ad avere maggiori varchi temporali in cui la circolazione risulti assente, garantendo finestre temporali per la manutenzione dell'infrastruttura.

Nel caso eterotachico quindi, il tempo di occupazione totale risulta essere pari a:

$$OT_{etero} = \sum_i^n S_i + \sum_i^{n-1} h_i$$

Dove con h_i si intendono i tempi di eterogeneità (rettangoli in tratteggio giallo di Figura 27).

Trovato quindi il tempo di occupazione (OT) bisogna capire se la linea risulti essere congestionata o meno:

$$OTR = \frac{OT}{finestra\ temporale} \leq \text{valori tabulati}$$

Si consideri che valori pari al 60-85% indicano già una congestione ed in questo caso è fortemente sconsigliato aggiungere tracce.

Se invece la linea non risultasse congestionata, allora si potrebbero aggiungere tracce. Bisognerebbe calcolare ulteriori tempi aggiuntivi (additional time ratio ATR), legati ad incertezze sui tempi di percorrenza delle tracce ed alla manutenzione della linea:

$$ATR = \frac{100}{OTR_{max}} - 1$$

A questo punto la capacità consumata è pari a:

$$CC = \frac{OT(1 + ATR)}{finestra\ temporale}$$

Fornendo così una capacità residua pari a:

$$CR = 100 - CC$$

In questa maniera si riesce a comprendere se e quante tracce è possibile aggiungere alla tratta.

6.2 LA CAPACITA' DEI NODI

Ciò che influenza il processo delle circolazioni sulla rete ferroviaria è la costituzione stessa della linea. Le linee, infatti, possono essere schematizzate come una successione di archi e nodi dove i primi rappresentano le tratte e i secondi le stazioni. Come facilmente intuibile è superfluo disporre di archi in grado di smaltire un notevole numero di treni/ora se poi i nodi risultano essere sottodimensionati. In maniera generale quindi la potenzialità di circolazione dell'impianto va definita in relazione alla sua tipologia e in particolare agli elementi che concorrono alla formazione degli itinerari.

La stima della capacità dei nodi può essere ricondotta a differenti metodologie:

- a) Metodi sintetici combinatori e probabilistici
- b) Metodi analitici descrittivi
- c) Metodi di saturazione (compattazione delle tracce)
- d) Metodi di simulazione

6.2.1 METODI SINTETICI COMBINATORI E PROBABILISTICI

Cercano di valutare se sarà possibile stabilire un orario di servizio soddisfacente. Scopo di tale metodo è il calcolo di alcuni indicatori sintetici rappresentativi del grado di saturazione e i margini di capacità. Un semplice esempio di indicatore potrebbe essere il numero medio di circolazioni. Un limite però a tale metodo potrebbe essere la carenza di informazioni relative alla reale circolazione dei treni ed una scarsa rispondenza alla realtà degli arrivi.

6.2.2 METODI ANALITICI DESCRITTIVI

Sono modelli molto semplici che mirano alla determinazione di soluzioni preliminari. Essi modellizzano matematicamente l'ambiente ferroviario, analizzando istante per istante lo stato delle sezioni di blocco o degli enti di stazione interessati dal movimento treni. Analizzando pertanto i diagrammi temporali si riesce a stimare il grado di effettivo impegno dei diversi elementi fisici. Come nel caso precedente un input richiesto è il layout d'impianto e in aggiunta il programma di esercizio di stazione.

Per concludere, tali metodi si presentano come un buon strumento per determinare i vincoli strutturali del sistema.

6.2.3 METODI DI SATURAZIONE (compattazione delle tracce)

Sono metodi molto simili a quello proposto dalla FICHE UIC 406R per il calcolo della potenzialità nelle tratte; infatti, permettono di valutare la capacità teorica dei nodi a partire da un orario treni assegnato. Ovviamente gli input richiesti saranno il layout d'impianto, il programma di esercizio delle stazioni, tempi minimi di successione tra treni e i margini tra questi che consentono la stabilità d'orario.

6.2.4 METODI DI SIMULAZIONE

Sono metodi che riproducono matematicamente il programma operativo, in maniera molto dettagliata e sulla base di regole definite a priori. Ovviamente per lavorare in maniera così dettagliata, servono elevati dati di input descrittivi dell'impianto e dell'esercizio, i quali essendo talmente copiosi richiedono una sintesi con il rischio di tornare a valori restituiti dai metodi analitici. Tali metodi quindi si prefigurano come sistemi di supporto alla pianificazione e non alla risoluzione di conflitti generati nell'esercizio reale.

Come si vedrà in seguito l'applicativo commerciale OpenTrack (utilizzato in questa sede) genera orari di servizio simulando il movimento dei convogli con equazioni differenziali, in particolare riesce a lavorare su una rete abbastanza estesa comprensiva di linee e stazioni e valuta gli effetti dell'orario programmato e le scelte del piazzamento treni, consentendo inoltre di valutare gli effetti di ritardi iniziali o ritardi ai nodi.

Visti in maniera generale le macrocategorie di metodi che possono essere utilizzati per il calcolo della capacità dei nodi si analizza ora la verifica degli impianti di stazione. In maniera del tutto generale si può affermare che nella maggior parte dei casi le linee presentano livelli di capacità superiori rispetto ai nodi, lasciando così a questi ultimi la limitazione di circolazioni. Tuttavia, ad oggi non esiste un metodo condiviso per la stima della capacità degli impianti a differenza invece di come visto per le linee. Per tale motivo l'approccio esposto in seguito prende i principi

del metodo UIC utilizzato per le linee integrandolo con nuovi passaggi in modo da costruire una metodologia utile.

Tale metodologia prevede due fasi:

- a) Analisi statica dell'impianto; utile alla determinazione di tutte le possibilità di circolazione realizzabili in un impianto sulla base dei parametri fisici (modello SNJ).
- b) Analisi operativa del nodo; necessaria a determinare la stima di capacità del nodo (modello SLC).

Il sistema ottenuto dall'unione dei due punti precedenti è così in grado di determinare l'utilizzo ideale di un impianto, valutando il consumo di capacità e la capacità residua, nota la domanda di trasporto.

Per concludere si vuole mostrare seppur in maniera generale le metodologie per il calcolo del numero medio di circolazioni.

6.2.5 METODOLOGIE PER IL CALCOLO DEL NUMERO MEDIO DI CIRCOLAZIONI

I metodi per la determinazione del numero medio di circolazioni sono due, ma entrambi prevedono operazioni comuni quali:

- a) Considerare gli itinerari come elemento minimo da investigare
- b) Riconoscere ed elencare tutti gli itinerari realizzabili nelle diverse configurazioni operative d'impianto
- c) Confrontare gli itinerari tra loro ai fini della definizione della reciproca compatibilità mediante la matrice degli itinerari

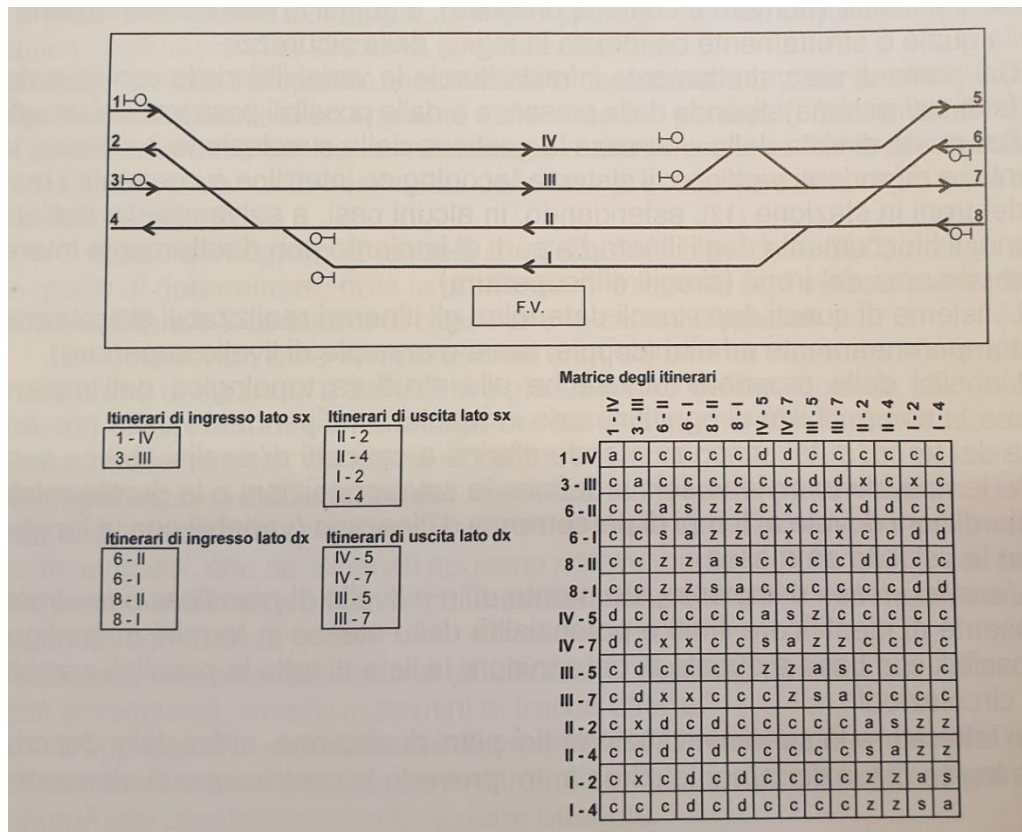


Figura 28 - Piano schematico con relativa matrice degli itinerari

Ad ogni riga e colonna della matrice corrisponde un itinerario, dove gli elementi della stessa identificano:

- compatibilità tra coppie di itinerari*; si verifica quando gli itinerari non hanno punti in comune, scagionando la possibilità che treni che li percorrono entrino in collisione. Nella matrice tale situazione è rappresentata con la lettera “c”.
- incompatibilità tra coppie di itinerari*; in questo caso le incompatibilità possono essere relative a differenti situazioni. Nella matrice si identificano diverse lettere quali: “a” confronto di un itinerario con sé stesso, “x” due itinerari che si intersecano, “z” due itinerari convergenti, “s” due itinerari divergenti, “d” due itinerari posti l’uno in proseguimento dell’altro, “u” due itinerari di scontro frontale.

A questo punto i passaggi comuni dei due metodi terminano e gli stessi si differenziano come segue:

- Metodo Potthoff; introduce una valutazione empirica tenendo conto della frequenza di utilizzazione degli itinerari durante il tempo di riferimento (T). Pertanto, la matrice degli itinerari viene ampliata ripetendo ogni riga e colonna tante volte quanti sono i treni che debbano percorrere un itinerario. Ecco,

quindi, che ogni casella della matrice originale avrà ora un peso $n_i n_j$, dove i e j sono due generici itinerari ed n il numero di treni che li percorrono.

VETTORE TRENI PER ITINERARIO

	1 - IV	3 - III	6 - II	6 - I	8 - II	8 - I	IV - 5	IV - 7	III - 5	III - 7	II - 2	II - 4	I - 2	I - 4
n	90	60	30	20	50	50	30	60	20	40	60	20	30	40

MATRICE TRENI $n_i \cdot n_j$

	1 - IV	3 - III	6 - II	6 - I	8 - II	8 - I	IV - 5	IV - 7	III - 5	III - 7	II - 2	II - 4	I - 2	I - 4
1 - IV	8100	0	0	0	0	0	2700	5400	0	0	0	0	0	0
3 - III	0	3600	0	0	0	0	0	0	1200	2400	3600	0	1800	0
6 - II	0	0	900	600	1500	1500	0	1800	0	1200	1800	600	0	0
6 - I	0	0	600	400	1000	1000	0	1200	0	800	0	0	600	800
8 - II	0	0	1500	1000	2500	2500	0	0	0	0	3000	1000	0	0
8 - I	0	0	1500	1000	2500	2500	0	0	0	0	0	0	1500	2000
IV - 5	2700	0	0	0	0	0	900	1800	600	0	0	0	0	0
IV - 7	5400	0	1800	1200	0	0	1800	3600	1200	2400	0	0	0	0
III - 5	0	1200	0	0	0	0	600	1200	400	800	0	0	0	0
III - 7	0	2400	1200	800	0	0	0	2400	800	1600	0	0	0	0
II - 2	0	3600	1800	0	3000	0	0	0	0	0	3600	1200	1800	2400
II - 4	0	0	600	0	1000	0	0	0	0	0	1200	400	600	800
I - 2	0	1800	0	600	0	1500	0	0	0	0	1800	600	900	1200
I - 4	0	0	0	800	0	2000	0	0	0	0	2400	800	1200	1600

Figura 29 - Esempio di matrice $n_i n_j$

Pertanto, la definizione del numero medio di circolazioni può essere definita come:

$$\bar{n} = \frac{N^2}{\sum n_i n_j}$$

Con numero complessivo di treni $N = n_i = n_j$ ed $N = n_i n_j$ sommatoria delle sole caselle incompatibili.

- b) Metodo delle ennuple di saturazione; tale metodo ricerca tutte le soluzioni di circolazione che saturano il nodo ovvero costruisce a partire dall'identificazione delle coppie compatibili, matrici ausiliarie di volta in volta di ordine superiore. La prima matrice di ordine superiore, ad esempio, riporta le coppie di itinerari compatibili e le confronta ancora con gli itinerari singoli, determinando le terne compatibili. Il complesso delle ennuple compatibili determinato dalla lettura delle singole matrici può essere rappresentato da una struttura gerarchica (albero delle soluzioni di circolazione) che descrive tutte le configurazioni che l'impianto può assumere.

Sulla base quindi del numero di ennuple di saturazione, si determina il numero medio di circolazioni:

$$\bar{n} = \frac{1IT_1 + 2IT_2 + 3IT_3 + \dots + nIT_n}{IT_1 + IT_2 + IT_3 + \dots + IT_n}$$

Con IT_1 , IT_2 , IT_3 rispettivamente il numero di itinerari singoli, coppie e terne che saturano il nodo.

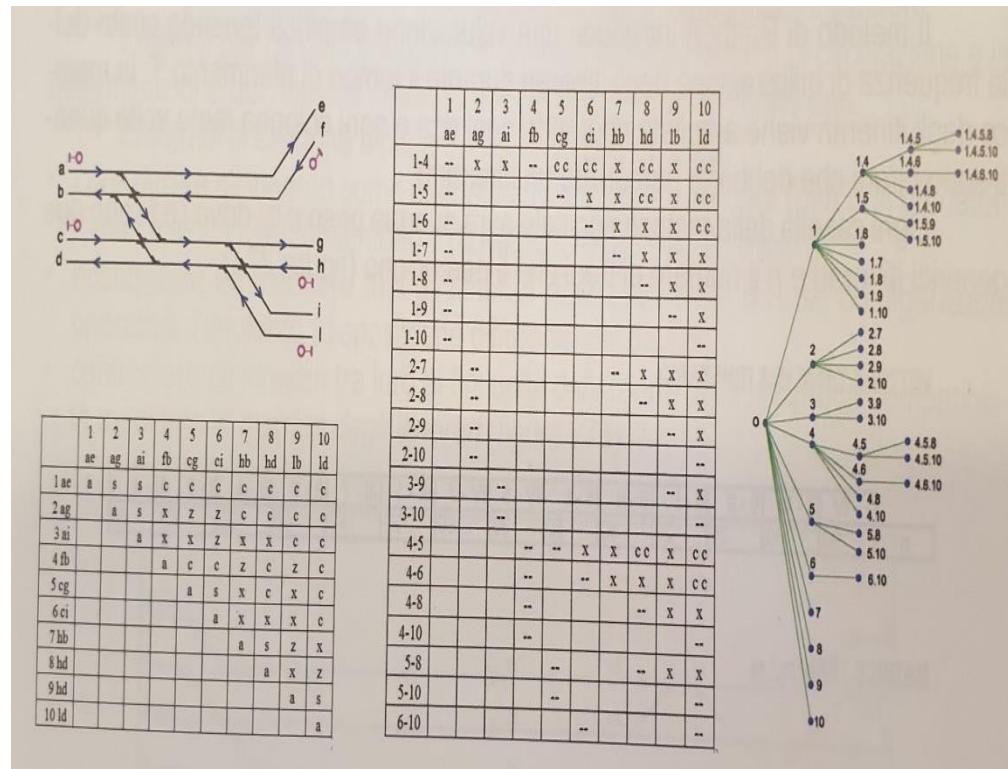


Figura 30 - Schema di matrici degli itinerari di primo e secondo ordine e albero delle soluzioni di circolazione

Utilizzando il metodo di Potthoff si è così calcolata la potenzialità della stazione di Ivrea, ovvero l'attitudine dell'impianto a garantire la circolazione dei treni, ovvero garantire itinerari di ingresso e uscita nel rispetto della sicurezza. A tal proposito risulta chiaro come il numero di itinerari possibili sia funzione della struttura dell'impianto. Si ricorda, infine, che il metodo di Potthoff è sintetico di tipo combinatorio con utilizzo della teoria dei grafi e operazioni fra matrici.

Come visto nelle pagine precedenti, il primo passo è stato quello di schematizzare la stazione in esame:

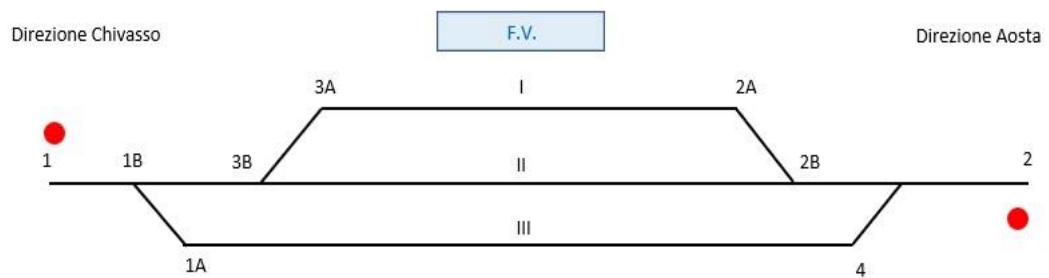


Figura 31 - Schematizzazione della stazione di Ivrea

Dall'immagine si può notare la disposizione dei binari (I,II,III) rispetto al fabbricato viaggiatori (F.V.), il numero dei deviatori (1B,1A, ...) e l'ubicazione dei segnali di protezione (indicatori di colore rosso) rispetto al senso di provenienza del treno. Inoltre, in base allo schema dell'impianto si sono individuate diverse tipologie di itinerari:

Itinerari ingresso lato
sinistro

1-I
1-II
1-III

Itinerari uscita lato
sinistro

I-1
II-1
III-1

Itinerari ingresso lato
destro

2-I
2-II
2-III

Itinerari uscita lato
destro

I-2
II-2
III-2

Dove i numeri arabi indicano da quale lato della linea si muove il treno, mentre quelli romani su quale binario di stazione avviene la manovra.

A questo punto, noti gli itinerari e come venga gestita la stazione, è stato possibile costruire la “matrice delle incompatibilità/matrice degli itinerari”; dove confrontando tra loro i diversi itinerari si è fornito uno specifico attributo: “c” → compatibile, “a” → confronto itinerario con sé stesso, “x” → due itinerari che si intersecano, “z” → due itinerari convergenti, “s” → due itinerari divergenti, “d” → due itinerari posti uno in proseguo dell'altro, “u” → due itinerari di scontro frontale.

	1-I	1-II	1-III	2-I	2-II	2-III	I-2	II-2	III-2	I-1	II-1	III-1
1-I	c	s	s	u	x	c	d	s	c	u	z	z
1-II	s	a	s	x	u	x	z	d	z	z	u	z
1-III	s	s	c	c	x	u	z	z	d	u	u	u
2-I	u	x	c	a	s	s	u	u	u	d	z	z
2-II	x	u	x	s	a	s	z	u	z	z	d	z
2-III	c	x	u	s	s	c	z	z	u	z	z	d
I-2	d	z	z	u	z	z	a	z	z	c	c	c
II-2	s	d	z	u	u	z	z	a	z	c	s	c
III-2	c	z	d	u	z	u	z	z	a	c	c	c
I-1	u	z	u	d	z	z	c	c	c	a	z	z
II-1	z	u	u	z	d	z	c	s	c	z	a	z
III-1	z	z	u	z	z	d	c	c	c	z	z	a

Tabella 2 - Matrice delle incompatibilità/itinerari

Definita la matrice delle incompatibilità, per ciascun itinerario è stato calcolato il tempo medio di occupazione ed il numero di treni/giorni che percorrono lo stesso, ottenendo i seguenti valori:

			Velocità [m/s]	Tempi [s]	Treni
Lunghezza itinerario 1-I	1024	[m]	8.33	242.88	8
Lunghezza itinerario 1-II	890	[m]	11.11	200.10	13
Lunghezza itinerario 1-III	890	[m]	6.94	248.16	10
Lunghezza itinerario 2-I	396	[m]	8.33	167.52	5
Lunghezza itinerario 2-II	666	[m]	11.11	179.94	13
Lunghezza itinerario 2-III	793	[m]	6.94	234.19	3
Lunghezza itinerario I-2	387	[m]	8.33	166.44	5
Lunghezza itinerario II-2	349	[m]	11.11	151.41	13
Lunghezza itinerario III-2	349	[m]	6.94	170.26	3
Lunghezza itinerario I-1	890	[m]	8.33	226.80	8
Lunghezza itinerario II-1	890	[m]	11.11	200.10	12
Lunghezza itinerario III-1	890	[m]	6.94	248.16	10

Tabella 3 - Tempo medio di occupazione e numero di treni/giorno per ogni itinerario

Introdotta la matrice delle incompatibilità e calcolati i tempi medi di percorrenza, si è ricavata l'associata "matrice dei tempi" che contiene i valori dei tempi di occupazione di ciascun itinerario, che divengono di interdizione per gli itinerari con esso incompatibili. Ovviamente laddove nella matrice delle incompatibilità, due itinerari risultassero compatibili, nella matrice dei tempi, per come definita, non potrà essere presente il relativo tempo di interdizione. Tale tempo infatti è da

intendersi come quell'intervallo che deve passare tra due itinerari incompatibili per far sì che diventino compatibili.

	1-I	1-II	1-III	2-I	2-II	2-III	I-2	II-2	III-2	I-1	II-1	III-1
1-I	0	243	243	243	243	0	243	243	0	243	243	243
1-II	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
1-III	248	248	0	0	248	248	248	248	248	248	248	248
2-I	168	168	0	168	168	168	168	168	168	168	168	168
2-II	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
2-III	0	234	234	234	234	0	234	234	234	234	234	234
I-2	166	166	166	166	166	166	166	166	166	0	0	0
II-2	151	151	151	151	151	151	151	151	151	0	151	0
III-2	0	170	170	170	170	170	170	170	170	0	0	0
I-1	227	227	227	227	227	227	0	0	0	227	227	227
II-1	200	200	200	200	200	200	0	200	0	200	200	200
III-1	248	248	248	248	248	248	0	0	0	248	248	248

Tabella 4 - Matrice dei Tempi

Ulteriore matrice che si è dovuta ricavare è stata la “matrice dei ritardi”. Per fare ciò si è dovuto dare un peso ai tempi di interdizione rispetto al traffico. Ciò significa effettuare una ripartizione dei flussi di treni sui vari itinerari (n_i , n_j) e calcolare il prodotto dei flussi stessi per i rispettivi tempi di occupazione (t_{ij}):

$$R_{ij} = n_i n_j t_{ij}^2 / 2T$$

Dove “T” è il tempo di riferimento di osservazione, assunto pari a 1067 minuti, ovvero 17 ore e 47 minuti, lasso di tempo che trascorre tra il primo e l'ultimo treno di giornata. Il calcolo si può ridurre alle sole caselle della matrice dei tempi di interdizione; infatti i ritardi risultano solo nelle caselle che hanno nella matrice delle incompatibilità (scontro frontale, convergenza, incrocio, inseguimento). Pertanto, la matrice dei ritardi risulta essere quella riportata nella pagina successiva.

Nota la matrice dei ritardi si possono dedurre tutti i parametri utili per l'analisi dell'impianto ed in particolare i coefficienti di utilizzazione.

	1-I	1-II	1-III	2-I	2-II	2-III	I-2	II-2	III-2	I-1	II-1	III-1
1-I	0.00	0.00	0.00	0.31	0.80	0.00	0.31	0.00	0.00	0.49	0.74	0.61
1-II	0.00	0.00	0.00	0.34	0.88	0.20	0.34	0.88	0.20	0.54	0.81	0.68
1-III	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.24	0.40	1.04	0.24	0.64	0.96	0.80
2-I	0.15	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.24	0.06	0.15	0.22	0.18
2-II	0.44	0.71	0.55	0.00	0.00	0.00	0.27	0.71	0.16	0.44	0.66	0.55
2-III	0.00	0.28	0.21	0.00	0.00	0.00	0.11	0.28	0.06	0.17	0.26	0.21
I-2	0.14	0.23	0.18	0.09	0.23	0.05	0.00	0.23	0.05	0.00	0.00	0.00
II-2	0.00	0.50	0.39	0.19	0.50	0.12	0.19	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
III-2	0.00	0.15	0.11	0.06	0.15	0.03	0.06	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00
I-1	0.43	0.70	0.54	0.27	0.70	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.54
II-1	0.50	0.81	0.62	0.31	0.81	0.19	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.62
III-1	0.64	1.04	0.80	0.40	1.04	0.24	0.00	0.00	0.00	0.64	0.96	0.00

Tabella 5 - Matrice dei ritardi

Per la stazione di Ivrea nello scenario attuale, ipotizzando un periodo di disponibilità all'esercizio di 17 ore e 47 minuti al giorno con 103 treni (206 movimenti), si ha un valore di 4.6 movimenti contemporanei possibili, con un tempo di occupazione regolare (cioè al netto delle attese per interdizione) di 569 minuti (circa 9.5 ore) ed un ritardo per attese di 8.52 minuti, per un valore del tempo di occupazione totale dell'impianto di 577.34 minuti (circa 9.5 ore). Infine, si ricorda che i coefficienti di utilizzazione sono il rapporto tra i valori dei tempi di occupazione regolare e totale rispetto al tempo di esercizio. In questo caso tali coefficienti risultano essere pari a 0.53 e 0.54 e rientrano nella soglia di riferimento di Potthoff che considera rispettivamente i limiti di 0.50-0.65 per l'intera giornata.

Tempo di riferimento [min]	1067.00
Numero totale mov. Treni	206
Sommatoria $n_i * n_j$	9292
Numero medio mov. Treni	4.6
Sommatoria $n_i * n_j * t_{ij}$	25657.60
Tempo medio	2.76
Occupazione regolare	569
Sommatoria $n_i * n_j * t_{ij}^2 / 2T$	38.93
Ritardo medio	8.52
B+R _{med}	577.34
Coeff. Utilizzaz.regolare	0.533
Coeff. Utilizzaz.totale	0.541

Tabella 6 - Riepilogo dei risultati

7. GESTIONE DEI PASSAGGI A LIVELLO LUNGO L'INFRASTRUTTURA

Anche se all'apparenza potrebbe risultare un argomento che poco o nulla ha a che fare con la programmazione e rispetto degli orari di esercizio, in realtà è strettamente connesso. Infatti, i passaggi a livello (p.l.) non interferiscono con la potenzialità delle linee, ma con la stabilità dell'orario. Basti pensare ad un'avaria del sistema che impedisca la chiusura delle sbarre: il treno non potrà percorrere a piena velocità l'intersezione a raso con la strada, ma secondo le disposizioni vigenti⁴ dovrà procedere con una marcia a vista, non superando i 3 [km/h], previo presenziamento del passaggio a livello da parte degli operatori della manutenzione.

Tutto ciò perturba il moto del treno, causando ritardi alla circolazione. Ecco allora che si ritiene necessario affrontare in maniera generale la tipologia di passaggi a livello che si incontrano lungo l'infrastruttura e la loro collocazione spaziale.

Un p.l. dovrà essere previsto ogni qualvolta si ha l'intersezione a raso tra la rete ferroviaria e quella stradale che non può essere risolta con l'inserimento di opportuni sottovia o cavalcavia.

Una prima classificazione dei p.l. può essere condotta in base alla tipologia di chiusura:

- a) Privati in consegna agli utenti
- b) Con chiusura regolata sulla marcia dei treni
- c) Con chiusura automatica; in questo caso è il treno stesso che durante la propria marcia schiaccia un pedale che manda in chiusura uno o più p.l. di fila. La distanza tra pedale e primo p.l. comandato è calcolata sul treno che impiega il maggior spazio di frenatura e deve tenere in conto di un ciclo di preavviso per gli automobilisti che si trovino nei pressi dell'intersezione. Pertanto, la distanza che intercorre tra dispositivo di comando e p.l. è pari ad almeno:

⁴ Regolamento Circolazione Treni

$$d_{dispositivo-p.l.} = 1.1T \frac{V}{3.6}$$

Dove 1.1 è il coefficiente che tiene conto delle possibili imprecisioni dei tachimetri, V è la massima velocità di circolazione e T il tempo minimo ($[s]$) che deve intercorrere fra il passaggio del treno sul dispositivo di comando della chiusura e quello sul p.l.

Per la protezione lato ferrovia invece sarà installato a monte del p.l. un segnale di prima categoria preceduto da un corrispondente segnale di avviso. Pertanto, per la realizzazione della marcia imperturbata dei treni la distanza minima fra il dispositivo di comando ed il segnale di avviso deve essere pari ad almeno:

$$d_{dispositivo-Avv.} = D + 1.1\tau \frac{V}{3.6}$$

Dove D è la distanza di visibilità del segnale e τ il tempo che intercorre fra l'invio del comando di chiusura e la disposizione a via libera del segnale a seguito del ritorno di controllo di avvenuta chiusura delle barriere.

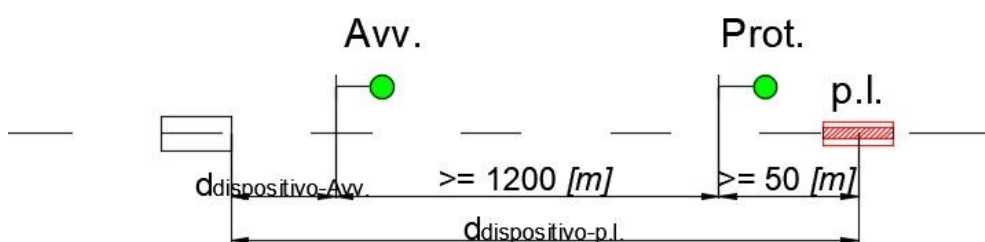


Figura 32 - Distanze previste da R.F.I. per protezione dei p.l. automatici

Risulta così evidente come la gestione dei p.l., la loro collocazione spaziale e numerica sull'infrastruttura risulti importante ai fini della regolarità dell'esercizio ferroviario. Pertanto, là dove possibile si dovrebbe preferire assenza di tali dispositivi di intersezione a raso e dove fossero già presenti e in numero elevato sull'infrastruttura cercare di limitarli, rimuovendoli.

8. LA LINEA FERROVIARIA CHIVASSO-IVREA

Analizzati i principali aspetti tecnici ed organizzativi del mondo ferroviario a questo punto è possibile focalizzarsi sulla linea Chivasso-Ivrea, caso studio di tesi.

La linea presa in esame in realtà fa parte della intera tratta denominata Chivasso-Aosta, avente un'estensione pari a 98+619 chilometri. Le analisi saranno svolte a partire dalla stazione di Chivasso (0+000) sino a quella di Ivrea (32+431).

La linea Chivasso-Ivrea non fu costruita in una sola volta, ma a mano a mano vennero inaugurate parti di essa sino a giungere nella stazione di destinazione. Per esempio, la tratta Chivasso-Caluso fu inaugurata il 1° Maggio 1858, mentre la tratta Caluso-Ivrea il 5 Novembre 1858 ed entrambe prevedevano un singolo binario in linea. A partire dal 1° Gennaio 1915 l'esercizio della linea fu affidato ai militari del Genio Ferrovieri .

Il primo vero ammodernamento della linea avvenne tra il 1969 e il 1977 con l'installazione del Blocco Elettrico Manuale (BEM) tra Chivasso e Rodallo e degli Apparati Centrali Elettrici (ACE) nelle stazioni di Montanaro e Rodallo. Solamente a partire dal 1985 venne rinnovato il resto degli impianti con l'adozione progressiva degli Apparati Centrali Elettrici a Itinerario (ACEI) ed estensione del B.E.M. fino ad Aosta.

Purtroppo, nel 1992 si verificò un grave incidente all'imbocco della galleria di Caluso con scontro tra il treno diretto Torino-Aosta (treno dispari) ed il regionale Ivrea-Chivasso (treno pari), causando la morte di cinque persone. Proprio per evitare incidenti simili in futuro e garantire un maggior livello di sicurezza ai passeggeri, venne subito finanziato un nuovo piano di automazione della linea sostituendo l'ormai obsoleto B.E.M. con il Blocco Elettrico Conta Assi (BCA). Inoltre, a catena (dal 1° Marzo 1997) si diede inizio ai lavori per l'introduzione del Controllo del Traffico Centralizzato (CTC) e contemporaneamente venne realizzato il posto centrale a Torino Lingotto. Con l'introduzione del C.T.C. a partire dal 14 Giugno 2000 solamente le stazioni di Ivrea e Aosta hanno mantenuto la presenza del Dirigente Movimento: nelle ore diurne solo ad Ivrea, mentre 24h/24h ad Aosta. Pertanto, la stazione di Ivrea risulta essere gestita in

telecomando la notte dal Dirigente Centrale Operativo (DCO) con sede a Torino Lingotto. Solamente dal 27 Settembre 2001 la gestione della linea è passata dal Genio Ferrovieri alle Ferrovie dello Stato.

A questo punto un ultimo grosso intervento di modernizzazione della tratta Chivasso-Ivrea è stata la sua elettrificazione, conclusa il 10 Luglio 2006. A tutt'oggi la tratta Ivrea-Aosta risulta essere non elettrificata, il che ha provocato alcuni disagi ai passeggeri nel corso degli anni. Infatti, a partire dal 12 Dicembre 2010 fu fatto divieto di transito per i treni diesel all'interno del nuovo passante ferroviario di Torino. In questo modo i passeggeri provenienti da Aosta su treni diesel erano costretti ad effettuare il cambio ad Ivrea su di un treno elettrico. Tale problema si è comunque concluso con l'introduzione di nuovi treni⁵, detti bimodali.

8.1 CARATTERISTICHE TECNICHE E TRAFFICO

Come potuto apprendere leggendo la cronistoria, la linea è a singolo binario elettrificato e si sviluppa per una lunghezza di 32.431 chilometri.

In generale il gestore (R.F.I.) utilizza diversi metodi per classificare le linee, quali:

- a) In base al trasporto combinato; la codifica assegnata ad una linea indica il massimo profilo che può avere il trasporto combinato codificato per circolare su di essa come un trasporto normale.
- b) In base alla capacità di carico; le linee sono suddivise in base alla massima massa ammessa a circolare. Esistono quattro gruppi: A,B,C,D in base alla massima massa assiale supportata. La linea oggetto di studio è classificata come D, ovvero in grado di sopportare 22.5 [ton/asse].
- c) In base alle esigenze manutentive; poiché il degrado dei sottosistemi, delle apparecchiature e degli oggetti provocano una riduzione della disponibilità dell'infrastruttura alla circolazione, vengono introdotte 4 classi di categorie di

⁵ BTR 813

linee in funzione del volume di traffico (tonnellaggio giornaliero e pantografi/giorno) e della velocità della linea. Una linea di prima classe è ad esempio la Torino-Milano, di seconda la Milano-Genova, di terza la Torino-Savona e per concludere di quarta la Chivasso-Aosta.

A questo punto ulteriori caratteristiche tecniche della linea possono essere estrapolate dal Fascicolo Circolazione Linea⁶, il quale riporta la progressiva chilometrica delle stazioni, il numero di binari, il grado di frenatura, il grado di prestazione, l'ascesa, le velocità di rango consentite per ogni tratta, il sistema di distanziamento adottato, i passaggi a livello presenti lungo il tracciato e molto altro ancora. In maniera sintetica si evince che la tratta presa in considerazione risulta essere elettrificata, a semplice binario in linea, con blocco elettrico conta-assi ed attrezzata con sistema SCMT.

Per quanto riguarda invece l'andamento plano-altimetrico si può fare riferimento all'omonimo stralcio. In tale documento sono riportate le progressive chilometriche, le livellette, l'andamento planimetrico della linea ma anche altri punti di interesse quali: segnali di prima categoria, segnali di avviso, presenza di opere d'arte.

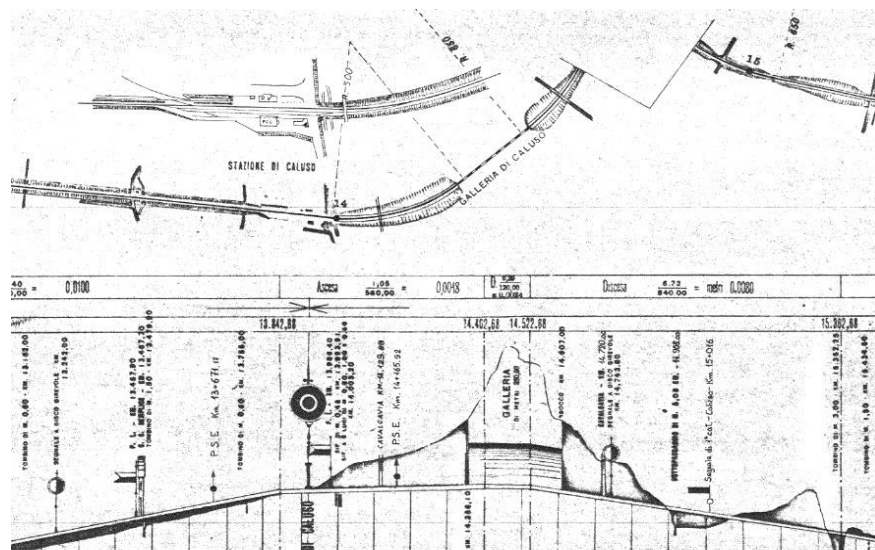


Figura 33 - Estratto del profilo plano-altimetrico nei pressi della stazione di Caluso

⁶ FCL n.5

Analizzati gli aspetti tecnici della linea, per poter avere un quadro generale di tutto il sistema d'esercizio è opportuno descrivere la tipologia di traffico ferroviario presente. Attualmente il materiale rotabile utilizzato sul tratto Chivasso-Ivrea presenta quattro vettori differenti:

- a) Elettrotreno BTR 813; chiamato “bimodale” in quanto permette di essere utilizzato ad alimentazione elettrica che diesel. Prodotto dalla Stadler, risulta essere a composizione bloccata. Possiede una lunghezza di 66.80 metri e 329 posti totali.



Figura 34 - Elettrotreno BTR 813

- b) Elettrotreno ALe501/ALe502; chiamato “Minuetto” dalla società Trenitalia. Viaggia esclusivamente per mezzo di trazione elettrica e risulta essere a composizione bloccata. Prodotto dalla Alstom Ferroviaria. Possiede una lunghezza di 51.90 metri e 320 posti totali.



Figura 35 - Elettrotreno ALe501

- c) Convoglio ALn501/ALn502; identico al treno precedente in termini di geometrie e capacità di passeggeri. L'unico aspetto che varia è il tipo di alimentazione che in questo caso risulta essere diesel.
- d) Locomotiva FS E.464; costruita da Bombardier. La composizione del convoglio non è bloccata come nei precedenti tre casi, ma è funzione del numero di carrozze che vengono attaccate alla locomotrice (di norma 5). Le carrozze utilizzate risultano essere nel dettaglio Carrozze FS MDVC/MDVE dove rispettivamente le prime possono accogliere 82 posti a sedere per uno sviluppo di 26.40 metri, mentre le seconde possono accogliere 84 posti a sedere per uno sviluppo di 26.40 metri. Invece la lunghezza della locomotrice risulta essere pari a 15.75 metri.



Figura 36 – Locomotiva FS E.464

Data la notevole differenza di materiale rotabile che percorre la linea ogni giorno si potrebbe ipotizzare come il traffico risulti essere abbastanza disomogeneo in termini di prestazioni, specie per quanto riguarda la velocità. A tal proposito però bisogna ricordare che la velocità di rango è funzione sia delle caratteristiche geometriche di una linea, ma anche dal tipo di materiale rotabile che la percorre. Proprio questo ultimo aspetto risulta estremamente importante in questa analisi in quanto materiali circolanti come rango A possono essere classificati convogli di vecchia concezione e realizzazione, oppure carri merci. Allora, tutte le tipologie di convogli circolanti sulla linea Ivrea-Chivasso risultano appartenere al rango B ed essendo tutti omologati per poter raggiungere la velocità massima di rango

presente sulla linea, la circolazione può essere assunta come omotachica. A supporto di tale affermazione si riporta un estrapolato dell'orario grafico in vigore sulla linea.

SEZIONE CHIVASSO-AOSTA-PRE S.DIDIER

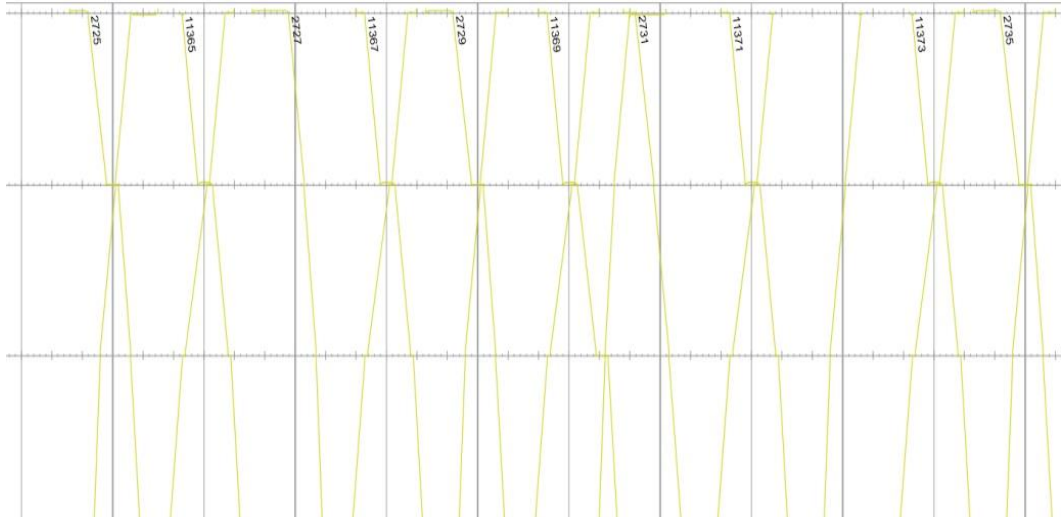


Figura 37 - Estratto dell'orario grafico sulla linea Chivasso-Aosta

Ricordando che l'orario grafico riporta in ascisse il tempo ed in ordinate lo spazio risulta:

$$dV = \frac{ds}{dt}$$

Il che vuol dire che la pendenza delle rette gialle in Figura 37 rappresenta la velocità che hanno i convogli. Essendo tutte uguali si può ritenere che la circolazione sia di tipo omotachico. Per concludere si vuole evidenziare che per ragioni manutentive e commerciali la linea risulta non percorsa da treni nelle ore serali, in particolare dalle ore 00:00 alle ore 05:15 circa.

8.2 UTILIZZO E CRITICITA' DELLA LINEA

Analizzata la linea sotto il punto di vista tecnico e tipologico di traffico si è ritenuto importante evidenziare le criticità riguardanti la qualità del servizio offerto manifestatesi nel corso degli anni e tutt'ora presenti. Si è così cercato materiale

negli archivi storici di giornali locali, contattata l'”Associazione Utenti Ferrovia Chivasso-Ivrea-Aosta”, interpellate diverse figure che hanno lavorato e ancora lavorano su tale linea e analizzati gli orari e i tipi di collegamenti presenti tra le varie stazioni.

Per quanto riguarda le prime due voci si sono riscontrate le seguenti criticità:

- a) Articolo “La Stampa” del 22-01-2009; per migliorare il servizio ferroviario veniva già citato un possibile raddoppio selettivo di binario.
- b) Articolo “La Repubblica” del 12-01-2012; essendo una linea a singolo binario, qualora vi fossero mal funzionamenti i treni accumulerebbero troppo ritardo.
- c) Articolo “La Stampa” del 10-01-2019; elevata densità di passaggi a livello lungo la linea i quali a causa di mal funzionamenti sono causa di instabilità d’orario. Nasce così l’accordo di soppressione di molti passaggi a livello lungo la linea.
- d) Avendo avuto modo di parlare direttamente con il Presidente del “Associazione Utenti Ferrovia Chivasso – Ivrea – Aosta”, in data 20-03-2021, sono emerse le seguenti segnalazioni e suggerimenti:
 - i. Negli accordi di chiusura dei p.l. non si vogliono chiudere quelli più importanti, ma si tenta di evitare intersezioni a raso tra corpo stradale e ferrovia per mezzo di sottovia, cavalcavia.
 - ii. Nel caso di guasti straordinari il tempo medio di ritardo per situazioni “favorevoli” è di circa mezz’ora/un’ora, mentre nei casi peggiori tale finestra temporale si dilata notevolmente causando la soppressione di alcuni treni.
 - iii. Per quanto riguarda i p.l. in particolare da rivedere la gestione di quello situato al chilometro 25+020 per i treni pari, in quanto chiude troppo presto causando notevole traffico.

- iv. L'associazione ritiene che i tempi di percorrenza ad oggi siano accettabili e pertanto non vorrebbe veder ridotto il numero di fermate intermedie.
- v. Si riscontra un'ora di morbida della domanda di trasporto tra le ore 9:30 – 11:30.
- vi. I treni maggiormente utilizzati dai viaggiatori sono i diretti del mattino verso Torino delle ore 6:24, 7:42 ed i diretti di ritorno delle ore 14:25, 17:25 e 18:25 . Inoltre, pochi passeggeri che utilizzano il treno locale Ivrea-Novara si fermano nella stazione di Chivasso.
- vii. I principali incroci tra convogli si verificano nelle stazioni di Strambino, Caluso e Montanaro.

Analizzando invece gli orari programmati dal gestore dell'infrastruttura si sono estrapolati i seguenti dati:

a) Nelle ore di punta del mattino i treni per Torino risultano:

Partenza	Dest.intermedia	Part.intermedia	Destinazione	Cambi	Ora partenza	Ora arrivo
Ivrea	-	-	Torino P.N.	-	6:24	7:35
Ivrea	Chivasso	Chivasso	Torino P.N.	1	6:50	8:06
Ivrea	Chivasso	Chivasso	Torino P.N.	1	7:07	8:35
Ivrea	-	-	Torino P.N.	-	7:42	8:40

Tabella 7 - Treni del mattino diretti a Torino Porta Nuova

b) Nelle ore di punta del pomeriggio i treni per Ivrea sono i seguenti:

Partenza	Dest.intermedia	Part.intermedia	Destinazione	Cambi	Ora partenza	Ora arrivo
Torino P.N.	Chivasso	Chivasso	Ivrea	1	16:54	18:08
Torino P.N.	Chivasso	Chivasso	Ivrea	1	17:25	18:21
Torino P.N.	Chivasso	Chivasso	Ivrea	1	17:54	19:08
Torino P.N.	-	-	Ivrea	-	18:25	19:21

Tabella 8 - Treni del pomeriggio/sera diretti ad Ivrea

Osservando le due tabelle si comprendere come il servizio mattutino e pomeridiano possa essere modificato, tentando di inserire maggiori collegamenti diretti tra Ivrea e Torino così da non costringere gli utenti ad effettuare il cambio treno nella città di Chivasso. A tal proposito si ricorda infatti che la linea analizzata, sotto il punto di vista del servizio viaggiatori, appartiene alla tratta Ivrea-Torino, pertanto sarebbe limitativo e poco funzionale fermarsi alla stazione di Chivasso in questo caso.

Infine, avendo la possibilità di lavorare quotidianamente su tale linea ed essendo riuscito a recuperare informazioni dal personale che per anni ha lavorato e tutt'ora lavora su di essa, non si possono che confermare alcune delle criticità evidenziate in precedenza, quale ad esempio l'elevata concentrazione di p.l. nei 32 chilometri estensione tra Chivasso e Ivrea.

Inoltre, essendo la linea a singolo binario e gestita da blocco elettrico conta assi non è possibile effettuare incroci e/o precedenza se non nelle stazioni e con movimenti da parte dei due treni che non possono essere svolti contemporaneamente.

Pertanto, esposte le principali criticità che nel corso degli anni si sono manifestate ed avendone avuto un riscontro pratico si vuole tentare, in maniera razionale, di limitare quanto più possibile tali problematiche.

8.3 RISCONTRO CON LA LETTERATURA SCIENTIFICA

Per quanto riguarda la tipologia di interventi da realizzare su linee a semplice binario e gestite in maniera analoga alla Chivasso-Ivrea, nel seguente paragrafo, si è voluto riportare l'approccio seguito dalla letteratura scientifica (progetti, pubblicazioni e/o tesi universitarie), che è poi risultato essere la base di partenza degli interventi proposti in questa sede.

Risulta così lecito citare le tesi magistrali di Ragno e Ognibene, svolte presso il Politecnico di Torino e atte a simulare e costruire modelli di esercizio ferroviario per il potenziamento del servizio e aumento della stabilità sulle linee Torino – Alba e Torino – Pinerolo. Infatti, in entrambi i casi, punto fondamentale di partenza era la riorganizzazione del servizio offerto, a causa dei ritardi presenti sulla linea. La linea Torino – Alba, infatti, è per due terzi della sua estesa a singolo binario e il servizio offerto attualmente è a cadenzamento orario nei giorni feriali. Per tale motivo, l'autore della tesi ha voluto modellare differenti scenari dove nello specifico è stato proposto un nuovo servizio di cadenzamenti (intervenendo così sugli orari delle corse dei treni), la possibilità di effettuare incroci contemporanei in determinate stazioni, la riattivazione di alcuni binari dismessi di alcune località ed infine aumentare i punti di incrocio dei treni (ovvero trasformare le fermate in stazioni con relativo raddoppio di binario in quella località). Anche per quanto riguarda la linea Torino – Pinerolo sostanzialmente i problemi iniziali risultavano essere gli stessi, con eccezione che la stessa risulta essere interamente a singolo binario e con un'alta densità di passaggi a livello. Per tale motivo, oltre agli interventi proposti sulla linea Torino – Alba, in questo caso si è anche simulata la possibilità di realizzare diversi raddoppi selettivi in più tratte. Raddoppi che hanno permesso l'incrocio in linea dei convogli, diminuendo i tempi di percorrenza e aumentando la stabilità d'orario. Proprio in riferimento a quest'ultima si è anche notato come l'elevata concentrazione di p.l. lungo l'infrastruttura sia causa di maggior incertezza per quel che riguarda la stabilità d'orario (proprio come accade sulla linea Chivasso – Ivrea) e per tale motivo, anche se non esplicitamente esposto, l'unica soluzione è la diminuzione del numero degli stessi. Infine, è stato evidenziato come organizzare il trasporto ferroviario nelle diverse fasce della

giornata: privilegiando un servizio “veloce” (treni diretti) nelle ore di punta e “lento” (treni che effettuano tutte le fermate) nelle altre ore della giornata.

Oltre al materiale didattico sopra citato, ricercando sul web si è potuto trovare un progetto definitivo delle Ferrovie Appulo Lucane. La tratta in questione è compresa tra le stazioni di Matera e Venusio con sviluppo di 3.5 chilometri. Essa è a singolo binario e attualmente risente principalmente di mancanza di capacità. Pertanto, il progetto prevede la realizzazione del raddoppio selettivo in corrispondenza della stazione di Venusio ed il conseguente incrocio dinamico dei treni.

Un altro documento consultato è il seguente: *“Increasing the capacity of a single-track track line”*, edito da Emery D., in occasione della conferenza svizzera sulla ricerca dei trasporti. L’autore ha voluto evidenziare quali fossero le principali problematiche delle linee a singolo binario e per esse individuare quali fossero le migliori soluzioni di intervento realizzabili. I parametri influenzano maggiormente la capacità di linee di questo tipo (ma anche di più importanti) sono: numero dei treni, stabilità d’orario, eterogeneità del parco rotabile operate sull’infrastruttura e la velocità media di percorrenza. Per non scendere in dettagli che potrebbero esulare da tale trattazione, il risultato finale delle analisi svolte dall’autore dell’articolo sono che le uniche soluzioni possibili risultano essere l’attivazione di nuove stazioni che permettano l’incrocio dei treni, oppure la realizzazione di raddoppi selettivi e/o completi.

Infine, si potrebbero citare anche i lavori svolti per il raddoppio selettivo delle ferrovie liguri e i progetti di raddoppio selettivo ancora da realizzare sulle stesse (Andora-Finale Ligure). Da sottolineare il fatto che per garantire una maggior sicurezza, la linea è stata portata nell’entroterra subendo un cambio di tracciato e la stessa verrà attrezzata con sistema SCMT, senza il quale non sarebbe possibile, ad esempio, effettuare incroci contemporanei nelle stazioni su linee a singolo binario.

Quindi, seppur in maniera sintetica, si sono voluti riportare questi esempi in modo da evidenziare come le scelte progettuali e di simulazione proposte in seguito, non siano solamente una proposta personale, ma anche un raffronto con quanto è stato

proposto ed effettivamente realizzato nel corso degli anni, portando miglioramenti laddove si sono realizzati tali tipi di interventi.

9. IL SOFTWARE OPENTRACK

OpenTrack è stato utilizzato per simulare la circolazione ferroviaria attualmente vigente sull'infrastruttura e da essa sviluppare miglioramenti tramite opportune modifiche.

A tal fine si vuole presentare in maniera sintetica, ma concisa, il suo funzionamento, evidenziando quali siano i dati di input da introdurre, le operazioni logiche che esegue il software ed infine gli output restituiti (fondamentali per poter comprendere quali azioni correttive eseguire).

In maniera del tutto generale si può identificare lo schema di funzionamento nel seguente modo:

- a) Input; forniti dall'utilizzatore e nello specifico riguardanti le caratteristiche meccaniche del materiale rotabile, dati geometrico-costruttivi dell'infrastruttura ed attuali orari programmati.
- b) Simulazione; lo scopo principale è quello di ottimizzare i servizi offerti definiti in input. Vi è una costante interazione tra dati infrastrutturali e moto del treno, dove i primi risultano essere di natura discreta mentre i secondi di natura continua.
- c) Output; ne esistono di diversi tipi ed in base alle esigenze vengono preimpostati dall'utente. Tra i più noti e utilizzati si riscontrano i diagrammi Spazio-Velocità e Spazio-Tempo, le occupazioni delle tratte, dati statistici quali numeri di treni/giorno o treni/ora in una determinata sezione dell'infrastruttura, orari effettivi di partenza e arrivo nelle diverse località.

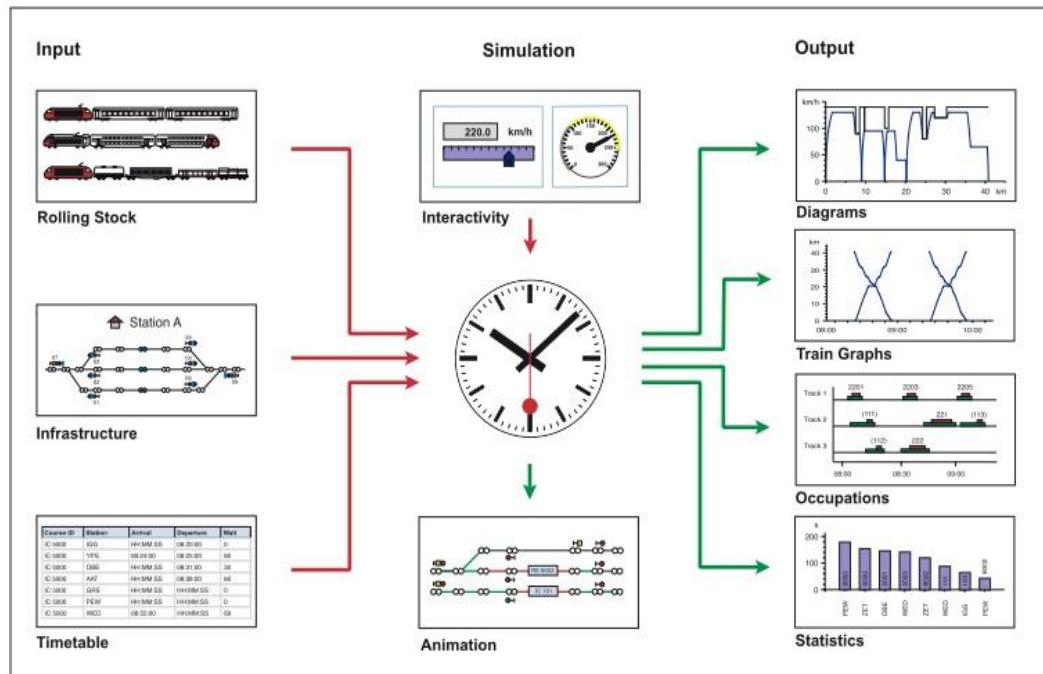


Figura 38 - Schema illustrante il funzionamento del software OpenTrack

In maggior dettaglio e con rimandi ai dati effettivamente inseriti si espone quanto presentato sopra.

9.1 INPUT DATA

Al suo interno sono presenti:

- Materiale rotabile; le specifiche riguardanti la motorizzazione utilizzata sono contenute in un database salvato come file “.depot”. In tale database sono presenti dati precaricati, oppure in caso di necessità si possono inserire nuovi elementi. Le informazioni principali che si trovano sono: caratteristiche meccaniche di trazione, peso, lunghezza, attriti, tipologia di treno, priorità. Nello specifico per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche di trazione, siccome non si è riusciti a recuperare informazioni dalle relative case costruttrici e non avendo trovato materiale di letteratura a riguardo, si è partiti dalla conoscenza della potenza oraria utilizzata dal convoglio per giungere allo sforzo di trazione secondo la seguente formula:

$$P = Tv \rightarrow T = \frac{P}{v}$$

Dove; P è la potenza [W], T è la trazione generata [kN] e v è la velocità del treno [m/s]. Il limite superiore dello sforzo massimo di trazione è fornito dal costruttore e i dati sono stati recuperati in letteratura. In questo modo si è potuta ricostruire la curva di trazione dei convogli con intervallo di 10 [km/h].

Per garantire però un corretto calcolo di tale curva si è deciso di utilizzare l'integrazione tabellare per avere un riscontro numerico di quanto spazio serve al treno per raggiungere una certa velocità, incontrando determinate caratteristiche infrastrutturali (pendenza, raggio di curvatura). Ricordando le definizioni delle resistenze al moto fornite al punto 4.3 si è utilizzata l'equazione della trazione:

$$T - \sum_i R_i = ma$$

Si riporta a titolo di esempio la tabella relativa al BTR813.

V	T	r _{ORD}	R _{ORD}	R _i	R _{curva}	r _c (Von Rock)	R _c	T-R ₀ -R _i -R _c	a	ΔV	a _{media}	V _{media}	Δt	ΔS	Σt	ΣS
[km/h]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	[m]	[-]	[kN]	[kN]	[m/s ²]	[km/h]	[m/s ²]	[km/h]	[s]	[m]	[s]	[m]
0	200	0.0019	2.61	9.75	1150	0.0006	0.78	186.86276	1.24	0	0.00	0	0	0.00	0	0.00
10	200	0.0019	2.65	9.75	1150	0.0006	0.78	186.82705	1.24	10	1.24	5	2.2	3.12	2.2	3.12
20	200	0.0020	2.75	9.75	1150	0.0006	0.78	186.71993	1.23	10	1.24	15	2.2	9.37	4.5	12.49
30	200	0.0021	2.93	9.75	1150	0.0006	0.78	186.54138	1.23	10	1.23	25	2.3	15.63	6.7	28.12
40	200	0.0023	3.18	9.75	1150	0.0006	0.78	186.29142	1.23	10	1.23	35	2.3	21.90	9.0	50.02
50	187	0.0026	3.50	9.75	1150	0.0006	0.78	173.17005	1.15	10	1.19	45	2.3	29.21	11.3	79.23
60	156	0.0028	3.89	9.75	1150	0.0006	0.78	141.57726	0.94	10	1.04	55	2.7	40.77	14.0	120.01
70	134	0.0032	4.36	9.75	1150	0.0006	0.78	118.82733	0.79	10	0.86	65	3.2	58.24	17.2	178.25
80	117	0.0036	4.89	9.75	1150	0.0006	0.78	101.57742	0.67	10	0.73	75	3.8	79.40	21.0	257.65
90	104	0.0040	5.50	9.75	1150	0.0006	0.78	87.970379	0.58	10	0.63	85	4.4	104.63	25.5	362.28
100	94	0.0045	6.18	9.75	1150	0.0006	0.78	76.891919	0.51	10	0.55	95	5.1	134.46	30.6	496.74
110	85	0.0050	6.93	9.75	1150	0.0006	0.78	67.632952	0.45	10	0.48	105	5.8	169.52	36.4	666.26
120	78	0.0056	7.75	9.75	1150	0.0006	0.78	59.720749	0.39	10	0.42	115	6.6	210.70	43.0	876.96
130	72	0.0063	8.64	9.75	1150	0.0006	0.78	52.828039	0.35	10	0.37	125	7.5	259.15	50.4	1136.11

Figura 39 - Estratto integrazione tabellare BTR813

- b) Infrastruttura; consiste nella descrizione geometrica dell'infrastruttura. I dati utilizzati sono stati ottenuti tramite la consultazione di vari documenti quali: profilo plano-altimetrico della linea, fascicolo circolazione linea, tabellino delle curve, piani schematici delle stazioni.

L'infrastruttura rappresentata in OpenTrack include diversi elementi quali: segnali, stazioni, "edges" e "vertices". Per quanto riguarda questi ultimi due bisogna specificare che essi non sono realmente presenti sull'infrastruttura. I

“vertices”, infatti, vengono inseriti dall’utente ogni volta che l’infrastruttura presenti variazioni geometriche (cambio di livelletta, presenza di curve, deviatoi, passaggi a livello, segnali, ecc...). Due “vertices” sono uniti tra loro per mezzo di un “edges” il quale rappresenta graficamente un segmento della linea e al quale possono essere conferiti attributi come ad esempio lunghezza del tratto, velocità di percorrenza, raggio di curvatura.

L’insieme di questi due elementi permette così di definire in maniera completa l’infrastruttura. Un esempio di quanto esposto può essere osservato nella figura sottostante.

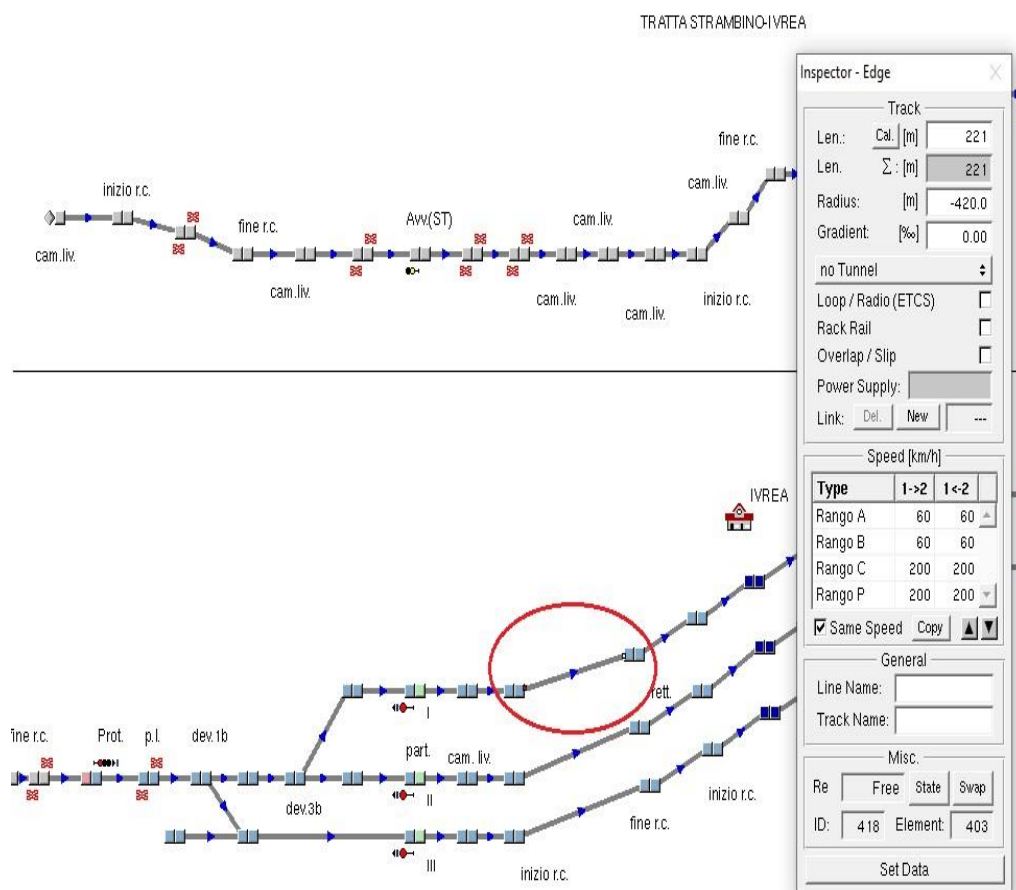


Figura 40 - Estratto di rappresentazione dell'infrastruttura

Come si può vedere in rosso è cerchiato un “edges” compreso tra due “vertices” e sulla destra è aperta la scheda attributi dello stesso. Inoltre, grazie a questi due elementi si possono definire i “safety elements”, ovvero parti del tracciato che possono essere occupate solamente da un treno alla volta. La costruzione

di tali elementi è generata automaticamente da OpenTrack nel momento in cui vengono disegnati sul foglio di lavoro rispettando la seguente regola: gli “edges” che si toccano in un “vertex” appartengono allo stesso “safety element”.

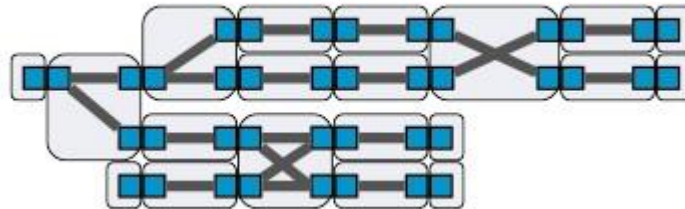


Figura 41 - Visualizzazione grafica di molteplici safety elements

- c) Orari programmati; al suo interno sono contenuti tutti gli orari di arrivo e partenza di ogni treno in ogni stazione. Inoltre, sono definiti gli incroci che i convogli dovranno effettuare nelle stazioni così come i tempi di attesa prima di poter ripartire.

Timetable

Course ID	Station	Arrival	Departure	Wait	Stop	M.
11304	08IVR	HH:MM:SS	07:07:00	0	✓	0
11304	07STR	07:13:00	07:14:00	60	✓	0
11304	05CAN	07:20:00	07:25:00	300	✓	0
11304	04CAL	07:29:00	07:30:00	60	✓	0
11304	03ROD	07:33:00	07:38:00	300	✓	0
11304	02MON	07:43:00	07:44:00	60	✓	0
11304	01CHI	07:50:00	HH:MM:SS	0	✓	0
11314	08IVR	HH:MM:SS	06:50:00	0	✓	0
11314	07STR	06:56:00	06:57:00	60	✓	0

Add Rows Ins.Rows Del. Rows Remove Stops Add Stops Wait [s]: 60

Course ID	Station	Min. Wait	Max. Wait	Join	Split
11314	01CHI	00:24:00	HH:MM:SS	✓	✓

Show Conn. Course Ins. Connection Del. Connection

Interval 68 Courses 441 Entries

Course ID: +2 Delta Time: + 01:00:00

☐ Keep Interval References ☐ Keep Interval Ref. for Delays ☒ Update Courses / Services

Create 1 Courses

Actual Course ID: 11304 Ref. Course ID: Train: E.464 Train Speedtype: Rango B Train Category: Category 1

☐ Show Operations ☐ Show Day ☐ Show Use Departure Time
☐ Show Stationnames ☐ Show actual Data Adjust Planned Data
☐ Show Stops only ☐ Show Delay Colors

Sync. Delete Update Save DB Add Move Sort Show All Show

Figura 42 - Estratto di orari programmati

9.2 SIMULAZIONE

Come più volte citato, scopo principale di tale tesi è ottimizzare le corse dei convogli per mezzo dei dati ricevuti in input; infatti, i vincoli alla simulazione sono proprio le caratteristiche infrastrutturali, la tipologia di materiale rotabile e la programmazione di incroci.

OpenTrack utilizza una così detta “mixed simulation”, ovvero si avvale di elementi continui e discreti. Per quanto riguarda i primi si fa riferimento al movimento dei treni per i quali vengono utilizzate le equazioni differenziali del moto, mentre per i secondi si fa riferimento agli elementi di sicurezza quali ad esempio i segnali.

Per risolvere l’equazione differenziale del moto, il software utilizza un metodo numerico (Metodo di Eulero) e parte dall’equazione base della dinamica:

$$F = ma \rightarrow a = \frac{F}{m}$$

Dove F, m, a sono rispettivamente lo sforzo di trazione [N], la massa del treno [kg] e l’accelerazione del treno [m/s²].

Per poter far sì che si sviluppi del moto la forza di trazione trasmessa al binario deve essere maggiore delle forze di resistenza (come già visto). Proprio la loro differenza viene definita come “Traction Power Surplus” e può essere espressa come:

$$F_z = Z(v) - R_F(v, s) \quad [N]$$

Dove:

-F_z; sforzo di trazione in eccesso [N]

-Z; sforzo di trazione [N]. È funzione della curva di sforzo di trazione-velocità e delle condizioni meteo applicate

-R_F; resistenze [N]. È funzione della velocità e della tortuosità del tracciato

-v; velocità [m/s]

-s; distanza percorsa [m]

La massima velocità di accelerazione, tecnicamente ammissibile, viene raggiunta se l'intero sforzo di trazione in eccesso (F_z) viene capitalizzato nell'accelerazione del treno. In questo caso la resistenza all'accelerazione è uguale all'eccesso di potenza di trazione, da cui ne consegue:

$$a = \frac{F_z}{m(1 + 0.01\rho)}$$

Dove m e ρ sono rispettivamente la massa del treno $[kg]$ e il coefficiente di omogenizzazione delle masse rotanti $[-]$.

Il metodo di Eulero lavora calcolando la variazione di una variabile da un dato punto di partenza:

$$v(t) = v(t + \Delta t) + \Delta t \frac{dv}{dt}(t - \Delta t); v(t_0) = v_0$$

OpenTrack oltre a modellare il moto del treno modella anche il comportamento in frenata dello stesso, ma data la grande difficoltà di tale operazione il software adotta un modello semplificato che si basa sulle caratteristiche di frenatura di ogni differente locomotiva e fornisce vari valori di decelerazione per determinati intervalli di velocità.

$v_{\text{von}} \text{ [km/h]}$	$v_{\text{bis}} \text{ [km/h]}$	$a \text{ [m/s}^2\text{]}$
v_{max}	100	- 0,4
100	40	- 0,5
40	0	- 0,6

Figura 43 - Esempio di modellizzazione della frenatura per una determinata locomotiva

Infine, OpenTrack durante la simulazione, per impedire collisioni di convogli adotta sistemi di protezione, i quali devono soddisfare determinate condizioni:

- Ogni sezione del tracciato è riservata a nessun treno o al massimo un solo treno
- Ogni treno deve essere in grado di arrestarsi all'interno della sezione del tracciato a lui riservata

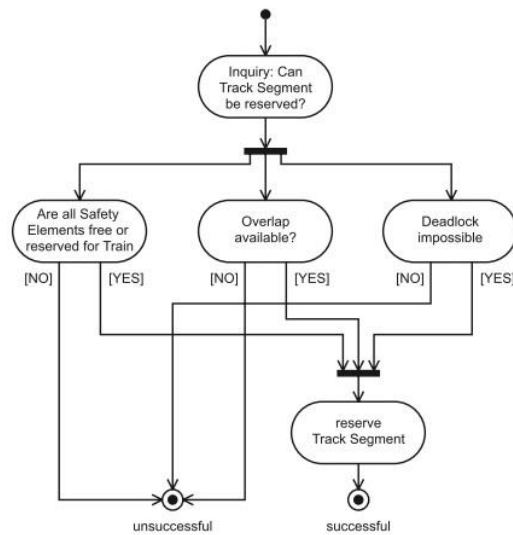


Figura 44 - Operazioni logiche che segue OpenTrack per riservare un segmento di tracciato

9.3 OUTPUT

Dallo stesso menù dal quale viene lanciata la simulazione si possono decidere quali output far generare al programma. Tali documenti verranno salvati in una cartella di lavoro definita dall'utente e in base alle informazioni contenute presenteranno estensioni differenti. Ad ogni modo i file di output potranno essere tutti editati per mezzo di un blocco note oppure di un foglio elettronico, dove per ogni treno si avranno i corrispettivi file di output scelti prima di lanciare la simulazione.

Si ricorda che i risultati della simulazione comprendono differenti aspetti quali diagrammi spazio-tempo, velocità-spazio, caratteristiche specifiche di un determinato punto della linea quali ad esempio il numero di treni/giorno o treni/ora transitanti, eventuali ritardi, malfunzionamenti e molto altro.

Per mezzo di tali informazioni si è così rivalutata l'offerta attualmente proposta del servizio, intervenendo sul materiale rotabile e sull'infrastruttura.

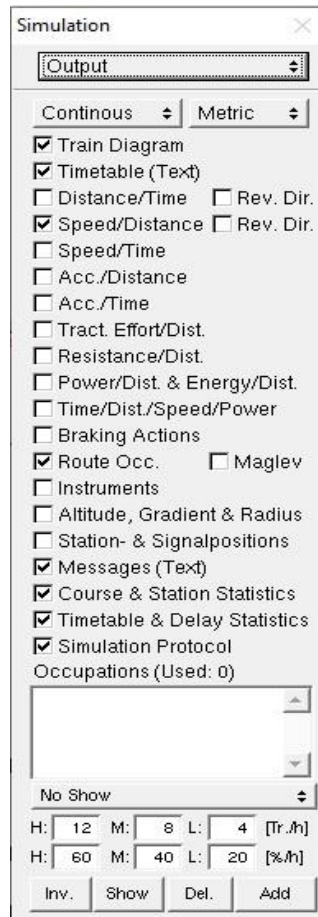


Figura 45 - Finestra per scegliere gli output da visualizzare a seguito della simulazione

9.4 ULTERIORI SPECIFICHE E IMPOSTAZIONI

Quanto visto finora è una presentazione generica, seppur esaustiva, di quali dati siano stati necessari introdurre per poter modellizzare l'intero sistema ferroviario della linea Chivasso-Ivrea. In questo paragrafo però si vuole scendere maggiormente nel dettaglio del funzionamento del software per permettere di mettere in luce ulteriori operazioni logiche dello stesso.

Si introducono pertanto quattro concetti principali:

- a) Route; è il primo livello di descrizione nel movimento dei treni. È un set di vertices + edges collegati tra loro. Tale costrutto può essere pensato come una sezione di una traccia. Una "route" inizia e finisce sempre ad un segnale di

prima categoria, inoltre un secondo treno potrà occupare la stessa “route” solo dopo che il treno che precede l’abbia liberata.



Figura 46 - Esempio di "route"

- b) Path; è il secondo livello di descrizione nel movimento dei treni. È un set di “route” e può essere pensato come sezione di una traccia in una certa area. Per la sua definizione si utilizza un’apposita maschera “Path Inspector” all’interno della quale vengono suggerite possibili combinazioni di “route” precedentemente introdotte.
- c) Itinerary; è il terzo livello di descrizione nel movimento dei treni. È un set di “path”.
- d) Course; è un insieme di “itinerary” ai quali vengono associati dati di pianificazione. Tale costrutto può essere pensato come una corsa. Nella sua definizione in OpenTrack andrà specificato il numero del treno, la tipologia di materiale rotabile, il rango di velocità di appartenenza, l’itinerario associato e la priorità che lo stesso assume. Infatti, ad uno stesso treno si potranno associare differenti itinerari con differenti priorità. Il software cercherà di riservare il percorso con priorità maggiore, ma qualora non vi riuscisse scalerà a quello di priorità inferiore e così via, sino a quando il treno non giungerà a destinazione.

Mentre i primi tre punti sono relativi all’infrastruttura e quindi non presentano informazioni di movimento associate, l’ultimo punto è relativo all’orario grafico e sono combinazioni definite dall’utente di dati di orario con l’infrastruttura usata dal treno. Definita la corsa al punto “c”, l’utente ha la possibilità di definire nella tabella degli orari (timetable) in quali stazioni e quale tipologia di incrocio i treni debbano rispettare (connections).

In questo modo risulta chiaro come sia stata modellata l’infrastruttura e quali siano le relazioni che si instaurano tra infrastruttura, materiale rotabile e orari di servizio.

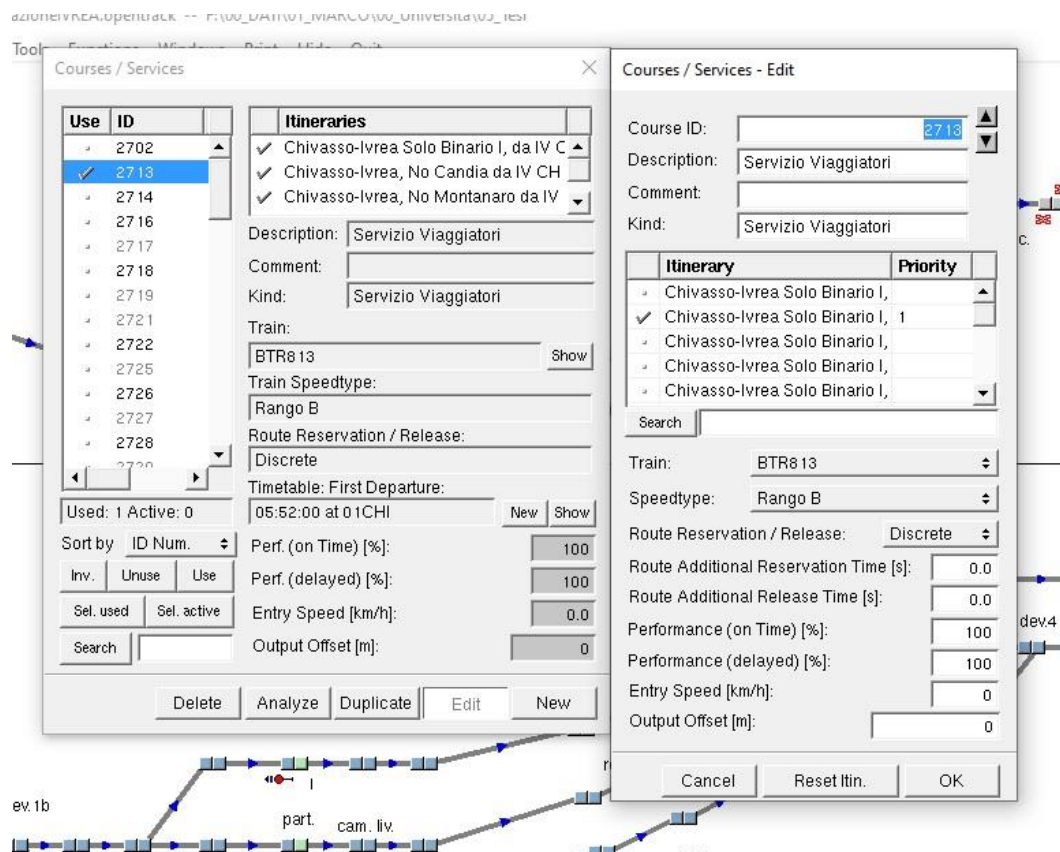


Figura 47 - Esempio di definizione di una course

10. SIMULAZIONE DEGLI SCENARI

Definiti tutti i dati di input si è potuto procedere con la simulazione vera e propria. Per fare ciò si sono dovuti definire a priori differenti scenari che potevano manifestarsi. Come scenario di riferimento (Scenario 0) si è adottato l'attuale esercizio della linea prevedendo condizioni standard di aderenza, assenza di ritardi e/o eventi accidentali.

Per poter valutare la qualità dei servizi offerti durante tutto l'anno si sono quindi variate le condizioni di aderenza, introdotti malfunzionamenti e/o ritardi, i quali come si vedrà, avranno ripercussioni sulla stabilità d'orario.

Lo step successivo è stato, sulla base dei dati di output ottenuti ed analizzati, capire in quali stazioni potevano avvenire incroci con movimenti contemporanei, introdurre un raddoppio selettivo del binario in alcune tratte ed infine optare per il raddoppio integrale. Anche in questo caso si sono analizzati scenari differenti e in più sono stati sostituiti alcuni treni (E.464) con mezzi più recenti (ETR421) in modo da migliorare ulteriormente le caratteristiche meccaniche del parco rotabile, senza pregiudicare le capacità di carico dei convogli (anzi migliorandola).

Di seguito si riporta l'elenco di tutti gli scenari presi in considerazione e trattati con maggior dettaglio nei successivi paragrafi:

- a) SCENARIO 0; è lo stato di fatto e rappresenta l'attuale gestione della linea. Pertanto, vi è la presenza del singolo binario, condizioni standard di aderenza, assenza di ritardi e assenza di eventi accidentali
- b) SCENARIO 1; Singolo binario, condizioni standard di aderenza, presenza di ritardi, presenza di eventi accidentali
- c) SCENARIO 2; Singolo binario, condizioni scadenti di aderenza, presenza di ritardi, presenza di eventi accidentali
- d) SCENARIO 3; Singolo binario, condizioni standard di aderenza, assenza di ritardi, assenza di eventi accidentali, possibilità di effettuare incroci in contemporaneo (stazioni di Montanaro, Caluso e Strambino)

- e) SCENARIO 4; Singolo binario, condizioni standard di aderenza, assenza di ritardi, assenza di eventi accidentali, possibilità di effettuare incroci in contemporaneo (stazioni di Montanaro, Caluso e Strambino), sostituzione dei convogli E.464 con gli ETR421
- f) SCENARIO 5; Raddoppio selettivo, condizioni standard di aderenza, assenza di ritardi, assenza di eventi accidentali, possibilità di effettuare incroci in contemporaneo (stazioni di Caluso e Strambino)
- g) SCENARIO 6; Raddoppio selettivo, condizioni standard di aderenza, assenza di ritardi, assenza di eventi accidentali, sostituzione dei convogli E.464 con gli ETR421, possibilità di effettuare incroci in contemporaneo (stazioni di Caluso e Strambino)
- h) SCENARIO 7; Raddoppio selettivo, condizioni standard di aderenza, presenza di ritardi, presenza di eventi accidentali, possibilità di effettuare incroci in contemporaneo (stazioni di Caluso e Strambino)
- i) SCENARIO 8; Raddoppio selettivo, condizioni scadenti di aderenza, presenza di ritardi, presenza di eventi accidentali, possibilità di effettuare incroci in contemporaneo (stazioni di Caluso e Strambino)
- j) SCENARIO 9; Raddoppio completo, apertura del IV binario di Ivrea, condizioni standard di aderenza, assenza di ritardi, assenza di eventi accidentali, soppressione di alcuni passaggi a livello, sostituzione dei convogli E.464 con gli ETR421

10.1 SCENARIO 0; ATTUALE ESERCIZIO DELLA LINEA

Come introdotto nel paragrafo precedente, tale scenario rappresenta una giornata tipo ovvero paragonabile ad un giorno standard di esercizio della linea. Pertanto, lo scenario stesso è stato utilizzato anche come metodo di calibrazione dei risultati ottenuti dall'elaborazione del software rispetto ai dati teorici forniti da Rete Ferroviaria Italiana

Nello specifico si è paragonato l'orario grafico teorico con quello simulato e si è potuto riscontrare come i due possano ritenersi molto simili.

Si è notato infatti come l'orario simulato rispetti quasi fedelmente l'orario teorico. Anche se in alcuni punti i due non coincidono in maniera esatta viene comunque ritenuto influente ai fini della simulazione. Infatti, le tracce orarie che presentano una maggiore differenza risultano essere quelle relative a materiale vuoto ovvero non svolgente servizio viaggiatori. I ritardi accumulati da questa tipologia di treni come appurato da dati di dettaglio non influiscono sul moto dei treni che svolgono il servizio viaggiatori, inoltre i ritardi sopra citati sono di piccola entità (20" circa), pertanto si è giunti alla conclusione che il modello simulato si possa ritenere valido.

Dal particolare dell'orario grafico si sono notati alcuni intervalli temporali privi di circolazione. Specialmente nella fascia oraria compresa tra le 10:30 e le 11:30 si nota un buco temporale volutamente predisposto per sopperire a molteplici esigenze: garantire intervalli di manutenzione programmata dell'infrastruttura, permettere di recuperare eventuali ritardi accumulati durante la mattinata.

Per meglio comprendere le condizioni di saturazione della linea si è inoltre utilizzata la Fiche UIC 406 R, la quale evidenzia se la stessa risulti o meno congestionata e nel caso in cui non lo fosse, la capacità consumata e quella residua. Il metodo di calcolo non è sviluppato per essere applicato a linee di nuova costruzione, ma si deve adattare a quelle già esistenti e al modo in cui vengono gestite.

Come prima assunzione si è considerata la circolazione come omotachica in quanto le curve di occupazione dei treni risultavano essere poco differenti le une dalle altre, con scarti veramente irrilevanti. Tramite l'orario grafico si è poi individuato l'orario di massima congestione, che è risultato essere compreso tra le 07:00:00 e le 09:00:00 nella tratta compresa tra Rodallo e Candia. Tale tratta presenta un'estensione di 6830 [m] e vede il susseguirsi di 9 treni nell'intervallo di tempo indicato. Si è osservato che ogni treno mediamente impiega 12 minuti a percorrere tale spazio; pertanto, è stato possibile calcolare il tempo di occupazione:

$$OC = n^{\circ}treni * t_{occupazione} = 9 * 12 * 60 = 6480 [s] = 108 [min]$$

Noto tale valore, si può risalire al tempo di occupazione relativo (OTR):

$$OTR = \frac{OT}{\text{finestra temporale osservazione}} = \frac{6480}{2 * 60 * 60} = 0.090 = 90\%$$

Per poter capire se la linea risulta essere congestionata bisogna confrontare il valore ottenuto con la tabella fornita dalla Fiche, la quale in base alla tipologia di linea e al massimo rapporto fra tempo di occupazione totale dell'infrastruttura e finestra temporale considerata fornisce un'indicazione numerica di ciò. Considerandola linea come "Riservata al traffico passeggeri suburbano", e con una "Finestra temporale pari all'ora di punta" il valore limite fornito dalla Fiche risulta essere pari al 85%. Siccome $90\% > 85\%$ la linea risulta essere congestionata pertanto è altamente sconsigliato inserire eventuali nuove tracce. Inoltre, risultando congestionata non è possibile calcolare la capacità residua della stessa.

Si può comprendere come la linea attuale sia ai limiti della propria capacità, pertanto, anche una sola piccola perturbazione potrebbe portare il sistema a saturazione. A conferma di quanto sconsigliato in precedenza a riguardo del possibile aumento del numero di tracce, bisogna considerare che un margine di capacità residua vada mantenuto. Tale margine, infatti, risulterà utile alla manutenzione ordinaria dell'infrastruttura e per sanare eventuali anomalie che dovessero verificarsi nell'arco della giornata.

In definitiva tale scenario è stato utile per poter calibrare il software di simulazione, potendo riscontrare eventuali errori nei dati di input e al tempo stesso ha evidenziato quali potrebbero essere i punti critici del sistema in uso attualmente.

10.2 SCENARIO 1; ATTUALE ESERCIZIO DELLA LINEA CON PRESENZA DI RITARDI ED EVENTI ACCIDENTALI

Prima di analizzare i dati ottenuti è bene evidenziare cosa si intenda per presenza di ritardi e cosa per presenza di eventi accidentali.

La prima voce, come intuibile, comprende i tempi di ritardo che uno o più treni possono accumulare. Prima di lanciare la simulazione il software permette di

inserire manualmente quello che viene chiamato “*mean delay*”, ovvero il ritardo medio non inserito nel programma di esercizio. Inoltre, è anche possibile definire quale sia il così detto “*delay scenario*” da applicare durante l’analisi, il quale è riferito a ritardi causati da guasti o a soste prolungate nelle stazioni. L’utente può scegliere tre aspetti: “*none*”, ovvero non verrà applicato alcuno scenario di ritardo, “*defined*”, dove il ritardo è indicato in maniera specifica attraverso il “*mean delay*”, “*No 1.... No 200*”, dove il valore di ritardo è ottenuto per mezzo di un generatore casuale di numeri, combinato con i valori medi della distribuzione del ritardo.

La seconda voce invece permette di esaminare l’impatto di eventi accidentali che si possono manifestare sull’infrastruttura o al materiale rotabile. A sua volta tale voce si divide in due categorie: guasti operativi (quale ad esempio il non funzionamento di un segnale oppure la mancata chiusura di un p.l.) e problemi operativi (in questo caso le operazioni proseguono, ma con limiti di velocità o capacità). Nello specificare l’evento accidentale in atto OpenTrack richiede un intervallo temporale in cui si manifesta. Per inserire valori vicini alla realtà nei casi trattati si sono tenuti in conto eventi realmente accaduti ed i loro relativi tempi di ripristino.

Come scenari accidentali se ne sono presi in considerazione due: rottura di rotaia e mancata chiusura di un p.l. Il primo si è introdotto in quanto situazione da evitare, ma non impossibile che si manifesti, specialmente nei mesi più freddi e in presenza di rotaie vecchie e/o mal regolate. Il secondo caso, anch’esso situazione limite, lo si è voluto considerare in quanto la linea presenta numerosi passaggi a livello, i quali nel corso degli anni per differenti motivi è capitato che mandassero il sistema in allarme. Inoltre, le due casistiche risultano essere differenti tra loro per quanto riguarda i vincoli che si creano alla circolazione: a seconda della tipologia ed entità della rottura di una rotaia, la norma vigente⁷ impone restrizioni di velocità a patto che la rottura sia inganasciata con morsettoni AVE. Nel caso in esame si è adottata una velocità di rallentamento pari a 30 [km/h] da rispettare nella tratta tra Montanaro e Rodallo. Invece, per quanto riguarda la mancata chiusura di un p.l.,

⁷ Istruzione Tecnica R/ST/009/D.72 del 20/10/93

la normativa vigente⁸ prevede che lo stesso possa essere superato solamente se presenziato da personale istruito e che il treno proceda con marcia a vista, ovvero alla velocità di 3 [km/h].

Di seguito si riportano i risultati ottenuti, confrontandoli con i dati relativi ad assenza di eventi accidentali.

Per quanto riguarda un'eventuale rottura di rotaia in fase di input si è stabilito che la stessa avvenisse nelle prime ore del mattino, con decorrenza dalle ore 07:00:00 alle ore 10:00:00. Come si può notare dall'estratto degli orari ottenuti (Figura 48), i treni iniziano ad accumulare ritardi a causa del rallentamento istituito e ciò si ripercuote sull'orario giornaliero in maniera significativa. Sono stati riportati due treni casuali (2717, 11316) ricadenti nell'intervallo di tempo considerato e si sono evidenziati i ritardi accumulati. Come si può notare l'entità maggiore del ritardo viene accumulata nel tratto soggetto a vincoli, mentre nei restanti tratti il treno riesce a recuperare parte del tempo perso, ma non completamente. Tale fenomeno però con il passare del tempo non va migliorando anzi dai dati ottenuti si riscontra come mandi in crisi il software.

Course	Station	Arrivo pianificato	Partenza pianificata	Arrivo effettivo	Partenza effettiva	Differenza Arrivo	Differenza Partenza
		[HH:MM:SS]	[HH:MM:SS]	[HH:MM:SS]	[HH:MM:SS]	[HH:MM:SS]	[HH:MM:SS]
2717	01CHI	HH:MM:SS	07:52:00	HH:MM:SS	08:00:58	00:00:00	+00:08:58
2717	02MON	07:58:00	08:02:00	08:05:08	08:09:08	+00:07:08	+00:07:08
2717	03ROD	08:06:00	08:06:00	HH:MM:SS	08:11:48	00:00:00	+00:05:48
2717	04CAL	08:09:00	08:09:00	HH:MM:SS	08:13:34	00:00:00	+00:04:34
2717	05CAN	08:12:00	08:12:00	HH:MM:SS	08:15:38	00:00:00	+00:03:38
2717	07STR	08:15:00	08:15:00	HH:MM:SS	08:18:50	00:00:00	+00:03:50
2717	08IVR	08:21:00	HH:MM:SS	08:23:42	HH:MM:SS	+00:02:42	00:00:00
11316	08IVR	HH:MM:SS	07:50:00	HH:MM:SS	07:50:00	00:00:00	+00:00:00
11316	07STR	07:57:00	08:02:00	07:55:51	08:02:00	-00:01:09	+00:00:00
11316	05CAN	08:09:00	08:13:00	08:06:34	08:22:02	-00:02:26	+00:09:02
11316	04CAL	08:18:00	08:19:00	08:25:15	08:26:15	+00:07:15	+00:07:15
11316	03ROD	08:23:00	08:24:00	08:28:40	08:29:40	+00:05:40	+00:05:40
11316	02MON	08:31:00	08:32:00	08:33:10	08:34:10	+00:02:10	+00:02:10
11316	01CHI	08:37:00	HH:MM:SS	08:38:00	HH:MM:SS	+00:01:00	00:00:00

Figura 48 - Estratto orario effettivo in seguito a rottura di rotaia

⁸ Istruzione per l'esercizio dei passaggi a livello dell'infrastruttura ferroviaria nazionale, Edizione 2003, Regolamento per la Circolazione dei Treni

Infatti, le corse e i relativi incroci definiti in condizioni normali fanno fatica ad essere rispettati e giunti ad un certo punto della mattinata, quando la circolazione è massima, il software non riesce più a far partire treni dalle stazioni intermedie (ormai sature) in quanto presenti altri in senso opposto. L'unica soluzione per non generare tali conflitti è ridurre il numero delle corse effettuabili, il che significa sopprimere alcune corse.

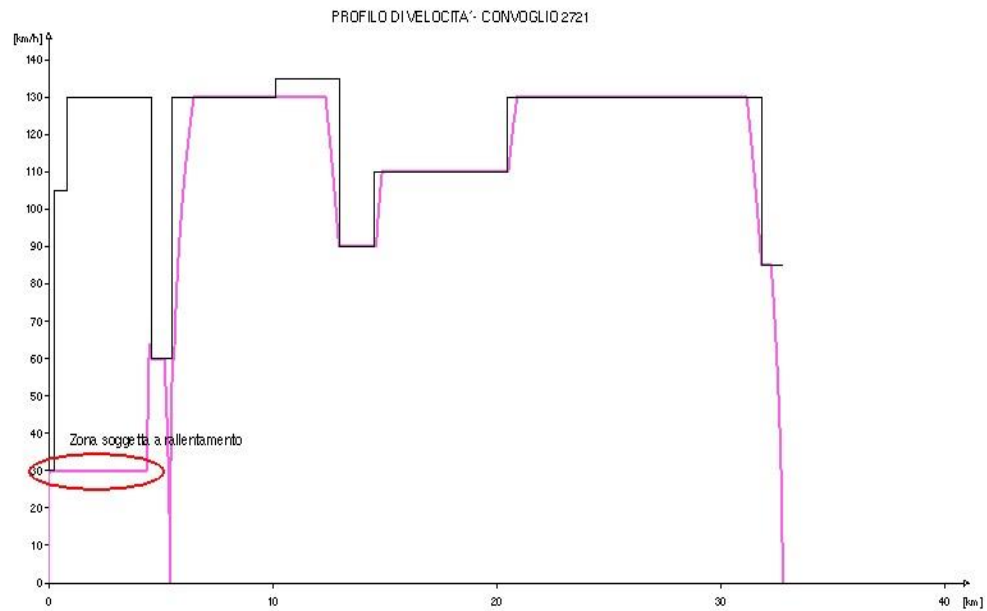


Figura 49 - Profilo di velocità del convoglio 2721 a causa del rallentamento

In Figura 49 si evidenzia in maniera chiara quale sia la velocità adottata dal treno nel tratto in cui è presente il rallentamento.

Analizzando il secondo caso, ovvero la mancata chiusura di un p.l. si è riscontrato un ritardo medio pari a 8 [min] ovviamente escludendo il primo treno che incontra il p.l. non presenziato, dovendo così attendere l'arrivo del personale autorizzato. Tale attesa sarà sommata al tempo perso per il rallentamento, così da ottenere il tempo totale di ritardo. L'intervento del personale non è stato inserito in quanto molto aleatorio perché funzione del periodo della giornata, accessibilità del luogo da raggiungere, conoscenza da parte del personale del luogo causa di anomalia, conoscenza del tipo di anomalia. Già così però si è potuto riscontrare dalle simulazioni come il guasto possa essere deleterio in quanto causa di ritardi dei treni e a seconda dei casi possibile cancellazione di alcune corse.

Da questi due scenari si evince, pertanto, come sulla linea sia difficile se non impossibile rispettare la regolarità e stabilità dell'orario quando insorgano eventi accidentali. Ciò accadrebbe anche su linee più trafficate e a doppio binario, ma proprio il fatto che tale linea presenti un solo binario implica che treni pari e dispari si vincolino a vicenda dovendo effettuare gli incroci obbligatoriamente nelle stazioni.

10.3 SCENARIO 2; ATTUALE GESTIONE DELLA LINEA E CONDIZIONI SCADENTI DI ADERENZA

Per condizioni scadenti di aderenza si intendono quelle situazioni in cui il contatto ruota-rotaia non sia ottimale in quanto potrebbe esserci presenza di acqua o neve sul fungo della rotaia, oppure il cerchione risulti notevolmente usurato. In ogni caso sono situazioni nelle quali la forza aderente risulta essere molto bassa, provocando tempi di accelerazione maggiori e spazi di frenatura dilatati. È bene considerare uno scenario di questo tipo in quanto tali situazioni capitano nella vita quotidiana e sicuramente con maggior frequenza rispetto ai guasti visti nel paragrafo precedente.

Ovviamente, come facilmente intuibile, a parità di condizioni per quanto riguarda i ritardi e la presenza di eventi accidentali, in questo caso si aggiunge un ulteriore aspetto negativo. Pertanto, il risultato ottenuto dalla simulazione presenta gli stessi ritardi del punto precedente, ma con l'aggravarsi del ritardo dovuto alle basse condizioni di aderenza.

Analizzando i dati di output si è così riscontrato che mediamente il ritardo dovuto alle scarse condizioni di aderenza è pari a 1-2 [min] e si manifesta principalmente nei treni della tipologia ALe 500. Ad ogni modo sommando assieme i vari ritardi si riscontra che alcune corse dovranno essere soppresse per impedire la saturazione completa della linea e l'impossibilità di inoltro di nuovo materiale rotabile. Infine, in questo Scenario, come in quello precedente non si sono svolti calcoli inerenti allo sfruttamento della linea in quanto come visto il sistema tende al collasso.

10.4 SCENARIO 3; POSSIBILITA' DI EFFETTUARE INCROCI CONTEMPORANEI

A differenza dei casi precedenti, ora si vuole iniziare ad apportare qualche miglioramento alla gestione dell'esercizio ferroviario. Per fare ciò si è fatto riferimento al "Regolamento per la Circolazione dei Treni" ed in maggior dettaglio agli articoli inerenti allo svolgimento in sicurezza degli incroci. Attualmente, infatti, in tutte le stazioni abilitate ad effettuare incroci non è previsto che treni provenienti in senso opposto possano oltrepassare il segnale di protezione contemporaneamente. Nel dettaglio le operazioni di incrocio si svolgono con tale sequenza:

- a) Il primo treno che arriva al segnale di protezione della stazione designata per l'incrocio troverà lo stesso disposto a via impedita (in tal caso dovrà attendere la creazione dell'itinerario da parte del dirigente movimento) oppure predisposto con apposito itinerario.
- b) Solamente con segnale disposto a via libera il treno potrà entrare in stazione rispettando la prescrizione del segnale stesso
- c) Giunto al punto di arresto il capo treno dovrà scendere ed azionare la così detta "RAR". Ciò permette al dirigente della circolazione di avere certezza che il primo treno entrato sia fermo e attenda l'incrocio del secondo
- d) Nel frattempo, il secondo treno potrebbe già essere al segnale di protezione della stazione, ma non potrà oltrepassarlo in quanto disposto a via impedita, causando l'arresto del convoglio
- e) Avuta conferma tramite "RAR" dell'arrivo e arresto del primo treno, il dirigente della circolazione potrà predisporre il segnale di protezione, per il treno sopraggiungente in senso opposto, a via libera
- f) Il macchinista del secondo treno, vedendo il via libera potrà entrare in stazione ed effettuare l'incrocio

Risulta quindi chiaro come l'impossibilità di far entrare due treni contemporaneamente in stazione, influenzi negativamente i tempi di percorrenza

con ordini di grandezza pari a qualche minuto (2/3). Per questo motivo si è voluto indagare come una gestione in contemporanea degli incroci possa migliorare i tempi di percorrenza e ridurre eventuali instabilità d'orario.

Prima di modellizzare quanto detto si devono tenere in conto le prescrizioni di Rete Ferroviaria Italiana inerenti agli incroci in contemporanea e nello specifico per ogni stazione bisogna verificare che:

- a) Il punto di convergenza (traversa limite dello scambio o dell'attraversamento) sia protetto da segnale di partenza a via impedita, preceduto da avviso, distinto per binario e ubicato a distanza di almeno 100 metri dal punto stesso
- b) Gli impianti della stazione siano muniti di collegamenti di sicurezza i quali, con la disposizione a via libera dei segnali o nei casi previsti dalle apposite istruzioni, garantiscano l'indipendenza degli itinerari, fatta eccezione soltanto per il punto di convergenza protetto come al precedente punto
- c) Nel tratto di arrivo compreso fra il segnale di protezione e quello di partenza a via impedita, la pendenza media del binario non sia superiore al 6 ‰.
- d) Sono ammesse distanze ridotte rispetto al punto a) di tale elenco purché la distanza minima dal punto protetto sia pari a 50 metri, la velocità del treno in arrivo non sia superiore ai 30 [km/h], il movimento di arrivo non sia di corretto tracciato
- e) Presenza di sottopassi pedonali

In base a quanto esposto, le uniche stazioni che permetterebbero l'incrocio in simultaneo risultano essere Montanaro e Strambino, anche se bisognerà adottare la casistica del punto d) ovvero quella inerente alla distanza ridotta tra segnale di partenza e punto di convergenza oltre a prevedere la realizzazione dei sottopassi pedonali in modo da eliminare gli attraversamenti a raso. Per quanto riguarda tutte le altre, invece, vanno escluse in quanto non rispettata la massima pendenza ammissibile e i relativi lavori di armamento richiederebbero troppo denaro in funzione del tipo di intervento. L'unica stazione nella quale sarebbe possibile intervenire risulterebbe essere Caluso, ma a patto che: per un'estesa maggiore o uguale a 200 [m], a partire dal chilometro 13+842.68 e tornando indietro la

pendenza della livelletta venga portata dagli attuali 10‰ ai massimi 6‰ prescritti dalla normativa, nella stazione venga realizzato un sottopasso in modo da eliminare l'attraversamento a raso ed infine adottare la casistica del punto d) per quanto riguarda la distanza tra segnale di partenza disposto a via impedita e punto di convergenza.

A questo punto, avendo identificato le uniche stazioni nelle quali è possibile optare per un incrocio simultaneo (Montanaro, Caluso e Strambino) si è potuto procedere con la simulazione. Come si può notare dalla Figura 47, che è un'estrapolazione del nuovo orario grafico, acconsentendo l'arrivo simultaneo di due treni nelle stazioni di Montanaro, Caluso e Strambino si riesce a guadagnare in media qualche minuto nei tempi di percorrenza (da 1'30" a 2'30"). Infatti, in questo caso il sistema risulta essere meno perturbato proprio grazie al fatto che il secondo treno non debba restare in attesa al segnale di protezione.

Anche in questo caso si è fatto ricorso alla FICHE UIC 406 R e anche in questo caso l'intervallo di massima congestione è risultato essere quello compreso tra le 07:00:00 e le 09:00:00 della tratta compresa tra Rodallo e Candia. Tale tratta presenta un'estensione di 6830 [m] e vede il susseguirsi di 9 treni nell'intervallo di tempo indicato. Si è osservato che ogni treno mediamente impiega 11 minuti a percorrere tale spazio; pertanto, è stato possibile calcolare il tempo di occupazione:

$$OC = n^{\circ}treni * t_{occupazione} = 9 * 11 * 60 = 5940 [s] = 99 [min]$$

Noto tale valore, si può risalire al tempo di occupazione relativo (OTR):

$$OTR = \frac{OT}{finestra\ temporale\ osservazione} = \frac{5940}{2 * 60 * 60} = 0.825 = 82.5\%$$

Per poter capire se la linea risulta essere congestionata bisogna confrontare il valore ottenuto con la tabella fornita dalla Fiche, la quale in base alla tipologia di linea e al massimo rapporto fra tempo di occupazione totale dell'infrastruttura e finestra temporale considerata fornisce un'indicazione numerica di ciò. Considerandola linea come "Riservata al traffico passeggeri suburbano", e con una "Finestra temporale pari all'ora di punta" il valore limite fornito dalla Fiche risulta essere pari al 85%. Siccome $82.5\% < 85\%$ la linea non risulta essere congestionata,

anche se permane il consiglio di non aggiungere ulteriori tracce in quanto ancora vicini al limite di congestionamento.

Non risultando congestionata ne deriva che la capacità consumata (CC):

$$ATR = \frac{100}{OTR_{max}} - 1 = \frac{100}{85} - 1 = 0.176$$

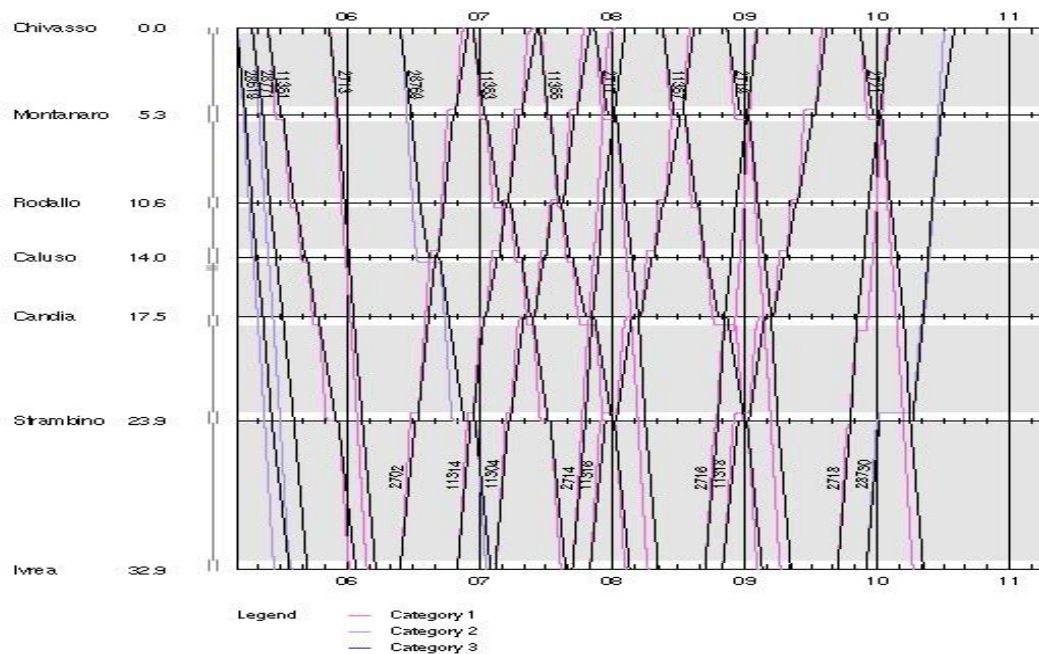
$$CC = \frac{OT(1 + ATR)}{finestra\ temporale} = \frac{5940(1 + 0.176)}{2 * 60 * 60} = 97.02\%$$

Lasciando una capacità residua (CR):

$$CR = 100 - CC = 100 - 97.02 = 2.98\%$$

In questo caso si può comprendere come l'aver introdotto incroci simultanei in tre stazioni abbia migliorato, seppur di poco, i tempi di percorrenza che a loro volta hanno permesso di mantenere velocità più elevate dei treni, giovando sulla capacità della linea.

Chivasso - Ivrea



10.5 SCENARIO 4; POSSIBILITA' DI EFFETTUARE INCROCI CONTEMPORANEI E SOSTITUZIONE DEI CONVOGLI E.464 CON ETR421

In questo paragrafo si è voluto introdurre un ulteriore intervento per cercare di migliorare il servizio, ovvero sostituire i convogli a composizione variabile composti da locomotore E.464 e carrozze FS MDVC/MDVE con i più recenti ed efficienti convogli ETR421.

I treni E.464 di norma sono così composti: un locomotore, quattro carrozze più una carrozza “*pilotina*” coprendo una capacità di posti a sedere pari a 410. Invece i convogli ETR421 essendo a composizione bloccata escono di fabbrica con 4, 5 o 6 casse: nel caso trattato si prenderà quello più piccolo ovvero a 4 casse, il quale garantisce 479 posti a sedere, ovvero 69 posti in più rispetto al precedente con un incremento pari al 17%.

La scelta di tale convoglio non è basata solamente sulle capacità di carico, ma anche in termini energetici e di aderenza in quanto più performante del suo predecessore, inoltre risulta essere più leggero dei convogli E.464 il che significa minor sollecitazione dell'infrastruttura ed una maggior durata nel tempo, a parità di altre condizioni.

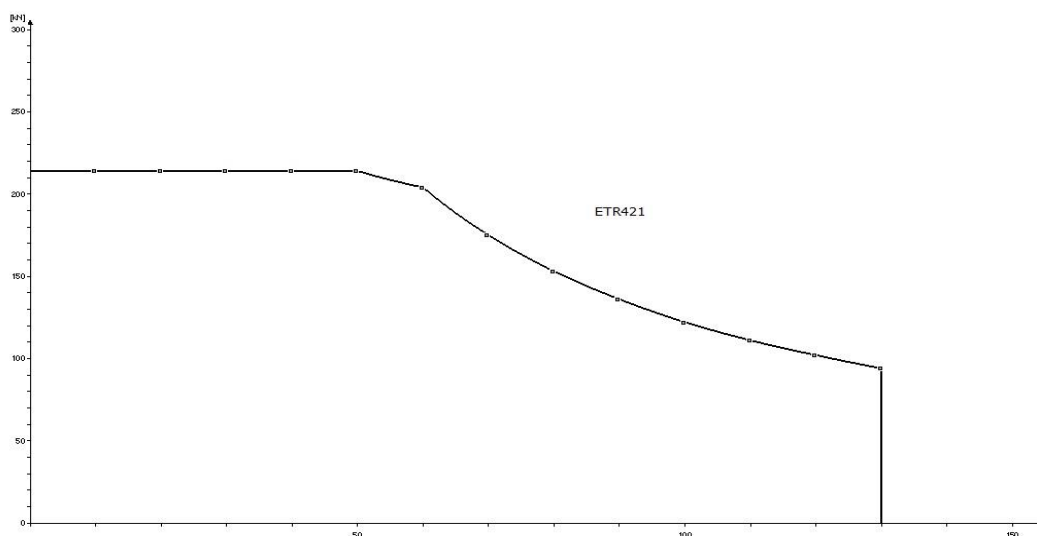


Figura 51 - Curva meccanica di trazione del convoglio ETR421

Paragonando i risultati ottenuti per i treni E.464 con quelli degli ETR421, in particolar modo gli orari grafici, si è riscontrato che delle sei corse giornaliere in

tre casi la prima configurazione (E.464) risultava essere più competitiva, mentre negli altri tre (ETR421) era la seconda configurazione a fornire risultati migliori.



Figura 52 – Composizione del convoglio ETR421

Si è allora deciso di osservare nel complesso in quale situazione l'orario simulato si avvicinasse maggiormente a quello teorico e che in generale presentasse minori ritardi: potendo concludere che il convoglio E.464 garantisce una maggiore stabilità generale d'orario. Infatti, confrontando tra loro le corse 28 di esse sono risultate favorevoli ai convogli E.464, 18 per gli ETR421 e 15 non hanno subito cambiamenti:

Maggiori prestazioni E.464	28	45.90%
Maggiori prestazioni ETR421	18	29.51%
Nessun cambiamento	15	24.59%

Inoltre, nel caso degli ETR421 alcune corse di altri convogli sono state ritardate di qualche minuto, cosa che invece non è accaduta nel caso degli E.464. A conferma di ciò anche gli orari grafici delle due simulazioni indicano questa direzione in

quanto per gli E.464 l'orario effettivo si avvicina maggiormente a quello teorico, rispetto la simulazione con i convogli ETR421 dove oltre che non seguire l'orario teorico, si discosta in maniera peggiorativa.

Se invece si volesse analizzare il discorso per quanto riguarda i posti a disposizione, i convogli ETR421, seppur di minor lunghezza riuscirebbero ad accogliere un numero maggiore di passeggeri. Avendo però avuto riscontro che il servizio migliore offerto è merito dei convogli E.464, almeno in questa fase, si vogliono mantenere gli stessi, perciò, basterà aggiungere una carrozza alla composizione standard in modo da aumentare la capienza di 82 posti e passare a 492. Per quanto riportato nei capitoli precedenti a riguardo dei gradi di prestazione e delle massime masse rimorchiabili, l'aver aggiunto una carrozza non comporta il superamento di alcun vincolo.

Prima di poter trarre una conclusione definitiva sulla tipologia di convoglio da utilizzare si rimanda però ai paragrafi successivi dove si introdurrà il raddoppio selettivo del binario e il raddoppio completo.

10.6 SCENARIO 5; RADDOPPIO SELETTIVO

Analizzate le condizioni nelle quali si trova ad operare la linea e portati alla luce i problemi che possono insorgere durante l'esercizio, si vogliono proporre diversi interventi di potenziamento. A tal proposito si ricorda che scopo della tesi è ricercare soluzioni che migliorino il servizio generale ovvero aumentare la capacità della linea, diminuire i tempi di percorrenza, rendere più stabile l'orario, proporre corse che siano compatibili con la domanda di trasporto in termini di posti offerti e orari programmati.

Per fare ciò si è pensato a diverse soluzioni quali: raddoppio selettivo, raddoppio completo, sostituzione di materiale rotabile datato con altro di più recente concezione e soppressione di alcuni passaggi a livello. Tutte queste soluzioni non si sono introdotte contemporaneamente, ma una alla volta così da poter individuare in maniera rapida e concisa cosa comportasse l'introduzione di ognuna di loro. Ciò

ha permesso di ottenere molteplici scenari con diversi gradi di fattibilità tecnica ed economica. Pertanto, i primi ad essere trattati saranno quelli di più semplice e reale fattibilità, mentre via via che si proseguirà con la trattazione bisognerà tenere in conto maggiori spese e maggior tempo dedicato alla progettazione delle nuove opere.

Infine, si precisa che le soluzioni proposte sono state ottenute cercando di combinare: conoscenze teorico-tecniche, conoscenze pratiche, interventi realizzati o analizzati su linee simili, percezione dell'utilizzo e gestione della linea da parte del personale di Rete Ferroviaria Italiana e percezione della gestione della linea da parte dell'associazione utenti ferrovia Chivasso-Ivrea-Aosta.

Il primo nodo da risolvere ha riguardato così il raddoppio selettivo del binario. Come visto il binario unico limita fortemente la capacità e la stabilità d'orario, perciò si è ritenuto di primaria importanza ipotizzare almeno un raddoppio localizzato. Conoscendo lo sviluppo della linea attraverso il territorio è stato possibile escludere a priori la tratta Caluso-Candia Canavese in quanto sarebbero stati necessari importanti interventi per il rifacimento integrale della galleria posta all'uscita della stazione di Caluso, oltre che alla realizzazione di opere secondarie non trascurabili (tombini, ponticelli, rilevati). Inoltre, si è esclusa la tratta Strambino-Ivrea in quanto risulta obbligatorio intervenire nel seguente modo: costruzione di una nuova travata metallica (di metri 120 circa) per attraversare il corso del fiume Chiusella, esproprio di qualche abitazione presente sul sito di realizzazione del secondo binario ed infine effettuare lavori di scavo/demolizione su di una piccola collinetta per permettere l'affiancamento della linea.

Restano così le tratte: Chivasso-Montanaro, Montanaro-Rodallo, Rodallo-Caluso e Candia Canavese-Strambino. Tutte e quattro non presentano particolari vincoli di esecuzione in quanto dove presenti sottovia ferroviari/gallerie artificiali, in passato era già stato tenuto in conto un eventuale raddoppio. L'unica tratta che potrebbe creare qualche problema in più rispetto le altre è quella tra Chivasso e Montanaro in quanto presenti case lungo l'attuale linea, ma comunque ad una distanza tale da non creare eccessivi problemi (esproprio di parte del giardino) e pertanto confermata insieme alle altre tre tratte.

Lo sviluppo complessivo del nuovo binario risulterà essere pari a 19.882 [km] (oltre la metà dell'estensione della linea) e le caratteristiche geometriche di tracciato resteranno identiche (livellette e raggi) a quelle attuali, mentre dovranno essere modificate e adattate le sopraelevazioni degli attuali binari di precedenza. Le velocità di Rango non saranno modificate in quanto ritenute soddisfacenti e non eccessivamente vincolanti, ad eccezione degli ex binari di precedenza delle stazioni di Montanaro e Rodallo (dove ora i convogli non sono obbligati ad effettuare incroci). Il binario interessato da raddoppio sarà la normale prosecuzione del binario V di Chivasso, mentre in tutte le stazioni incontrate si innesterà al binario di precedenza (II).

A questo punto si possono riportare i risultati ottenuti durante l'analisi. Come si vedrà si sono dovuti variare alcuni orari di partenza e arrivo delle corse in quanto adesso è consentito l'incrocio in linea nei tratti a doppio binario. Ciò ha permesso di ridurre i tempi di percorrenza tra le stazioni di Chivasso e Ivrea, oltre a generare nuovi intervalli temporali di assenza circolazione in determinate fasce orarie. Proprio quest'ultimo aspetto risulterà essere molto importante per molteplici applicazioni: possibilità di inserire nuove tracce orarie sul mercato da parte di Rete Ferroviaria Italiana, dedicare maggiori intervalli temporali diurni alla manutenzione dell'infrastruttura e permettere ai convogli di recuperare eventuali ritardi.

Come nelle altre simulazioni si è fatto molto riferimento all'orario grafico ottenuto in output, del quale si riporta un estratto temporale (Figura 53).

Come si può notare si è mantenuta la finestra temporale di assenza circolazione del mattino, ma confrontando le occupazioni delle tratte è possibile vedere come negli intervalli che vanno dalle 08:00 alle 10:00, oppure dalle 12:00 alle 17:00 sia possibile inserire nuove tracce, oppure sfruttare tale tempo per lavori di manutenzione. Per capire ciò è sufficiente osservare il diagramma di occupazione delle tratte (rettangoli in evidenza). Essi, infatti, indicano il tempo di occupazione di una determinata tratta e di conseguenza quando la stessa possa ritenersi libera. Quindi, il concetto è che due rettangoli appartenenti a treni diretti nella stessa direzione non potranno mai toccarsi o intersecarsi perché ciò significherebbe che

il treno che segue sia entrato in una sezione ancora non liberata, ma questo ai fini della sicurezza è impossibile. Si ricorda infatti che in linea non vi è presenza di circuito di binario, ma blocco conta assi all'ingresso ed uscita di ogni sezione; pertanto, fino a quando una tratta non sia completamente libera (a prescindere dalla sua lunghezza) un altro treno non potrà occuparla. Negli intervalli d'orario indicati in precedenza tale situazione non si verifica, pertanto in tali casi potranno essere inserite nuove tracce. Inoltre, tale aspetto permetterà in seguito di capire quanto la linea sia sfruttata in termini di capacità, utilizzando il metodo proposto dalla U.I.C.

Chivasso - Ivrea

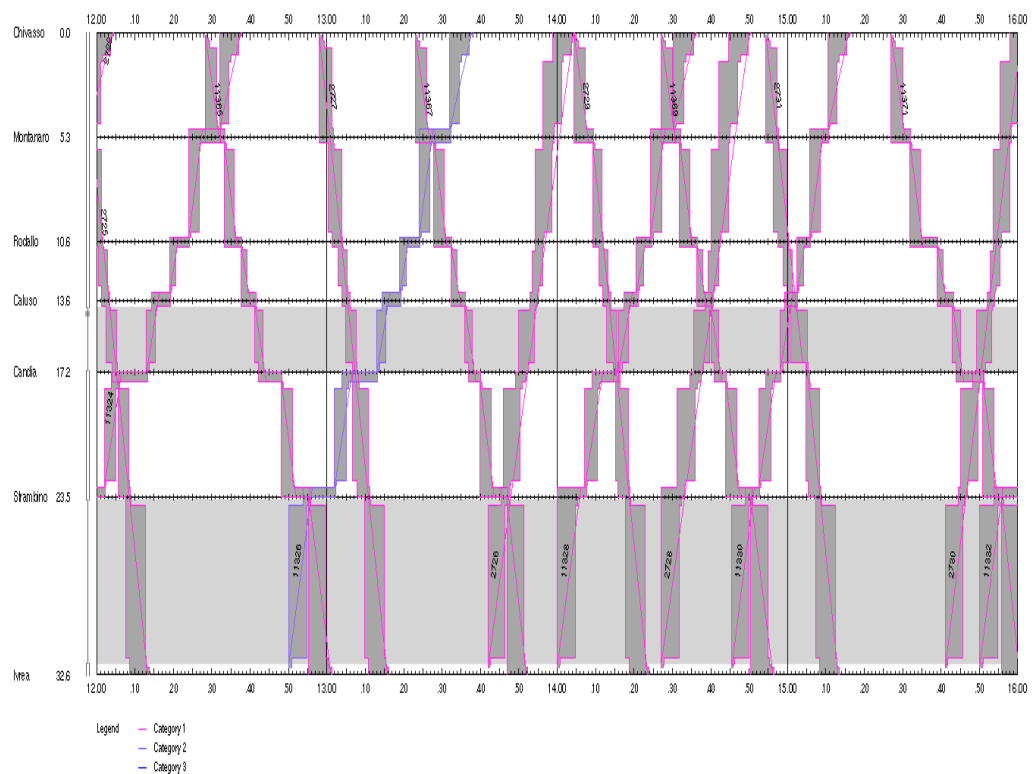


Figura 53 - Estratto nuovo orario grafico a seguito di raddoppio selettivo

Le due strisce di colore più scuro indicano la presenza del singolo binario in linea; infatti, come si può notare dall'orario grafico, in uscita/ingresso dalle stazioni interessate si effettuano eventuali incroci che non si è riusciti ad esplicitare in tratta. Le stazioni sono disposte lungo l'asse delle ordinate, dove all'aumento di esso corrisponde una diminuzione delle progressive chilometriche della linea. Sull'asse

delle ascisse invece si è riportata l'ora del giorno. Perciò, tanto più pendente sarà la linea della traccia e tanto maggiore sarà la velocità del treno.

Il criterio attraverso il quale tale analisi sia stata giudicata positiva sfrutta il confronto con il primo scenario presentato. Infatti, gli output del software inizialmente non risultavano essere corretti/razionali proprio perché i dati di input facevano riferimento alle condizioni geometriche e di esercizio dell'attuale linea. Per ovviare a tale problema si è deciso di lavorare direttamente sull'orario grafico restituito da OpenTrack: manualmente si sono modificate le tracce seguite dai treni, cercando di ottimizzare gli incroci in linea là dove possibile e riducendo i tempi di sosta in alcune stazioni (in particolar modo a Montanaro) dove gli incroci erano maggiori. A tal proposito si ricorda che anche in tale scenario si è mantenuta la possibilità di effettuare incroci in contemporanea, tenendo a mente che il raddoppio selettivo non è stato previsto nelle tratte Caluso-Candia e Strambino-Ivrea e pur avendo limitato il numero di incroci in quelle stazioni, per alcuni è stato inevitabile cambiare il punto di manovra.

Quindi, una volta abbozzati i nuovi orari che i treni dovevano seguire si è lanciata la seconda simulazione, dove al termine della stessa gli output presentavano dati migliori. Si è allora deciso di migliorarli ulteriormente, lanciando un'ultima e definitiva simulazione: a questo punto i dati ottenuti sono stati confrontati nuovamente con il primo scenario (Scenario 0) e si è cercato di capire quanto fosse migliore lo scenario attuale. Per fare ciò si è contato il numero di corse che risultavano essere puntuali e/o con minori tempi di percorrenza, ottenendo un numero pari a 16, ovvero il 26% del totale giornaliero.

Infine, come applicato nel caso di linea a semplice binario, anche ora si è voluto indagare se il sistema risulti congestionato e in caso di risposta negativa quale sia la capacità consumata (CC) e quella residua (CR).

Dall'orario grafico di output si è osservato che anche adesso il tratto più congestionato risulta essere quello tra Rodallo e Candia (anche a causa del mancato raddoppio tra Caluso e Candia) e sempre tra le ore 07:00:00 e le 09:00:00. In tale scenario il tempo impiegato dai convogli per percorrere la sezione risulta essere

pari a 10 [min], mentre il numero di treni osservati resta 9. Il tempo di occupazione pertanto risulta essere pari a:

$$S = OT = 4 * t_{occ} = 9 * 10 * 60 = 5400 [s]$$

Il tempo di occupazione relativo quindi:

$$OTR = \frac{OT}{finestra\ temporale} = \frac{5400}{2 * 60 * 60} = 75\% < 85\%$$

Come ci si aspettava la linea non risulta essere congestionata oltre al fatto di presentare condizioni migliori al caso di singolo binario.

Ne deriva quindi che la capacità consumata (CC):

$$ATR = \frac{100}{OTR_{max}} - 1 = \frac{100}{85} - 1 = 0.176$$

$$CC = \frac{OT(1 + ATR)}{finestra\ temporale} = \frac{5400(1 + 0.176)}{2 * 60 * 60} = 88.2\%$$

Lasciando una capacità residua (CR):

$$CR = 100 - CC = 100 - 88.2 = 11.8\%$$

Tale dato, sommato alle migliorie presentate all'inizio, ha sancito che: il raddoppio selettivo della linea aumenta la capacità della stessa, migliora i tempi di percorrenza dei treni, permette maggiori manutenzioni e garantisce una maggiore stabilità d'orario. Inoltre, proprio osservando la nuova capacità residua ci si può rendere conto come il servizio sia nettamente migliorato, passando dalla congestione (Scenario 0), al 2.98% (Scenario 3), al 11.8% di adesso.

10.7 SCENARIO 6; RADDOPPIO SELETTIVO E SOSTITUZIONE DEI CONVOGLI E.464 CON ETR421

Come esposto precedentemente, vengono ora analizzate le stesse condizioni di esercizio dello Scenario 5, sostituendo però i convogli a composizione variabile trainati da locomotore E.464 con quelli a composizione bloccata (ETR421). La composizione di questi ultimi è la stessa analizzata in precedenza (4 casse) e come

già affrontato, verranno presi in considerazione non soltanto i nuovi orari ottenuti in output, ma sarà analizzato tutto il sistema nel suo insieme cercando di capire quale sia la soluzione migliore.

Le corse oggetto di cambiamento saranno: 2702, 2727, 11328, 11351, 11355, 28730, tutte svolgenti servizio viaggiatori ad eccezione dell'ultima che risulta essere un invio di materiale vuoto.

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può dedurre quanto segue:

- a) Le singole corse effettuate dai convogli ETR421 risultano essere maggiormente performanti rispetto quelle svolte dagli E.464, infatti confrontando i tempi di arrivo attuali con quelli del paragrafo precedente si ottiene un risparmio di tempo medio pari a 30 secondi, riducendo ulteriormente i tempi di percorrenza.
- b) Essendo gli ETR421 più capienti degli attuali convogli, il servizio, oltre che ad essere più veloce, garantisce maggiori posti a sedere. Aspetto molto importante sia nelle ore di punta sia a riguardo delle restrizioni di posti utilizzabili a causa della pandemia da Covid19. I convogli E.464 vengono infatti impiegati nelle corse dove è attesa maggiore affluenza di persone: incrementando la capacità di posti disponibili si compensa tale richiesta proprio nei momenti più critici della giornata.
- c) Inoltre, le corse degli altri treni non sono influenzate in maniera negativa da tale cambiamento. Pertanto, gli ETR421 sono da preferire ai convogli E.464 laddove vi siano meno incroci da effettuare, date le particolari caratteristiche tecniche.

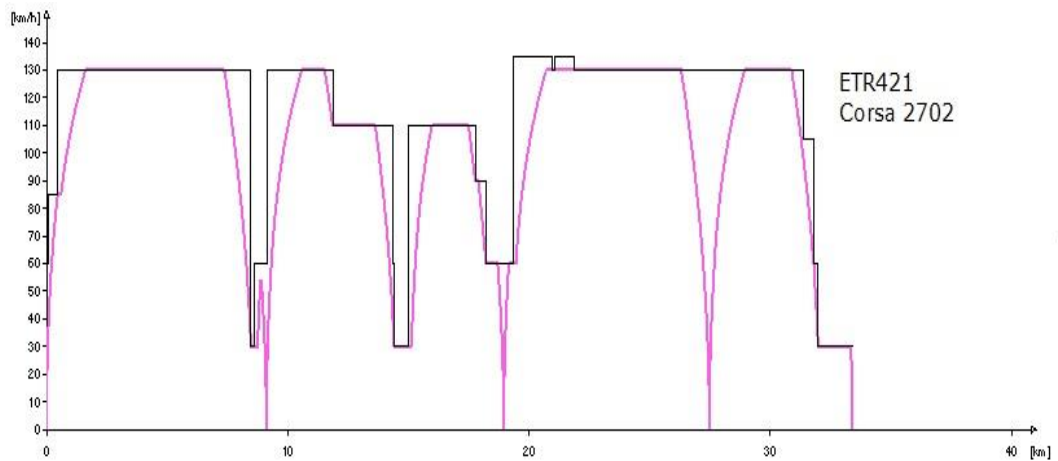


Figura 54 - Diagramma Velocità-Spazio dell'ETR421, corsa 2702

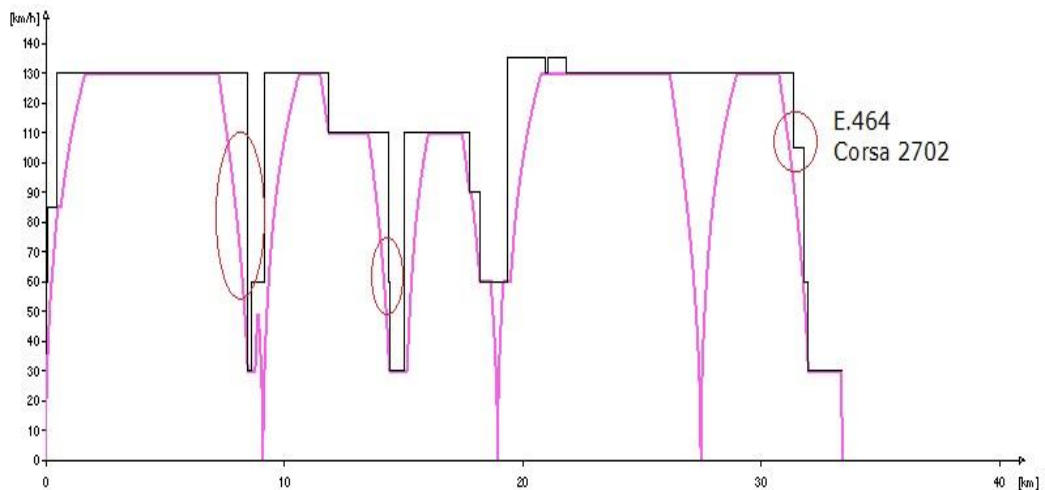


Figura 55 - Diagramma Velocità-Spazio del E.464, corsa 2702

Nel tentativo di illustrare le differenze di moto nella stessa corsa, ma effettuata dai due convogli diversi, si sono riportate le figure soprastanti., ricordando che:

$$dv = \frac{ds}{dt}$$

$$da = \frac{dv}{dt} \rightarrow da = \frac{ds}{dt^2}$$

Analogamente allo studio dell'orario grafico, maggiore sarà la pendenza e maggiore risulterà essere l'accelerazione con la quale il treno si muove. In Figura 55 si è pertanto cercato di evidenziare le zone nelle quali i convogli E.464 risultino essere meno efficienti degli ETR421. Pertanto, d'ora in avanti nelle simulazioni

successive verranno presi in considerazione solamente questi ultimi in quanto dimostrato essere più performati dei mezzi attualmente utilizzati.

10.8 SCENARIO 7; RADDOPPIO SELETTIVO CON PRESENZA DI RITARDI ED EVENTI ACCIDENTALI

Allo stesso modo delle simulazioni precedenti, si vuole osservare cosa accada al sistema nel momento in cui si verifichino eventi accidentali e possano essere presenti ritardi in alcune stazioni.

In questo caso si spera pertanto di dimostrare che pur perturbando il moto del treno, tali eventi non creino eccessiva confusione nella riorganizzazione del servizio, così da rendere la programmazione stabile anche in presenza di eventi eccezionali.

Anche in questo caso si simulerà un'ipotetica rottura di rotaia nella tratta tra Chivasso e Montanaro riguardante il binario dei treni dispari e una mancata chiusura di un p.l. nella tratta tra Candia e Strambino (in modo da avere omogeneità con le simulazioni precedenti).

Dai risultati di output ottenuti si è riscontrato quanto segue:

- a) La presenza di un evento accidentale quale la rottura di una rotaia o la mancata chiusura di un p.l. ha creato ritardi nelle corse programmate dei convogli.
- b) Allo stesso tempo però la presenza del raddoppio selettivo ha permesso di far accumulare solamente ritardi ai treni, non degenerando in una rimodulazione delle corse in tempo reale per sopperire alla diminuzione di capacità temporanea, come invece si manifestava in caso di singolo binario.

Quest'ultimo aspetto risulta essere molto importante perché evita la riprogrammazione e/o cancellazione di alcune corse. Infatti, una ricaduta negativa potrebbe essere un eccessivo affollamento dei treni successivi a quello/i cancellato/i, oppure l'istituzione di corse sostitutive per mezzo di autobus con conseguente limitazione del numero di posti a sedere ed opportuni tempi tecnici per essere operativi.

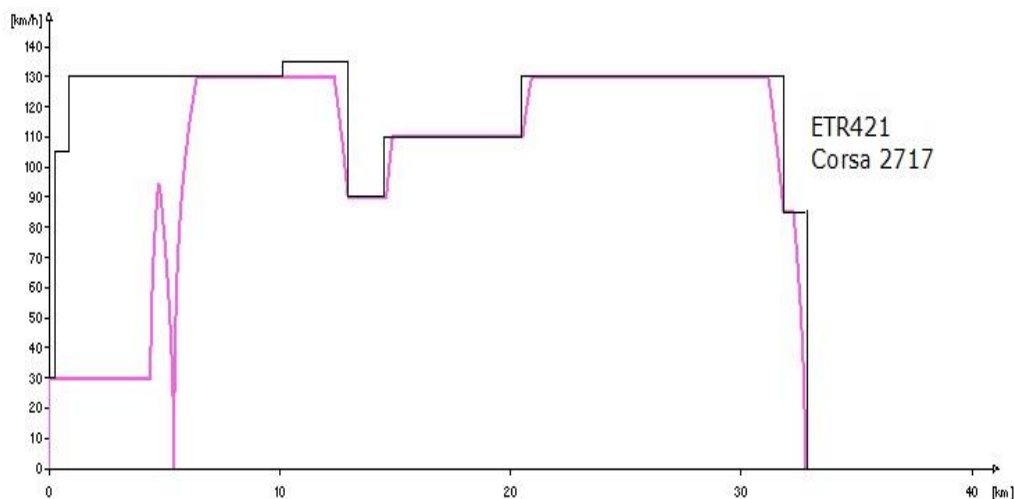


Figura 56 - Diagramma Velocità-Spazio, corsa 2717, convoglio ETR421

Come si può notare (Figura 56) la curva di velocità risulta essere limitata a causa della rottura di rotaia, aumentando temporaneamente i tempi di percorrenza. Mediamente si è riscontrato un incremento di tali tempi pari a $4/5$ [min], ma grazie all'interruzione della circolazione delle ore 10:30 e ai maggiori intervalli temporali a disposizione durante le ore pomeridiane, si è riscontrato un naturale appianamento dei ritardi nelle corse del pomeriggio. Ciò significa che il sistema può ritenersi sufficientemente stabile in quanto tende in maniera naturale a tornare alle condizioni di esercizio standard, senza dover sopprimere corse. Ovviamente i calcoli sono stati fatti stimando gli stessi tempi di intervento e riparazione dell'evento accidentale delle simulazioni precedenti.

10.9 SCENARIO 8; RADDOPPIO SELETTIVO E CONDIZIONI SCADENTI DI ADERENZA

L'ultimo scenario riguardante il raddoppio selettivo è riferito a condizioni di aderenza molto scarse dovute per esempio a piogge o nevicate.

Come facilmente intuibile le peggiori condizioni di aderenza fanno sì che ai ritardi del punto 10.7 si sommino anche questi. Il tutto, si traduce in un aumento dei tempi di percorrenza. Fortunatamente però anche in questo caso, grazie al raddoppio selettivo, i ritardi non scaturiscono in una riprogrammazione e/o cancellazione di

Infatti, da quanto riscontrato sul campo si è dedotto che tale riduzione di velocità sia proprio dovuta alle dimensioni dell'attuale tunnel in quanto i raggi di curvatura, la sopraelevazione, la pendenza della livelletta ed i parametri di dinamica di marcia risultano essere all'interno dei valori limite (anche abbondantemente).

Pertanto, ricordano la definizione di velocità di rango come la velocità alla quale vengono percorse le curve di raggio minimo, dotate di sopraelevazione massima e con valori prefissati di accelerazione non compensata massima si ottiene che la velocità di percorrenza è pari a:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{ghR}{d} + Ra_{nc}}$$

Dove $a_{nc,A} = 0.6 [m/s^2]$, $a_{nc,B} = 0.8 [m/s^2]$.

Nel caso in esame, dalla lettura del tabellino delle curve e dal fascicolo circolazione linea si è riscontrato che $R_{min} = 464 [m]$, $h_{max} = 100 [mm]$, $V_A = 80 [km/h]$, $V_B = 90 [km/h]$.

Pertanto, la massima velocità di rango ammessa sulla sezione di tracciato analizzata è pari a:

$$V_A = 4.62\sqrt{R_{min}} = 4.62\sqrt{464} = 100 \left[\frac{km}{h}\right]$$

$$V_B = 4.89\sqrt{R_{min}} = 4.89\sqrt{464} = 105 \left[\frac{km}{h}\right]$$

Riscontrando pertanto un margine di miglioramento. Tali formule, però, non sono sufficienti a sancire quale sia il limite massimo di velocità dei convogli, ma come indicato in letteratura, ogni velocità di rango deve soddisfare ulteriori verifiche.

a) Valori limite dell'accelerazione non compensata massima visti poco sopra

b) Valori massimi di velocità: $V_A \leq 140 \left[\frac{km}{h}\right]$ $V_B \leq 160 \left[\frac{km}{h}\right]$

c) Valori massimi di Jerk: $\Psi = \frac{Va_{nc}}{3.6L} \left[\frac{m}{s^3}\right]$

$$\Psi_A = \frac{100 * 0.6}{3.6 * 80} = 0.21 \left[\frac{m}{s^3}\right] \leq 0.25$$

$$\psi_B = \frac{105 * 0.8}{3.6 * 80} = 0.29 \left[\frac{m}{s^3} \right] \leq 0.35$$

d) Valori massimi di Rollio: $\omega = \frac{h\nu}{3.6sL} [\frac{rad}{s}]$

$$\omega_A = \frac{100 * 100}{3.6 * 1435 * 80} = 0.024 \left[\frac{rad}{s} \right] \leq 0.036$$

$$\omega_B = \frac{100 * 105}{3.6 * 1435 * 80} = 0.025 \left[\frac{rad}{s} \right] \leq 0.038$$

Solamente ora si possono ritenere soddisfatte tutte le verifiche afferenti la dinamica di marcia; pertanto, è lecito incrementare la velocità di Rango A da 80 a 100 $[km/h]$ e quella di Rango B da 90 a 105 $[km/h]$, che in termini percentuali significa aumentare del 25% la velocità di Rango A e del 16.7% la velocità di Rango B.

Ulteriore novità introdotta è l'apertura del binario IV di Ivrea per ospitare i treni svolgenti servizio viaggiatori tra la stessa e Novara, con fermata intermedia a Chivasso. Tali convogli risultano essere tutti di tipologia ALe500. A differenza degli altri, il quarto binario è definito “di testa” in quanto non presente un proseguimento dello stesso lato Aosta: presenta una lunghezza di 221 [m] e il marciapiedi si trova nella zona del Movicentro.



Figura 58 - Identificazione binario IV di Ivrea ed aree annesse

In riferimento alla Figura 58, per potervi accedere, i convogli dovranno trovarsi sul terzo binario (colore blu) e per mezzo della comunicazione 112 sarà possibile cambiare itinerario. Le caratteristiche geometriche dei deviatori incontrati (112b, 112a) sono le stesse e di seguito riportate:

con piano di posa destro e velocità di percorrenza del ramo deviato pari a 30 [km/h]. In Figura 57, evidenziato di rosso si può notare il binario IV, in giallo il marciapiedi e cerchiata di verde l'area del Movicentro. Si rammenta che il binario IV attualmente viene utilizzato come binario di scalo e che le manovre dei deviatori sono a mano per mezzo di sblocco della apposita chiave F.D. Ciò semplifica gli interventi da effettuare in quanto bisognerebbe solamente sostituire eventuali traverse vetuste ed installare il movimento elettrico dei deviatori. Inoltre, la linea di contatto risulta essere già presente, anche se attualmente disalimentata. Infine, per non perdere binari di scalo, dal binario IV si potrebbe installare un nuovo deviatoio (o riutilizzare la comunicazione 112 così da varare nuovi deviatori sui binari che svolgono servizio viaggiatori) al quale collegare il nuovo binario di ricovero mezzi d'opera (area evidenziata in arancione). In conclusione, si ricorda che nella tratta tra Strambino e Ivrea è presente una travata metallica che attraversa il fiume Chiusella, la quale dovrà essere ampliata per permettere l'affiancamento del secondo binario.

Come visto i treni destinati ad essere ospitati sul binario IV sono quelli che svolgono il servizio Ivrea-Novara, identificandosi nei numeri di corsa: 11318, 11324, 11326, 11328, 11332, 11334, 11336, 11338, 11355, 11357, 11367, 11369, 11371, 11375, 11377, 11379, 11381 per un totale di 16 percorsi svolgenti servizio a spola tra le due città.

A questo punto noti i nuovi parametri da introdurre si è potuta lanciare la simulazione. Come input di partenza si sono forniti gli orari delle corse relativi al raddoppio selettivo e una volta ottenuto l'output finale si è lavorato direttamente sull'orario grafico restituito da OpenTrack. Come detto si sono introdotte nuove corse con i seguenti orari:

ID Corsa	Chivasso	Montanaro	Rodallo	Caluso	Candia	Strambino	Ivrea
11359	06:07:00	06:11:00	06:16:00	06:20:00	06:24:00	06:30:00	06:37:00
11306	07:10:00	07:05:00	07:00:00	06:56:00	06:52:00	06:46:00	06:40:00
11308	08:00:00	07:55:00	07:50:00	07:46:00	07:42:00	07:36:00	07:30:00
11363	08:15:00	08:19:00	08:24:00	08:28:00	08:32:00	08:38:00	08:45:00
11385	12:15:00	12:19:00	12:24:00	12:28:00	12:32:00	12:38:00	12:45:00
11310	13:50:00	13:45:00	13:40:00	13:36:00	13:32:00	13:26:00	13:20:00
11387	19:50:00	19:54:00	19:59:00	20:03:00	20:07:00	20:13:00	20:20:00
11389	22:20:00	22:24:00	22:29:00	22:33:00	22:37:00	22:43:00	22:50:00
11312	23:20:00	23:16:00	23:12:00	23:09:00	23:06:00	23:01:00	22:55:00

Tabella 9 – Orari riferiti alle nuove corse introdotte

Come si può notare, principalmente sono state introdotte corse mattutine e pomeridiane/serali (periodi della giornata dove la domanda di mobilità è maggiore). Inoltre, in questo modo si riescono a ricoprire orari che prima venivano serviti solamente da società di trasporto su gomma; un caso pratico è il treno 11306.

Confrontando poi il diagramma velocità-spazio del convoglio ETR421 (Figura 59), corsa 2717 (la stessa già analizzata nei paragrafi precedenti) si percepisce come la velocità media di percorrenza si sia innalzata grazie a due fattori: aumento della velocità di rango dalla stazione di Caluso sino allo sbocco della galleria di Caluso per un'estensione di 1573 [m] e l'annullamento dei tempi di attesa per rispettare gli incroci.

Come detto poco sopra, per inserire le nuove corse si è lavorato direttamente sull'orario grafico ottenuto in output, dal quale si può percepire che al mattino si è riusciti ad ottenere un secondo intervallo d'orario dedicato alla manutenzione dell'infrastruttura, indicativamente compreso tra le ore 9:20 e le 9:40.

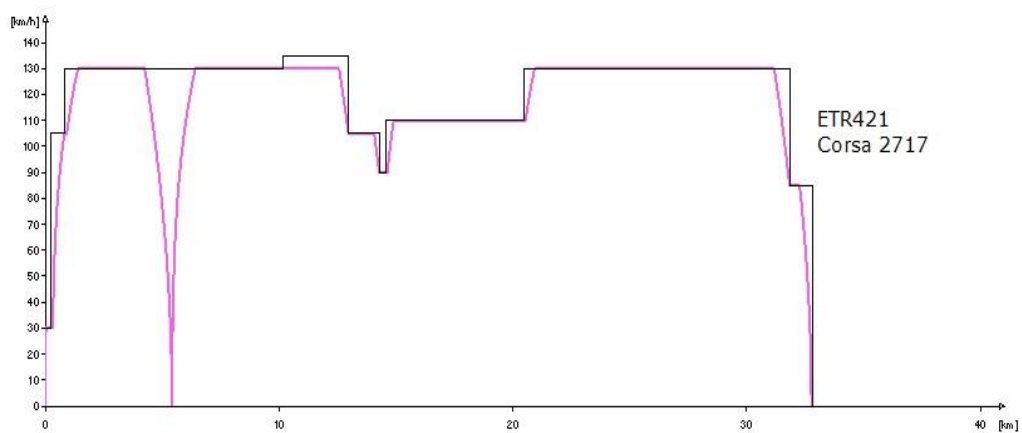


Figura 59 - Nuovo diagramma Velocità-Spazio del ETR421, corsa 2717

Pertanto, non si è ritenuto opportuno inserire nuove tracce orarie in detto intervallo in quanto la domanda di mobilità non risulta essere al suo massimo picco e al tempo stesso si riesce a impegnare in maniera più efficiente il personale di manutenzione.

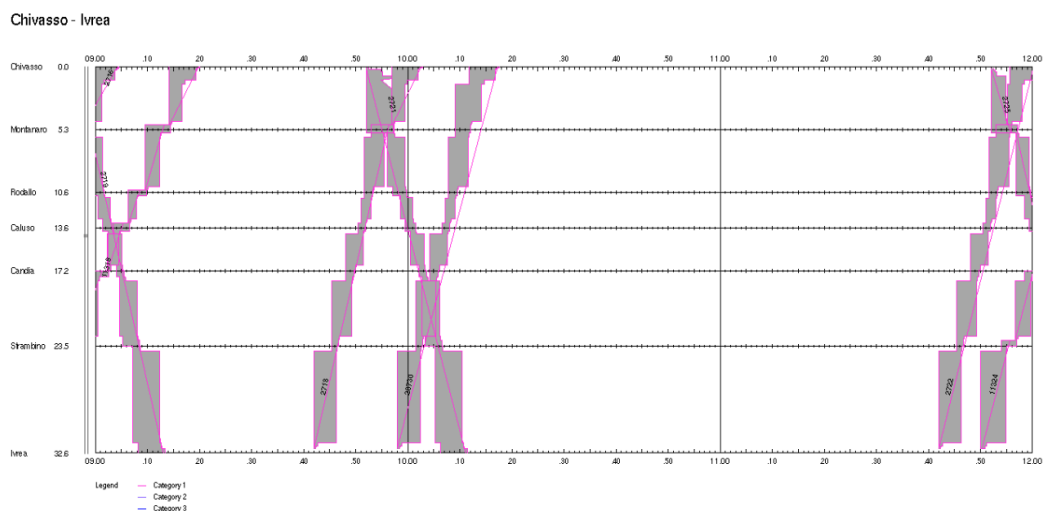


Figura 60 – Estratto del nuovo orario grafico. Si possono notare i due intervalli manutentivi ricadenti nella finestra temporale che va dalle ore 09:00 alle ore 12:00

Sfruttando quanto riportato in Figura 60 ci si è focalizzati sullo spazio temporale compreso tra le ore 09:00 e le 12:00 dove nello specifico si nota il primo intervallo libero tra le ore 09:20 e 09:40 e il secondo tra le 10:30 e le 11:40 (quest'ultimo già esistente).

Infine, si riporta a titolo generale l'orario grafico completo della nuova linea, dove anche solo visivamente è possibile intuire l'avvenuta del raddoppio completo in

quanto le tracce orarie risultano essere più regolari, gli incroci tra esse non vedono tempi di attesa e gli stessi si verificano anche in tratta.

Chivasso - Ivrea

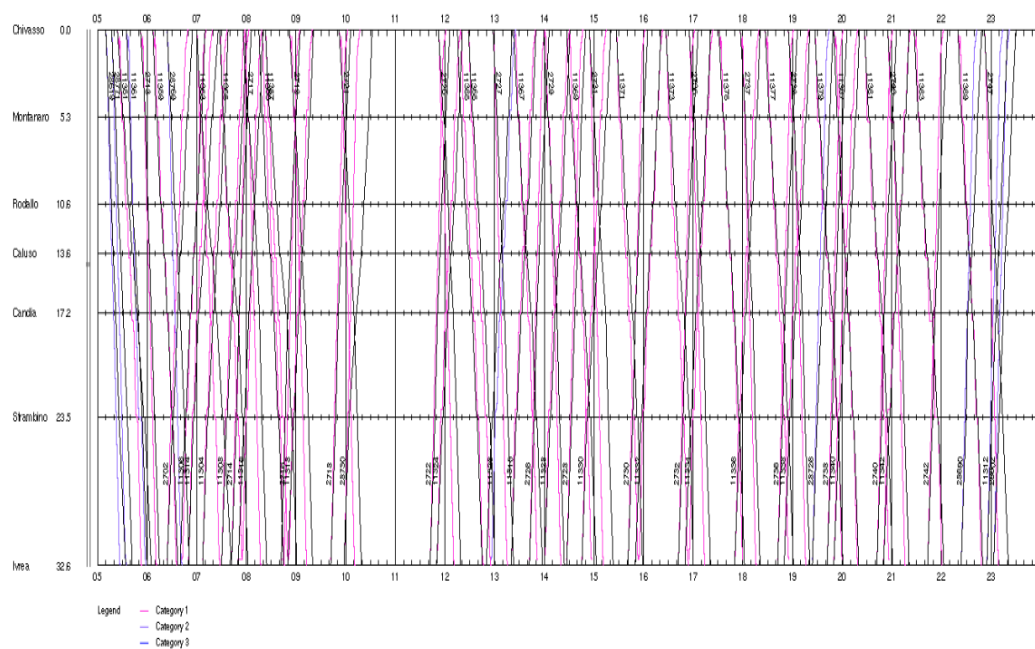


Figura 61 - Orario grafico completo a seguito di raddoppio totale di binario

Infine, per garantire una maggiore stabilità d'orario si è deciso di sopprimere alcuni passaggi a livello, data la notevole concentrazione lungo linea. Una riduzione del numero di p.l. infatti riduce la probabilità di guasto, riducendo così i possibili ritardi che possono venire a crearsi. I p.l. in questione sono tutti di campagna e sono ubicati alle seguenti progressive: 29+258, 28+525, 26+059, 25+359. Per quanto riguarda i restanti (ancora numerosi) bisognerebbe dedicare uno studio specifico in modo da trovare soluzioni anche per la circolazione stradale, ma non è questa la sede di dibattito.

A conclusione del paragrafo, anche in questo caso si è voluto capire se la linea risultasse congestionata ed eventualmente quale fosse la capacità consumata (CC) e quella residua (CR). Nello scenario attuale, si è riscontrato che la sezione critica risulta essere quella compresa tra le stazioni di Strambino e Ivrea, avente un'estensione pari a 5960 [m]. Il tempo di occupazione della sezione è pari a 5

[min] e i treni osservati nella finestra temporale di due ore risultano essere undici, sempre nell'intervallo compreso tra le 07:00:00 e le 09:00:00.

Il tempo di occupazione (OT) risulta essere pari a:

$$S = OT = n^{\circ}treni * t_{occupazione} = 11 * 6 * 60 = 3960 [s]$$

Da cui deriva un tempo di occupazione relativo (OTR):

$$OTR = \frac{OT}{finestra\ temporale} = \frac{3960}{2 * 60 * 60} = 55\% < 85\%$$

Non risultando la linea congestionata si è calcolata la capacità consumata (CC):

$$ATR = \frac{100}{85} - 1 = 0.176$$

$$CC = \frac{OT (1 + ATR)}{finestra\ temporale} = \frac{3960 (1 + 0.176)}{2 * 60 * 60} = 64.7\%$$

Quindi la capacità residua (CR):

$$CR = 100 - CC = 100 - 64.7 = 35.3\%$$

Come ci si attendeva, a seguito di raddoppio completo di binario, la linea risulta essere poco congestionata, nonostante siano state inserite otto corse svolgenti servizio viaggiatori, una come materiale vuoto e sia stata dedicata una nuova finestra temporale di manutenzione giornaliera. Si tenga infine presente che in prospettiva futura, qualora ve ne fosse la necessità, la capacità potrebbe essere ulteriormente incrementata se al posto di un distanziamento tra treni realizzato tramite blocco elettrico conta-assi si optasse per il blocco elettrico automatico. Infatti, le sezioni risulterebbero pari al massimo spazio di frenatura del convoglio più sfavorevole, ma di certo inferiore allo spazio compreso tra le stazioni di Strambino ed Ivrea. Con tale distanziamento non occorrerebbe attendere l'arrivo del treno che precede nella stazione successiva, ma una volta rispettata la distanza dettata dalle sezioni di blocco il treno potrebbe essere inviato. Ad ogni modo con la domanda di mobilità attuale e con gli interventi già proposti non si è ritenuto necessario ricorrere a tale sistema di distanziamento.

10.11 NOTE RIASSUNTIVE

A completezza di quanto simulato e presentato nei precedenti paragrafi, si è voluto riportare un quadro conclusivo e riassuntivo del lavoro svolto. Pertanto, si sono confrontati tra loro diversi scenari (nello specifico gli scenari 0,3,4,5,6,9) in due fasce orarie della giornata (dalle 06:24 alle 09:00 e dalle 16:54 alle 19:21), scelte in quanto quelle con maggiori flussi e maggior numero di treni, risultando così essere le più significative. Gli scenari sono stati confrontati a due a due e sempre con ordine crescente (es. Scenario 0 – Scenario 3, Scenario 3 – Scenario 4 e così via...). I risultati ottenuti sono stati riassunti in tabella, della quale si riporta un estratto:

<i>ID Corsa</i>	<i>Scenario 0 - Scenario 3</i>	<i>Scenario 3 - Scenario 4</i>	<i>Scenario 4 - Scenario 5</i>	<i>Scenario 5 - Scenario 6</i>	<i>Scenario 6 - Scenario 9</i>
2702					
2702	00:00:00	00:00:00	00:00:49	00:00:09	00:00:42
2702	00:01:27	00:00:03	-00:01:09	00:00:05	00:00:57
2702	-00:01:27	-00:00:03	00:01:01	00:00:07	00:00:42
2702	00:01:06	00:00:03	-00:00:04	00:00:04	00:00:09
2702	-00:01:06	-00:00:03	00:01:46	00:00:04	00:00:01
2702	00:01:57	-00:01:52	00:02:17	00:00:35	00:02:31
2714					
2714	00:01:37	00:00:01	-00:00:35	00:00:00	00:00:28
2714	-00:00:12	00:00:00	-00:01:37	00:00:00	-00:00:21
2714	00:00:56	00:00:00	-00:00:29	00:00:00	00:00:34
2714	00:00:14	00:00:00	-00:00:12	00:00:00	00:00:28
2714	00:02:32	00:00:00	-00:00:15	00:00:00	00:00:09
2714	00:04:32	00:00:01	-00:03:12	00:00:00	00:01:22
2716					
2716	00:00:41	00:00:00	-00:00:29	00:00:00	00:01:24
2716	-00:05:32	00:00:00	00:03:43	00:00:00	00:01:37
2716	00:00:56	00:00:00	-00:00:29	00:00:00	00:00:34
2716	00:00:14	00:00:00	-00:00:12	00:00:00	00:00:28
2716	00:02:32	00:00:00	-00:00:07	00:00:00	00:00:01
2716	00:00:15	00:00:00	00:00:41	00:00:00	00:00:36
2717					
2717	00:00:00	00:00:00	00:05:10	00:00:00	00:00:00

2717	00:01:20	00:00:00	00:00:02	00:00:00	00:00:00
2717	00:01:14	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:07
2717	00:00:56	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:02
2717	-00:00:12	00:00:00	00:00:00	00:00:00	-00:00:01
2717	00:04:21	00:00:05	00:01:32	00:00:00	-00:02:27
2732					
2732	00:01:37	00:00:01	-00:00:35	00:00:00	00:00:28
2732	-00:00:12	00:00:00	-00:01:37	00:00:00	00:01:10
2732	00:00:56	00:00:00	-00:00:29	00:00:00	00:00:34
2732	00:00:14	00:00:00	-00:00:12	00:00:00	00:00:28
2732	00:02:32	00:00:00	-00:00:07	00:00:00	00:00:01
2732	00:06:31	00:00:01	-00:04:55	00:00:00	00:02:40
2735					
2735	00:00:00	00:00:00	00:05:10	00:00:00	00:00:00
2735	00:01:20	00:00:00	00:00:02	00:00:00	00:00:00
2735	00:01:14	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:07
2735	00:00:56	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:02
2735	-00:00:12	00:00:00	00:00:00	00:00:00	-00:00:01
2735	00:04:21	00:00:05	00:02:12	00:00:00	00:00:08
2736					
2736	00:01:37	00:00:01	-00:00:35	00:00:00	00:00:33
2736	-00:00:12	00:00:00	-00:01:37	00:00:00	00:01:37
2736	00:00:56	00:00:00	-00:00:29	00:00:00	00:00:34
2736	00:00:14	00:00:00	-00:00:12	00:00:00	00:00:28
2736	00:02:32	00:00:00	-00:00:07	00:00:00	00:00:01
2736	00:04:32	00:00:01	-00:02:59	00:00:00	00:03:12
2737					
2737	00:02:51	-00:01:54	00:00:00	00:00:00	00:00:00
2737	00:00:32	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
2737	00:00:15	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:07
2737	00:01:56	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:02
2737	-00:00:12	00:00:00	00:00:00	00:00:00	-00:00:01
2737	00:06:30	-00:01:54	00:00:00	00:00:00	00:00:08
2739					
2739	00:00:00	00:00:00	00:03:00	00:00:00	00:00:00
2739	00:01:20	00:00:00	00:00:02	00:00:00	00:00:00
2739	00:01:14	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:07
2739	00:00:56	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:02
2739	-00:00:12	00:00:00	00:00:00	00:00:00	-00:00:01
2739	00:04:34	-00:00:08	00:00:02	00:00:00	00:00:08
11304					
11304	00:00:00	00:00:00	-00:00:09	00:00:00	00:00:46
11304	00:00:00	00:00:00	00:00:09	00:00:00	00:06:00
11304	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:01:00

11304	00:00:00	00:00:00	00:01:52	00:00:18	00:02:34
11304	00:00:00	00:00:00	00:01:24	00:00:00	-00:01:03
11304	00:02:10	-00:01:59	00:03:16	00:00:18	00:09:17
11314					
11314	00:00:00	00:00:00	-00:00:09	00:00:00	00:00:46
11314	00:00:00	00:00:00	00:00:29	00:00:00	00:00:40
11314	00:00:00	00:00:00	00:01:36	00:00:00	00:00:24
11314	00:00:00	00:00:00	00:00:13	00:00:00	00:00:12
11314	00:00:00	00:00:00	00:01:24	00:00:00	00:00:00
11314	00:01:11	00:00:00	00:03:33	00:00:00	00:02:02
11316					
11316	00:00:00	00:00:00	00:05:09	00:00:00	00:00:37
11316	00:00:00	00:00:00	00:00:39	00:00:00	00:06:57
11316	00:00:00	00:00:00	00:03:25	00:00:00	00:00:34
11316	00:00:00	00:00:00	00:02:57	00:00:00	-00:00:03
11316	00:00:00	00:00:00	00:03:42	00:00:00	00:00:00
11316	00:01:10	00:00:00	00:13:56	00:00:00	00:03:03
11334					
11334	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:05:20
11334	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:05:52
11334	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:02:00
11334	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:01:44
11334	00:00:00	00:00:00	-00:03:58	00:00:00	00:07:26
11334	00:01:10	-00:01:59	-00:04:02	00:00:00	00:17:54
11336					
11336	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:05:20
11336	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:06:09
11336	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:01:31
11336	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:01:44
11336	00:00:00	00:00:00	-00:00:02	00:00:00	00:03:26
11336	00:01:10	-00:01:59	-00:00:02	00:00:00	00:18:10
11338					
11338	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:05:37
11338	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:06:09
11338	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:01:06
11338	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:01:44
11338	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:03:24
11338	00:01:10	-00:01:59	00:00:00	00:00:00	00:18:00
11353					
11353	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
11353	00:00:00	00:00:00	00:06:35	00:00:00	00:00:00
11353	00:00:00	00:00:00	00:01:23	00:00:00	00:00:05
11353	00:00:00	00:00:00	00:01:07	00:00:00	00:00:00
11353	00:00:00	00:00:00	00:03:11	00:00:00	00:00:00

11353	00:01:45	-00:00:46	00:09:16	00:00:00	00:00:11
11355					
11355	-00:00:13	00:00:10	-00:00:10	00:00:10	00:00:00
11355	00:00:13	-00:00:10	00:00:18	00:00:08	00:00:00
11355	00:00:00	00:00:00	00:01:11	00:00:06	00:00:05
11355	00:00:00	00:00:00	-00:01:19	-00:00:24	00:07:44
11355	00:00:00	00:00:00	00:03:56	00:00:08	00:00:00
11355	00:01:26	00:00:07	00:02:59	00:00:15	00:07:13
11357					
11357	00:00:00	00:00:00	00:05:06	00:00:00	00:00:00
11357	00:00:00	00:00:00	00:01:35	00:00:00	00:00:00
11357	00:00:00	00:00:00	00:00:23	00:00:00	00:00:05
11357	-00:03:40	-00:00:11	-00:03:40	00:00:00	00:12:38
11357	00:03:40	00:00:11	00:00:20	00:00:00	-00:00:46
11357	00:01:45	-00:00:46	00:03:44	00:00:00	00:11:47
11375					
11375	-00:01:12	00:00:04	00:00:20	00:00:00	00:04:00
11375	00:01:12	-00:00:04	00:00:27	00:00:00	00:00:00
11375	00:00:00	00:00:00	00:00:23	00:00:00	00:00:05
11375	00:00:00	00:00:00	00:05:07	00:00:00	00:00:00
11375	00:00:00	00:00:00	00:01:43	00:00:00	00:01:55
11375	00:01:40	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:05:20
11377					
11377	-00:01:12	00:00:04	00:04:20	00:00:00	00:00:00
11377	00:01:12	-00:00:04	-00:00:20	00:00:00	00:00:47
11377	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:28
11377	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:05:07
11377	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:04:11
11377	00:00:59	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:10:31
28769					
28769	00:01:48	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
28769	00:01:32	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
28769	-00:03:20	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:10:41
28769	00:01:52	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:03
28769	-00:01:52	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:10:21
28769	00:01:30	-00:00:46	00:00:15	00:00:00	00:21:35
	<i>Differenza media percorrenza</i>	<i>Differenza media percorrenza</i>	<i>Differenza media percorrenza</i>	<i>Differenza media percorrenza</i>	<i>Differenza media percorrenza</i>
	00:02:36	-00:52:00	00:01:47	00:00:23	00:06:21

Tabella 10 - Riassunto e confronto tra i differenti scenari

L'ultima riga della tabella riporta la media tra le differenze di orario confrontate tra gli scenari presi in considerazione. Come si può notare, a mano a mano che

sono state introdotte migliorie al sistema, i tempi di percorrenza si sono mediamente ridotti, ad eccezione dello Scenario 4, che coerentemente con i dati illustrati in precedenza indica che, in quello specifico caso, i convogli E.464 risultano essere maggiormente performanti rispetto gli ETR421.

11. ULTERIORI PROPOSTE

Oltre a quanto illustrato e proposto in tale sede, nel corso degli anni sono stati svolti studi con finalità uguali o simili a quelle ricercate, anche se principalmente si è tentato di ridurre i tempi di percorrenza dell'intera linea (Chivasso-Aosta).

Infatti, uno studio condotto qualche anno addietro, aveva ipotizzato la creazione di una “lunetta” tra le stazioni di Montanaro e Chivasso con lo scopo ridurre ulteriormente i tempi di percorrenza tra Aosta e Chivasso, specie per i treni “Regionale Veloce” (RV) diretti per Torino. Pur non entrando nello specifico dei calcoli effettuati si vuole analizzare in maniera generale cosa potesse implicare tale progetto, evidenziando gli aspetti positivi ed eventuali ripercussioni negative.

Prima di evidenziare la proposta progettuale si vuole richiamare quale sia il livello di gerarchizzazione della rete ferroviaria nazionale. Come noto al lettore il traffico ferroviario è decisamente eterogeneo (in termini di distanze percorse, convogli utilizzati, velocità di percorrenza, tipologia di servizio offerto e molto altro ancora) e si capisce fin da subito come esso debba essere organizzato per poter funzionare al meglio. Il concetto di partenza è pressoché identico al caso stradale dove è noto che le strade non ricoprono tutte la stessa importanza (si pensi alle autostrade, strade statali, provinciali, comunali, di quartiere, ecc...). Allo stesso modo è organizzata l'infrastruttura ferroviaria nazionale con linee dedicate AV/AC, linee primarie, secondarie e non elettrificate. La differenziazione della rete è quindi funzione delle caratteristiche di traffico sulla stessa e differenziare la rete significa selezionare nodi (stazioni/città) propedeutici al volume di traffico ed utilizzo della linea stessa. Per riportare un esempio si immagini la linea AV/AC tra Torino e Milano: per usufruire al meglio le caratteristiche dei convogli e dell'infrastruttura risulta chiaro come tra i due capoluoghi non possano esistere fermate intermedie, ma gli stessi dovranno essere collegati alle linee primarie e secondarie per mezzo di infrastrutture e servizi passeggeri di tipo regionale o locale. In questo modo si ottiene una corretta gerarchizzazione ed organizzazione funzionale della rete.

Chiarito il concetto di gerarchizzazione della rete, si ricorda che scopo della presente tesi è quello di apportare migliorie alla linea Chivasso-Ivrea facente però

parte del collegamento fino a Torino. Infatti, la maggior parte degli spostamenti avviene la mattina tra i capoluoghi Valdostano e Canavesano con quello Piemontese, mentre alla sera la situazione si inverte.

Ecco, dunque, che lo scopo della realizzazione della lunetta prevedeva di non far transitare il treno diretto (Aosta-Torino) da Chivasso, dove tutt'oggi deve rimanere fermo per qualche minuto in attesa dell'incrocio con il convoglio che proviene da Torino, ma creare una deviazione prima di Montanaro che lo immettesse direttamente sulla linea Torino – Milano (Figura 62).



Figura 62 - Schema "lunetta" di Chivasso

Come si può notare, in giallo è evidenziato l'attuale percorso mentre in rosso la così detta "lunetta". La collocazione di quest'ultima è rappresentata in via del tutto generale, ma la collocazione fisica del progetto era pressoché la stessa.

Come facilmente intuibile questo avrebbe permesso di risparmiare diversi minuti di percorrenza (da 10 a 15) grazie all'eliminazione dei tempi di attesa a Chivasso. Al tempo stesso però si sarebbe sacrificata la fermata stessa. Così facendo si sarebbe dovuto dividere il traffico viaggiatori tra chi desiderava recarsi solo a Chivasso e chi invece era intenzionato a proseguire il proprio viaggio sino a Torino.

Ai fini della proposta progettuale la soluzione esposta garantisce la riduzione dei tempi di percorrenza tra Aosta e Torino. Al tempo stesso però, non intervenendo direttamente sulla linea già esistente le problematiche connesse al singolo binario non verrebbero eliminate, restando il problema della stabilità d'orario. Infatti, anche se i tempi di percorrenza dovessero ridursi, il che vorrebbe dire migliorare la capacità della linea (anche se di poco in questo caso), resterebbe il problema della gestione degli incroci.

Inoltre, per i concetti di gerarchizzazione della rete richiamati in precedenza, i nodi di Aosta, Ivrea e Chivasso devono essere considerati come facenti parte tutti della stessa categoria. Aosta, infatti, raccoglie il bacino d'utenza della Regione, il quale si riversa sulla città di Ivrea che attira utenza in tutto il suo circondario e parte del Canavese. Infine, gran parte del flusso passeggeri creatosi si riversa nella città di Chivasso, dove in parte viene smaltito, ma in parte nuovamente generato.

Risulta quindi chiaro come la scelta progettuale proposta mirava a selezionare nodi, in questo caso eliminando Chivasso. Ciò avrebbe significato perdere un nodo di uguale importanza ad Ivrea e Aosta e proprio per questo motivo tale scelta viene condivisa in questa sede. Infatti, operando in questo modo si poteva perdere parte della domanda di mobilità, riducendo i flussi con il rischio di peggiorare il servizio offerto. Per recuperare i 10-15 minuti che si sarebbero potuti risparmiare realizzando la "lunetta" si ritiene più efficiente ottimizzare i tempi di attesa dei convogli nella stazione di Chivasso. Inoltre, tenendo conto delle simulazioni effettuate nei capitoli precedenti, si avrebbero già riduzioni nei tempi di percorrenza, così da garantire e rafforzare la possibilità di efficientare i tempi di attesa nella stazione di Chivasso.

Infine, per realizzare la "lunetta" si sarebbero dovuti installare deviatori in linea, aspetto che va in contro tendenza con le azioni intraprese da R.F.I. nel corso degli anni, dove per garantire maggiore sicurezza sull'infrastruttura si è preferito mantenere (dove possibile) solamente i deviatori presenti all'interno delle aree di stazione.

A conclusione di ciò, quindi, la scelta di aggirare la stazione di Chivasso con tale sistema non è consigliabile, ma bisogna cercare di intervenire sull'infrastruttura esistente cercando di potenziarla con le soluzioni proposte.

12. CONCLUSIONI

Al fine di rendere maggiormente comprensibile il percorso e le scelte adoperate, si vuole riportare un indice conclusivo e riassuntivo.

La linea Chivasso - Ivrea per i tempi moderni risulta essere a tratti superata, specialmente a causa del singolo binario che limita la capacità della stessa, del numeroso numero di passaggi a livello, (i quali nell'arco di un anno capita che si guastino, facendo accumulare ritardo ai treni, in alcuni casi tale da far sopprimere alcune corse) e delle modalità con le quali vengono gestiti gli incroci. Tutto ciò si ripercuote sui pendolari che ogni giorno utilizzano il servizio per muoversi tra le città di Ivrea e Chivasso o più in generale tra Torino e Aosta.

Lo scopo allora era quello di trovare soluzioni migliorative, ma al tempo stesso di razionale realizzazione e con il minor impatto possibile sul territorio attraversato. Per fare ciò si sono analizzati differenti scenari di esercizio, partendo da quello attuale (Scenario 0 - utilizzato anche per calibrare il modello) sino ad arrivare al raddoppio completo e alla riapertura del binario IV di Ivrea per il servizio viaggiatori (Scenario 9).

In mezzo a queste due situazioni limite si è esaminata l'opzione di un raddoppio selettivo del binario nelle tratte tra: Chivasso-Montanaro, Montanaro-Rodallo, Rodallo-Caluso e Candia-Strambino. Si ricorda che sono state scelte queste tratte in quanto il maggior numero di incroci si verifica a Montanaro e Candia (oltre che Strambino) e perché presenti minori opere civili e di armamento da realizzare.

Per poter valutare se la proposta fosse migliorativa si è utilizzato il software OpenTrack e tramite l'analisi dei dati di output si è potuto comprendere la bontà delle azioni migliorative intraprese. Nello specifico si sono analizzati i dati riguardanti i nuovi orari che si venivano a creare, i diagrammi velocità-spazio e spazio-tempo, nonché la capacità consumata e disponibile della linea.

Ogni volta a piccoli step si sono introdotti elementi migliorativi e ogni volta si è svolta l'analisi per mezzo del software.

Da quanto emerso si può quindi dedurre che:

- a) La linea Chivasso – Ivrea nelle condizioni attuali risulta essere al limite della congestione, infatti una piccola perturbazione quale condizioni climatiche avverse o guasti imprevisti all’infrastruttura, genera ritardi anche importanti, che in alcuni casi possono portare alla cancellazione di alcune corse.
- b) Non intervenendo sull’armamento, ma solamente sugli enti IS e nello specifico nelle stazioni di Montanaro e Strambino (Scenario 1), tramite movimento in contemporaneo dei convogli che incrociano in tali stazioni è possibile recuperare qualche minuto per ogni stazione in esame.
- c) Non intervenendo sull’infrastruttura (a parità di Scenario 0), ma sul solo materiale rotabile e nello specifico sostituendo i convogli E.464 con gli ETR421 il servizio dei singoli treni resta invariato, anche se presente qualche ripercussione negativa sul sistema in generale.
- d) Adoperando un raddoppio selettivo nelle tratte sopra citate si ha un sostanziale miglioramento del servizio, sia in termini di tempi di percorrenza che stabilità dell’orario (ora la capacità residua risulta essere pari al 21.6%). Inoltre, è possibile inserire nuove tracce orarie, oppure sfruttare i momenti privi di circolazione per effettuare lavori di manutenzione diurna dell’infrastruttura. Nonostante ciò, in caso di concomitanza di guasti all’infrastruttura ed eventi eccezionali, i treni accumulano diverso ritardo generando in alcuni casi ancora la saturazione della linea con conseguente cancellazione di alcune corse.
- e) Introducendo convogli ETR421 al posto degli E.464, adoperando un raddoppio selettivo e considerando differenti cause di disturbo alla circolazione, i primi risultano essere più efficienti sia nelle singole corse sostitutive che nel servizio generale offerto.
- f) Optando per un raddoppio completo della linea, soppressione di alcuni passaggi a livello, innalzamento delle velocità di rango in alcuni punti ed apertura del binario IV di Ivrea il servizio migliora notevolmente (la capacità residua ora è pari al 29%). Inoltre, si riescono ad inserire un totale di 10 nuove corse di cui 8 servizio viaggiatori e 2 invii vuoti, oltre ad avere la possibilità di inserire altre corse e garantire una notevole stabilità d’orario. Ulteriore aspetto

positivo è la possibilità di usufruire di una seconda finestra temporale dedicata ai lavori di manutenzione diurni.

Non si vuole pertanto esprimere un giudizio assoluto su quale sia la migliore scelta progettuale da effettuare, ma si è voluto evidenziare come con diverse possibilità di intervento e spesa, si riescano a migliorare aspetti salienti della linea Chivasso – Ivrea. A nota conclusiva del lavoro svolto si riporta la seguente tabella, la quale mette a confronto e riassume in maniera numerica i risultati ottenuti dai dieci scenari analizzati.

13. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

13.1 BIBLIOGRAFIA

Ricci S., Accattatis F., Antognoli M., Baldassarra A., Bruner M., Cappelli A., Cosciotti E., D'Ovidio G., Libardo A., Malavasi G., Tieri A., *Ingegneria dei sistemi ferroviari*, EGAF, 2013

Shih, M.-C., (rex) Lai, Y.-C-, Dick, C.T., Wu, M.H, *Optimization of Siding Location for Single-Track Lines*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.2448, Washington, 2014

Emery D, *Increasing the capacity of a single-track line*, 10th Swiss Transport Research Conference, Ascona, 2010

Diana M., *Tecnica ed economia dei trasporti*, Dispense del corso, Politecnico di Torino, 2018

Dalla Chiara B., *Sistemi di trasporto ferroviari, metropolitani e a fune*, Dispense del corso, Politecnico di Torino, 2020

Baglieri O., *Costruzione di strade, ferrovie e aeroporti*, Dispense del corso, Politecnico di Torino, 2018

Ognibene L., *Simulazione di modelli di esercizio ferroviario: analisi sulla stabilità e potenziamento del servizio sulla linea Torino – Pinerolo*, tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2021

Ragno F., *Costruzione di modelli di esercizio ferroviario: analisi multi-scenario per il potenziamento dei servizi sulla direttrice Torino – Alba*, tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2019

Rete Ferroviaria Italiana, *Linea Chivasso-Ivrea, planimetria e profilo*, 2008

Rete Ferroviaria Italiana, *Tabellino di picchettazione del tracciato delle curve*, 2020

Rete Ferroviaria Italiana, *Norme tecniche per la progettazione dei tracciati ferroviari*, RFI TCAR ST AR 01 001 A

Rete Ferroviaria Italiana, *Prefazione Generale all'Orario di Servizio (PGOS)*, 2018

Rete Ferroviaria Italiana, *Norme tecniche per la determinazione delle velocità massime d'orario delle linee esistenti*, RFI TCAR IT AR 01 002 A

Rete Ferroviaria Italiana, *Fascicolo circolazione linea (FCL) n°5*, 2003

Rete Ferroviaria Italiana, *Regolamento sui segnali in uso sull'infrastruttura nazionale*, 2009

Rete Ferroviaria Italiana, *Prescrizione "Variazione in corso d'orario delle tracce orario dei treni"*, 2006

Rete Ferroviaria Italiana, *Regolamento per la Circolazione dei Treni*, 2020

Fiche UIC 406R

Ferrovie Appulo Lucane, *Raddoppio selettivo in corrispondenza della stazione di Venusio per l'incrocio dinamico dei treni*, Progetto Definitivo, 2018

13.2 SITOGRAFIA

"Portale Applicazioni – Registro Infrastruttura", Febbraio-Marzo 2021

<https://portalerfi.rfi.it/irj/portal/internet/>

"Portale Applicazioni – Commerciale", Marzo 2021

<https://portalerfi.rfi.it/irj/portal/internet/>

"Interventi atti al potenziamento delle linee a singolo binario – Interventi Italferr", Agosto 2021

<https://www.italferr.it/content/italferr/it/progetti-e-studi/italia/linee-convenzionali/milano-genova-ventimiglia/interventi-italferr.html#4>

“Ferrovia Chivasso-Ivrea-Aosta”, Aprile 2021

https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Chivasso-Ivrea-Aosta

“Elettrotreno BTR 813”, Aprile 2021

https://it.wikipedia.org/wiki/Elettrotreno_BTR_813

“Minuetto (treno)”, Aprile 2021

[https://it.wikipedia.org/wiki/Minuetto_\(treno\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Minuetto_(treno))

“Locomotiva FS E.464”, Aprile 2021

https://it.wikipedia.org/wiki/Locomotiva_FS_E.464

“Il Mondo dei Treni – Materiale Rotabile – Locomotiva a 3000V CC – E.464”,
Maggio 2021

<http://www.ilmondodeitreni.it/E464.htm>

“Hitachi Rock”, Aprile 2021

https://it.wikipedia.org/wiki/Hitachi_Rock

“OpenTrack Railway Technology”, Febbraio-Marzo 2021

http://www.opentrack.it/opentrack_i/opentrack_i.html

“Associazione utenti ferrovia Chivasso-Ivrea-Aosta”, Maggio 2021

<http://www.utenti-chivasso-ivrea-aosta.it/>

“Segnali ferroviari italiani della rete R.F.I., normativa e tecnica storica della rete ferroviaria italiana”, Febbraio-Marzo 2021

<http://www.segnalifs.it/>