

Rapporto

# FART – Ferrovia della Centovalli: analisi e verifica dell'impianto di corrente di trazione elettrica

---

Studente

Alessandro Bianchi

Relatore

Ing. Luca Diviani

---

Correlatore

Ing. Matteo Montini

---

Committente

FART SA  
Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi

---

Corso di laurea

Ingegneria Meccanica  
(Tecnologia delle macchine TP)

Codice progetto

C10406

---

Anno

2020/2021

Luogo e data

Lugano, 03.09.2021



## *Ringraziamenti*

*Vorrei qui ringraziare il relatore Luca Diviani e il correlatore Matteo Montini per il costante supporto fornito durante questi mesi e per avermi concesso la possibilità di approfondire un tema interessante, interdisciplinare e di pratica applicazione.*

*Ringrazio inoltre la mia famiglia, Monica, Alessio, Letizia, Alan e la piccola Eryn per avermi sempre sostenuto durante questo periodo e lungo tutto il percorso di studi.*

## Indice generale

<b>Abstract</b> .....	<b>10</b>
<b>Progetto assegnato</b> .....	<b>12</b>
<b>1. Introduzione</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Obiettivi e pianificazione del lavoro</b> .....	<b>16</b>
2.1. Obiettivi.....	16
2.2. End user requirements .....	16
2.3. Simulazione.....	16
2.4. Pianificazione del lavoro.....	17
<b>3. Criteri di progettazione e verifica degli impianti di corrente di trazione</b> .....	<b>19</b>
3.1. Premessa .....	19
3.2. Elementi degli impianti di trazione in DC.....	19
3.3. Schemi di alimentazione .....	23
3.4. Posizione del problema .....	25
3.5. Verifica degli impianti di trazione.....	38
<b>4. Infrastruttura ferroviaria FART</b> .....	<b>40</b>
4.1. Introduzione.....	40
4.1. Cambiamenti infrastrutturali futuri .....	41
4.2. Esercizio ferroviario .....	41
4.3. Infrastruttura .....	44
4.4. Criteri di verifica dell'impianto TE .....	52
<b>5. Modellazione dell'impianto di corrente di trazione attuale</b> .....	<b>54</b>
5.1. Software TrainsRunner .....	54
5.2. Modellazione del tracciato e dell'orario .....	55
5.3. Modellazione del nuovo materiale rotabile.....	64
5.4. Modellazione dell'impianto di corrente di trazione .....	74
<b>6. Validazione del modello</b> .....	<b>85</b>
<b>7. Piano di simulazione</b> .....	<b>88</b>
<b>8. Analisi dei risultati</b> .....	<b>90</b>
8.1. Cadute di tensione .....	90
8.2. Carichi sui raddrizzatori.....	92
8.3. Taratura extrarapidi .....	93
8.4. Potenziale delle rotaie .....	94
<b>9. Criticità e misure di ottimizzazione</b> .....	<b>95</b>
9.1. Costruzione di una nuova SSE Camedo.....	95
9.2. Costruzione di una nuova SSE Locarno e revisione del nuovo concetto orario .....	101
9.3. Limitazione dei consumi ausiliari.....	108
<b>10. Influenza della temperatura</b> .....	<b>108</b>
<b>11. Miglioramenti futuri</b> .....	<b>109</b>

<b>12. Conclusioni.....</b>	<b>110</b>
<b>13. Bibliografia e sitografia .....</b>	<b>111</b>
<b>14. Iconografia.....</b>	<b>112</b>

## Indice delle figure

Figura 1 Diagramma di Gantt .....	17
Figura 2 Pianificazione del progetto .....	18
Figura 3 Schema impianto TE .....	19
Figura 4 Schema elettrico SSE in corrente continua .....	20
Figura 5 Schema di LC .....	22
Figura 6 Raffigurazione della sezione del conduttore LC (sinistra) e catenaria semplice (destra) .....	22
Figura 7 Schema elettrico di una linea alimentata a sbalzo .....	24
Figura 8 Schema elettrico di una linea alimentata bilateralmente .....	24
Figura 9 Rappresentazione delle forze sul piano inclinato .....	27
Figura 10 Schema elettrico impianto TE .....	30
Figura 11 Cadute di tensione negli impianti alimentati a sbalzo .....	34
Figura 12 Massime cadute di tensione in linea, alimentazione a sbalzo .....	34
Figura 13 Cadute di tensione negli impianti alimentati bilateralmente .....	36
Figura 14 Massime cadute di tensione in linea, alimentazione bilatera .....	37
Figura 15 Cadute di tensione in funzione della posizione del convoglio, alimentazione bilatera .....	37
Figura 16 Raffigurazione di un cortocircuito tra linea di contatto e circuito di ritorno .....	39
Figura 17 Visione satellitare della tratta Domodossola-Locarno .....	40
Figura 18 Visione satellitare della tratta Locarno-Camedo .....	40
Figura 19 Fermate lungo la linea L620 .....	41
Figura 20 FART ABe 4/6 [11] .....	42
Figura 21 FART ABe 4/8 [12] .....	42
Figura 22 FART ABDe 6/6 [13] .....	42
Figura 23 SSIF ABe 4/4 [14] .....	43
Figura 24 SSIF ABe 8/8 [15] .....	43
Figura 25 Nuovi treni Stadler [16] .....	43
Figura 26 Schema elettrico collegamento SSE-LC Ponte Brolla .....	46
Figura 27 Schema elettrico collegamento SSE-LC Intragna .....	46
Figura 28 Schema elettrico collegamento SSE-LC Verdasio .....	47
Figura 29 Circuito di ritorno binario-SSE presso Ponte Brolla (in rosa) .....	49
Figura 30 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Ponte Brolla .....	49
Figura 31 Circuito di ritorno binario-SSE presso Intragna (in rosa) .....	50
Figura 32 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Intragna .....	50
Figura 33 Circuito di ritorno binario-SSE presso Verdasio (in rosa) .....	51
Figura 34 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Verdasio .....	51
Figura 35 Diagramma di flusso TrainsRunner .....	54
Figura 36 Esempio di modellazione dei raccordi tra pendenze costanti (Caso 1) .....	56
Figura 37 Esempio di modellazione dei raccordi tra pendenze costanti (Caso 2) .....	57
Figura 38 Esempio di modellazione dei raccordi tra pendenze costanti (Caso 3) .....	58
Figura 39 Esempio di modellazione dei raccordi a raggio variabile tra curve a raggio costante (Caso 1) .....	59
Figura 40 Esempio di modellazione dei raccordi a raggio variabile tra curve a raggio costante e rettilinei (Caso 1) .....	59
Figura 41 Esempio di modellazione dei raccordi a raggio variabile tra curve a raggio costante (Caso 2) .....	60
Figura 42 Nuovi treni Stadler [16] .....	64
Figura 43 Caratteristica meccanica di un veicolo con motore di trazione a potenza costante .....	68
Figura 44 Caratteristica meccanica e forze di resistenza .....	69
Figura 45 Diagramma trazione/frenatura-velocità nuovi convogli Stadler a 3 casse .....	70
Figura 46 Diagramma trazione/frenatura-velocità nuovi convogli Stadler a 4 casse .....	70
Figura 47 Diagramma potenza al cerchione-tensione di linea nuovi convogli Stadler .....	71

Figura 48 Confronto resistenza chilometrica calcolata e dei conduttori LC presenti in commercio .....	75
Figura 49 Caratteristica tensione-corrente SSE Ponte Brolla .....	79
Figura 50 Caratteristica tensione-corrente SSE Verdasio .....	80
Figura 51 Esempio circuito positivo modellato in TrainsRunner .....	81
Figura 52 SSE Ponte Brolla modellata sul circuito positivo in TrainsRunner .....	82
Figura 53 Sezionamento reale effettuato tramite il parallelo dei conduttori LC (sopra) .....	82
Figura 54 Esempio di rimando per collegare livelli differenti .....	83
Figura 55 Esempio di circuito negativo modellato in TrainsRunner .....	83
Figura 56 SSE Ponte Brolla modellata sul circuito negativo in TrainsRunner .....	83
Figura 57 Tensioni linea in funzione della progressiva .....	85
Figura 58 Andamento delle cadute di tensione lungo la linea (in fucsia) .....	86
Figura 59 Distribuzione delle tensioni lungo la linea .....	86
Figura 60 Potenziale di rotaia in funzione della progressiva .....	87
Figura 61 Raffigurazione degli scenari con una SSE fuori esercizio .....	88
Figura 62 Alimentazione con SSE in parallelo (in alto) e alimentazione indipendente (in basso) .....	89
Figura 63 Piano di simulazione .....	89
Figura 64 Potenziale massimo binario per differenti scenari di esercizio .....	94
Figura 65 Schema elettrico collegamento SSE-LC Camedo .....	95
Figura 66 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Camedo .....	96
Figura 67 Tensioni in linea per differenti scenari di esercizio .....	98
Figura 68 Correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori extrarapidi .....	100
Figura 69 Potenziale massimo binario per differenti scenari di esercizio .....	100
Figura 70 Schema elettrico di collegamento SSE-LC Locarno .....	101
Figura 71 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Locarno .....	102
Figura 72 Schema di alimentazione con SSE isolate .....	102
Figura 73 Tensioni in linea per differenti scenari di esercizio .....	104
Figura 74 Correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori extrarapidi .....	107
Figura 75 Potenziale massimo binario per differenti scenari di esercizio .....	107
Figura 76 Confronto tensioni minime linea, temperatura conduttori 80°C vs 45°C .....	108

## Indice delle tabelle

Tabella 1	Legenda abbreviazioni .....	14
Tabella 2	Norme e regolamenti di riferimento utilizzati .....	14
Tabella 3	Esempi di coefficienti K secondo alcune nazionalità [8] .....	27
Tabella 4	Coefficienti a e b in funzione del raggio di curvatura [8] .....	28
Tabella 5	Tensioni limite di operabilità secondo EN 50163 .....	38
Tabella 6	Lista materiale rotabile attualmente in uso presso FART .....	42
Tabella 7	Lista materiale rotabile attualmente in uso presso SSIF .....	43
Tabella 8	Raffigurazione materiale rotabile futuro .....	43
Tabella 9	Tipo di rotaie e traverse presenti lungo L620 .....	44
Tabella 10	Caratteristiche principali SSE .....	44
Tabella 11	Caratteristiche principali LC .....	45
Tabella 12	Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Ponte Brolla .....	46
Tabella 13	Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Intragna .....	46
Tabella 14	Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Verdasio .....	47
Tabella 15	Schematizzazione del circuito di ritorno in presenza di un circuito di binario .....	48
Tabella 16	Caratteristiche principali dei cavi di collegamento binario-SSE Ponte Brolla .....	49
Tabella 17	Caratteristiche principali dei cavi di collegamento binario-SSE Intragna .....	50
Tabella 18	Caratteristiche principali dei cavi di collegamento binario-SSE Intragna .....	51
Tabella 19	Tensioni limite di operabilità secondo EN 50163 .....	52
Tabella 20	Sovracorrenti ammissibili per i raddrizzatori .....	52
Tabella 21	Identificazione materiale rotabile .....	63
Tabella 22	Lunghezze nuovi convogli Stadler .....	64
Tabella 23	Masse e masse rotanti nuovi convogli Stadler .....	65
Tabella 24	Coefficienti per le resistenze ordinarie nuovi convogli Stadler .....	66
Tabella 25	Coefficiente di moto in galleria nuovi convogli Stadler .....	66
Tabella 26	Coefficiente resistenze in curva nuovi convogli Stadler .....	66
Tabella 27	Carichi ausiliari nuovi convogli Stadler .....	67
Tabella 28	Frenatura nuovi convogli Stadler .....	67
Tabella 29	Caratteristiche cinematiche nuovi convogli Stadler .....	68
Tabella 30	Tensioni limite di operabilità nuovi convogli Stadler .....	68
Tabella 31	Valori caratteristica meccanica FART NTS 3 e 4 casse .....	69
Tabella 32	Rendimenti nuovi convogli Stadler .....	70
Tabella 33	Confronto peso materiale rotabile attuale e futuro .....	73
Tabella 34	Confronto caratteristica di trazione materiale rotabile attuale e futuro .....	73
Tabella 35	Legenda circuito positivo .....	76
Tabella 36	Impedenze per differenti tipologie di rotaie secondo regolamento D RTE 27900 .....	76
Tabella 37	Legenda cavi .....	78
Tabella 38	Caratteristiche elettriche SSE Ponte Brolla .....	79
Tabella 39	Caratteristiche elettriche SSE Verdasio .....	80
Tabella 40	Valori tipici per modellare un cortocircuito .....	84
Tabella 41	Rappresentazione dello scenario attuale utilizzato per la validazione del modello .....	85
Tabella 42	Confronto carichi sui raddrizzatori e sovraccarichi ammissibili .....	86
Tabella 43	Tensioni in linea per differenti scenari di esercizio .....	92
Tabella 44	Carichi sui raddrizzatori per differenti scenari di esercizio .....	92
Tabella 45	Taratura degli interruttori extrarapidi .....	93
Tabella 46	Correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori extrarapidi .....	94
Tabella 47	Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Camedo .....	95
Tabella 48	Caratteristiche principali cavi di collegamento binario-SSE Camedo .....	96
Tabella 49	Carichi sui raddrizzatori per differenti scenari di esercizio .....	98
Tabella 50	Taratura degli interruttori extrarapidi .....	99

Tabella 51 Confronto orario previsto ed orario.....	101
Tabella 52 Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Locarno .....	102
Tabella 53 Caratteristiche principali cavi di collegamento binario-SSE Locarno .....	102
Tabella 54 Carichi sui raddrizzatori, scenario con il nuovo concetto orario modificato .....	105
Tabella 55 Taratura degli interruttori extrarapidi .....	106

# Abstract

Con l'obiettivo di potenziare la propria offerta di trasporto ferroviario, le Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi (nel seguito FART SA), hanno intenzione di introdurre un nuovo servizio regionale Locarno-Intragna a cadenza semi-oraria. Inoltre, in concomitanza all'implementazione del nuovo concetto orario, la società prevede di immettere in servizio nuovo materiale rotabile per garantire ai propri clienti nuovi standard di sicurezza e comfort.

La presenza di più convogli in servizio contemporaneo e con caratteristiche differenti da quelli attuali (maggiormente prestazionali) implica maggiori consumi di corrente, i quali si traducono in cadute di tensione di maggiore entità.

Attualmente l'alimentazione della linea di contatto (LC) avviene grazie alle tre sottostazioni elettriche (SSE) disposte in parallelo e ubicate presso le fermate di Ponte Brolla, Intragna e Verdasio. Le normative in vigore (cfr. EN 50119, EN 50149, BS EN 50122-1, EN 50163, D RTE 27900) impongono valori limite di tensione della LC per garantire l'operabilità dell'impianto di trazione elettrica (TE): è quindi necessario che le cadute di tensione non superino i limiti definiti.

Lo scopo di questo lavoro è quello di verificare che il nuovo concetto di produzione (a cadenza semi-oraria con nuovo materiale rotabile) possa essere implementato, ovvero che i parametri di esercizio dell'impianto di trazione elettrica rispettino le disposizioni normative. Verranno dunque valutate approfonditamente le cadute di tensione, i carichi sui raddrizzatori delle SSE, il potenziale di binario e la taratura degli extrarapidi a protezione delle SSE.

Il comportamento dell'impianto TE verrà valutato secondo l'attuale configurazione, ma anche in caso di fuori servizio delle SSE e nel caso in cui l'alimentazione della LC avvenga tramite SSE tra loro isolate. Attraverso il software TrainsRunner (simulatore elettromeccanico per sistemi ferroviari a trazione elettrica) verrà modellato il tracciato, l'esercizio ferroviario (materiale rotabile e orario) e l'impianto TE. Le simulazioni verranno condotte considerando l'usura della LC, delle rotaie e l'influenza della temperatura di esercizio.

I risultati ottenuti mostrano che l'impianto TE attualmente in esercizio non consente di garantire le tensioni minime presso la fermata di Camedo (dove si raggiungono i 791 V), mentre alla stazione di Locarno si registrano valori prossimi al limite consentito. Inoltre, non è possibile garantire l'esercizio in caso di indisponibilità da parte della SSE di Ponte Brolla. Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni elettromeccaniche condotte sono state definite delle misure di ottimizzazione quali la costruzione di una SSE supplementare a Camedo, a Locarno e una revisione del concetto orario. Le misure di ottimizzazione sono state verificate con specifiche simulazioni, le quali mostrano una tensione minima di 934 V rispettivamente 900 V, rientrando così nei limiti di operabilità. Le nuove misure consentono di risolvere le problematiche riscontrate in fase di analisi e di mantenere l'esercizio anche in caso di disservizio da parte di una delle SSE. Le soluzioni proposte aumentano quindi la versatilità dell'impianto, il quale può rimanere in funzione anche in caso di guasto o manutenzione ad una delle SSE.

Oltre alle tensioni in linea sono stati verificati i carichi sui raddrizzatori, così come il potenziale di binario. I risultati ottenuti mostrano che attualmente e con l'aggiunta di una quarta SSE a Camedo, i carichi di punta sul raddrizzatore di Ponte Brolla superano il limite consentito. La costruzione della quarta SSE a Locarno, invece, permette di rientrare nei limiti definiti dai dati di targa. Per tutti gli scenari simulati viene sempre garantito un potenziale di binario inferiore al limite consentito dalle normative. L'analisi svolta ha permesso inoltre di stabilire per ogni scenario i valori necessari alla taratura degli interruttori extrarapidi, componenti fondamentali alla protezione delle SSE da cortocircuiti.

## Abstract (EN)

With the aim of enhancing its rail transport offer, Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi (FART SA), will introduce a new regional service between Locarno and Intragna every 30 minutes. In addition to the new timetable, the company will introduce new rolling stock and equipment to guarantee its customers new standards of safety and comfort. The presence of more rolling stocks with different characteristics from the current ones implies higher current consumption, which means higher voltage drops. Currently the power supply of the contact line takes place thanks to three electrical substations (ESS) arranged in parallel and located at the stops of Ponte Brolla, Intragna and Verdasio. The regulations (cf. EN 50119, EN 50149, BS EN 50122-1, EN 50163, D RTE 27900) impose voltage limit values of the contact line to ensure the operability of the electric traction system: it's therefore necessary that the voltage drops do not exceed the defined limits.

The aim of this work is to verify that the future changes (new timetable and rolling stock and equipment) could be implemented without exceeding the operating parameters of the electric traction. Therefore, the voltage drops, the loads on the ESS rectifiers, the rail potential, and the calibration of the extra-rapid switches will be evaluated.

The behavior of the electric traction system will be analyzed according to the current supply configuration but also in case of out of service by one ESS or in the event of a new supply configuration. This new layout implies that one of the EES supplies only a contact line's section: the three EES will work isolated from the others.

The track, the railway operation (rolling stock and timetable) and the electric traction system will be modeled by the software TrainsRunner, an electromechanical simulator for electric traction railway systems.

The simulations will be conducted considering the wear of contact line, rails and the influence of temperature on conductors.

The results obtained show that the current electric traction system exceeds the minimum voltages at the stop of Camedo (where are reached 791 V), while near Locarno's station values close to the permitted limit are recorded. Furthermore, it's not possible to guarantee the minimum voltages in case of unavailability by the ESS Ponte Brolla. Based on these results, optimization measures have been defined such as an additional ESS in Camedo, Locarno and the new timetable's revision.

Those solutions were verified with specific simulations, which show a minimum voltage of 934 V and 900 V. The new measures allow to solve the problems encountered during the analysis phase and they guarantee the minimum voltages also in case of out of service by one ESS. Therefore, the proposed solutions increase the versatility of the supply system, which can correctly operate even in the event of failure or maintenance of one ESS.

In addition to the line voltages, the loads on the rectifiers were verified, as well as the track potential. The results obtained show that, on the current configuration and with a fourth EES Camedo, the peak current on Ponte Brolla's rectifier exceeds the values defined by the plate data. A fourth EES placed near Locarno allows instead peak current lower than the imposed limits. The rail potential never exceeds limit values defined by regulations. Thanks to the analysis it was possible to define the calibration values of the extra-rapid switches, key elements to protect ESS from short circuits.

# Progetto assegnato

## Titolo

FART - Ferrovia della Centovalli: analisi e verifica dell'impianto di corrente di trazione elettrica

## Persone coinvolte

Proponente	Luca Diviani, Matteo Montini
Relatore	Luca Diviani
Correlatore	Matteo Montini

## Dati generali

Codice	C10406
Anno accademico	2020/2021
Semestre	Semestre primaverile
Corso di laurea	Ingegneria meccanica (Tecnologia delle macchine TP)
Opzione	Tecnica Ferroviaria
Tipologia del progetto	Diploma
Confidenziale	SI
Pubblicabile	NO

## Descrizione

L'apertura all'esercizio commerciale della Galleria di base del Ceneri (progetto AlpTransit) in concomitanza con il cambio di orario di dicembre 2020 ha prodotto un potenziamento dell'offerta del trasporto ferroviario sulla rete delle FFS SA sia a livello cantonale che nazionale.

In questo contesto di sviluppo, e in un'ottica di complementarità, anche le FART SA andranno a potenziare la loro offerta, introducendo il servizio ferroviario regionale a cadenza semi-oraria sul tratto Locarno-Ponte Brolla-Intragna, migliorando dunque l'attrattività del trasporto pubblico del collegamento tra il polo di Locarno e la zona periurbana di Terre di Pedemonte. Inoltre, è prevista l'introduzione di nuovo materiale rotabile per garantire migliori standard di comfort e sicurezza ai clienti.

A livello impiantistico, la linea ferroviaria «Centovallina», gestita dall'impresa di trasporto FART SA, è alimentata in corrente continua (DC) con tensione nominale pari a 1350 V. L'alimentazione è garantita da 3 sottostazioni elettriche (SSE) ubicate presso i punti di esercizio di Ponte Brolla, Intragna e Verdasio. Allo stato attuale, l'impianto di corrente di trazione della linea ferroviaria non è stato verificato nello scenario del nuovo concetto di produzione, ovvero con l'implementazione dell'orario cadenzato semi-orario e con l'introduzione del nuovo materiale rotabile.

Sulla base di quanto indicato sopra, è di fondamentale interesse verificare l'impianto di corrente di trazione attualmente in esercizio secondo lo scenario previsto dal nuovo concetto di produzione e con l'impiego del nuovo materiale rotabile in corso di fornitura da parte di Stadler Rail AG. Inoltre, sarebbe auspicabile, da parte di FART SA, individuare rispettivamente definire misure di ottimizzazione dell'impianto di corrente di trazione.

Per la realizzazione del lavoro, verranno implementate le conoscenze acquisite durante i corsi di Tecnica ferroviaria 1 e 2.

Le simulazioni del sistema di corrente di trazione verranno svolte con il programma di calcolo TrainsRunner, un simulatore elettromeccanico specifico per ferrovie. Esso permetterà di modellare e simulare l'impianto di corrente di trazione considerando le caratteristiche plano-altimetriche del tracciato, il movimento di treni, l'orario, le caratteristiche elettromeccaniche dei treni e dell'impianto di trazione.

## Compiti

1. Acquisire e analizzare le caratteristiche del tracciato ferroviario futuro e del sistema di corrente di trazione attuale, del materiale rotabile futuro e il concetto di produzione futuro
2. Modellare e simulare l'impianto di corrente di trazione attualmente in esercizio:
  - (a) considerando la massima frequenza dei treni nelle ore di picco e con la massima usura e temperature di esercizio della linea di contatto e dei cavi
  - (b) verificando la capacità del sistema di mantenere l'esercizio dei treni in caso di regime degradato, ovvero indisponibilità delle SSE o limitazione della potenza disponibile
3. Verificare l'esercizio dei convogli in funzione delle prestazioni del sistema di alimentazione
4. Calcolare i valori di taratura degli interruttori extrarapidi
5. Calcolare il potenziale delle rotaie verso terra
6. Individuare misure di ottimizzazione del sistema attuale

Kick off di progetto: 01.06.2021 alle 16.00

## Contatto esterno

Gestore dell'infrastruttura

FART SA, Sig E. Fregni

Produttore software TrainsRunner

Setteldea Srl, Sigg. G. Cosulich e P. Segarich

## Documenti allegati

Bianchi\_C10406\_Allegati\_FART-Ferrovia della Centovalli: analisi e verifica dell'impianto di corrente di trazione elettrica

1. Allegato 1 – Alimentazione LC
2. Allegato 2 – Schemi elettrici unifilari SSE
3. Allegato 3 – Dati targa SSE
4. Allegato 4 – rapporto tecnico rinnovo LC
5. Allegato 5 – Catenaria rigida
6. Allegato 6 – Circuito di ritorno SSE
7. Allegato 7 – modellazione del tracciato
8. Allegato 8 – Nuovo concetto orario
9. Allegato 9 – Modellazione orario
10. Allegato 10 – Identificazione dei convogli
11. Allegato 11 – Modellazione materiale rotabile
12. Allegato 12 – Nuovi treni Stadler
13. Allegato 13 – Limitazione tensione/corrente
14. Allegato 14 – Parametri materiale rotabile attuale
15. Allegato 15 – Impedenze chilometriche
16. Allegato 16 – Modellazione sottostazioni
17. Allegato 17 – Schema elettrico linea
18. Allegato 18 – Impedenze chilometriche 45°C (validazione del modello)
19. Allegato 19 – Timetable attuale (validazione del modello)
20. Allegato 20 – Timetable modificato (SSE supplementare Locarno e orario ottimizzato)
21. Allegato 21 – Rapporti incontri coordinazione

## Legenda

Di seguito si riportano le abbreviazioni utilizzate all'interno del documento:

Abbreviazione	Termine
FART	Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi
SSIF	Società Subalpina Imprese Ferroviarie
FFS	Ferrovie Federali Svizzere
SW	Software
TE	Trazione elettrica
SSE	Sottostazione elettrica
LC	Linea di contatto
RL	Conduttore di ritorno
CR	Circuito di ritorno
AT	Alta tensione
AC	Corrente alternata
DC	Corrente continua
IER	Interruttore extrarapido
cc	Cortocircuito
DS	Distribuzione sezionatori
BC	Barra collettice
UFT	Ufficio Federale dei Trasporti
DT	Dipartimento del territorio

Tabella 1 Legenda abbreviazioni

## Normative

Di seguito si riportano le normative e i regolamenti utilizzati:

Normativa	Titolo, edizione, anno
EN 50119	Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines, CEI 2016
EN 50149	Railway applications - Fixed installations - Electric traction - Copper and copper alloy grooved contact wires, CEI 2016
BS EN 50122-1	Railway applications – Fixed installations – Protective provisions relating to electrical relating to electrical safety and earthing, CENELC 2011
EN 50163	Railway applications – Fixed installations – Supply voltages of traction systems, CEI 2016
D RTE 22540	Prontuario del binario Scartamento metrico e speciale, UTP 2011
D RTE 27900	Manuale per la linea di ritorno e la messa a terra, UTP 2014

Tabella 2 Norme e regolamenti di riferimento utilizzati

# 1. Introduzione

In seguito all'apertura della Galleria di Base del Ceneri, la società FART SA (Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi) intende potenziare la propria offerta introducendo un servizio a cadenza semi-oraria sul tratto Locarno-Ponte Brolla-Intragna. Questo potenziamento dell'offerta ha lo scopo di rendere più attrattivo il trasporto pubblico, inserendosi nell'ottica del nuovo concetto orario implementato dalle FFS SA a seguito delle Gallerie di Base del San Gottardo e del Ceneri (GBG e GBC).

Oltre al nuovo orario, FART SA ha intenzione di immettere in servizio, entro la fine del 2023, del nuovo materiale rotabile per offrire migliori standard di sicurezza e comfort ai propri passeggeri.

Attualmente l'impianto di corrente di trazione non è ancora stato verificato considerando questi ammodernamenti. Pertanto, al fine di verificare l'impianto, verrà utilizzato il software di simulazione elettromeccanica TrainsRunner (Setteidea srl), mediante il quale si riprodurrà nel dettaglio il sistema di trazione considerando la sua configurazione futura e gli scenari legati al nuovo concetto di produzione e al nuovo materiale rotabile. Le simulazioni permetteranno di valutare i parametri di funzionamento dell'impianto e di verificarlo sulla base delle normative vigenti. In particolare, le tensioni di linea così come il potenziale di binario dovranno rientrare all'interno del range di operabilità stabilito dalle normative ferroviarie, mentre i carichi sui raddrizzatori devono permettere il corretto esercizio degli stessi. Il software permette, inoltre, di simulare delle situazioni di cortocircuito sulla linea; si calcoleranno quindi i valori di taratura degli interruttori extrarapidi il cui scopo è di proteggere l'impianto da tali fenomeni.

Mediante la simulazione di scenari differenti si potrà inoltre valutare il comportamento dell'impianto di corrente di trazione in diverse situazioni di esercizio (sottostazioni fuori esercizio, massime temperature dei conduttori, ecc).

Attraverso l'analisi dei risultati si valuterà l'efficacia dell'impianto sottoposto al nuovo tipo di esercizio, proponendo, se necessario, delle misure di ottimizzazione per poter garantire l'esercizio ferroviario entro i limiti definiti dalle norme.

## 2. Obiettivi e pianificazione del lavoro

### 2.1. Obiettivi

L'obiettivo principale di questo progetto è quello di verificare e valutare la capacità dell'impianto di trazione elettrica di garantire l'esercizio considerando il futuro concetto di produzione. In caso di necessità si dovranno fornire e verificare delle misure di ottimizzazione. In particolare, la valutazione e verifica dell'impianto si articola sui seguenti punti:

- applicazione della Norma EN 50163:  
la tensione al pantografo deve mantenersi entro i limiti di operabilità della linea di contatto
- applicazione della Norma EN 50122-1:  
il potenziale di rotaia non deve superare i valori massimi di tensione di contatto
- i carichi sui raddrizzatori delle sottocentrali non devono superare i valori limite imposti dal costruttore (carichi di punta e sovraccarichi)
- la taratura degli extrarapidi deve consentire di rilevare le correnti minime di cortocircuito in modo da disconnettere l'alimentazione

### 2.2. End user requirements

#### 2.2.1. Bisogni primari

- stabilire se l'impianto di trazione elettrica attualmente in esercizio possa garantire il nuovo tipo di esercizio e se necessario proporre misure di ottimizzazione
- eseguire la verifica dell'impianto (attuale ed ottimizzato)

#### 2.2.2. Bisogni secondari

- valutare il comportamento dell'impianto di trazione elettrica considerando il nuovo schema di alimentazione della linea di contatto proposto da FART SA

#### 2.2.3. Bisogni terziari

- fornire informazioni riguardo i valori di taratura degli extrarapidi

### 2.3. Simulazione

Al fine di rispondere agli obiettivi descritti nel paragrafo 2.1., verrà utilizzato il software di simulazione elettromeccanica TrainsRunner, sviluppato specificatamente per sistemi di trasporto vincolati a trazione elettrica (AC/DC). Il software si basa su due moduli (meccanico ed elettrico) e configurando le caratteristiche della linea ferroviaria, del materiale rotabile, dell'orario, della rete di alimentazione elettrica e della tipologia di esercizio, verifica le prestazioni dell'impianto di trazione elettrica [1].

Sarà inoltre possibile simulare differenti scenari di esercizio, in modo da analizzare ed ottimizzare il sistema.



### 2.4.2. Pianificazione del progetto (PSP)

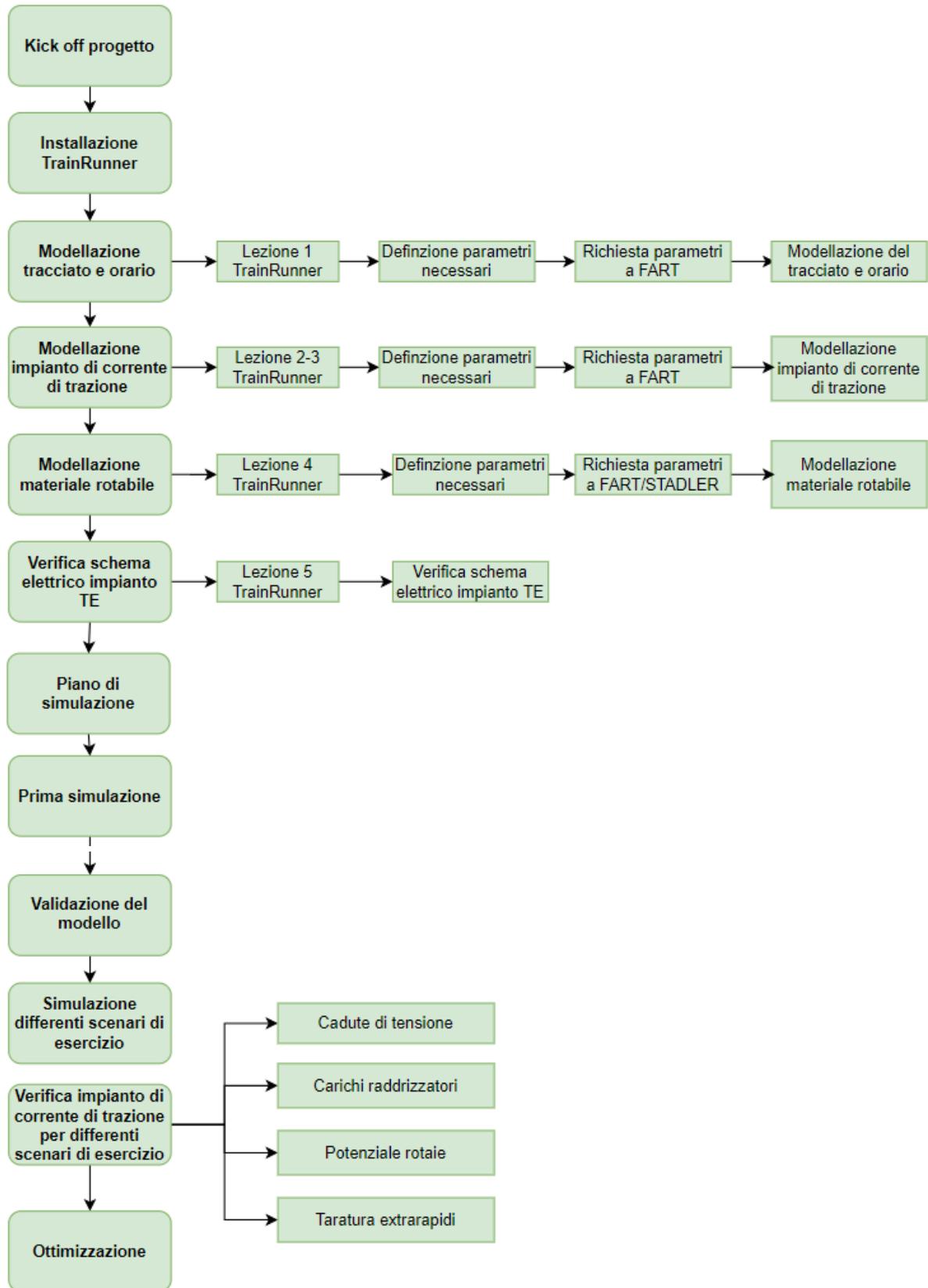


Figura 2 Pianificazione del progetto

## 3. Criteri di progettazione e verifica degli impianti di corrente di trazione

### 3.1. Premessa

L'impianto di trazione elettrica (TE) può essere alimentato da corrente AC o DC.

Ai fini del progetto vengono descritti gli elementi caratteristici di un impianto in DC, lo stesso tipo di alimentazione presente sulla linea analizzata.

Si rimanda a [2] e [3], per ulteriori dettagli.

### 3.2. Elementi degli impianti di trazione in DC

L'impianto ferroviario di trazione elettrica è un complesso sistema di elementi finalizzati a fornire energia elettrica ai veicoli ferroviari. Questo sistema è suddiviso concettualmente in tre elementi principali:

- sottostazioni elettriche (SSE)
- linea di contatto (LC) – circuito positivo
- circuito di ritorno – circuito negativo

Le SSE forniscono l'alimentazione alla LC, a cui può collegarsi il materiale rotabile. Il circuito di ritorno permette di collegare negativamente il convoglio alla SSE in modo da chiudere il circuito elettrico. La Figura 3 mostra uno schema semplificato di un impianto TE:

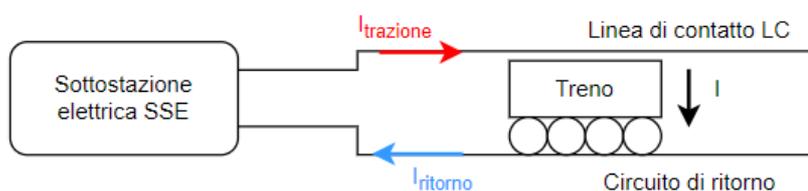


Figura 3 Schema impianto TE

#### 3.2.1. Sottostazioni elettriche in DC

L'energia prodotta dalle centrali elettriche viene trasportata sulle linee primarie ad alta tensione (36-150 kV) in corrente alternata. Le SSE hanno il compito di ridurre la tensione prelevata dalle linee primarie ad un valore di media tensione (1-36 kV) utile alla linea di contatto in DC.

La trasformazione a media tensione e la conversione in corrente continua avviene attraverso una o più coppie di trasformatori e raddrizzatori trifase.

Ogni SSE può essere suddivisa in tre reparti:

- reparto esterno in alta tensione in AC (all'aperto)
- reparto interno in DC (al chiuso)
- reparto esterno in DC (all'aperto)

La Figura 4 mostra la schematizzazione di una SSE in DC.

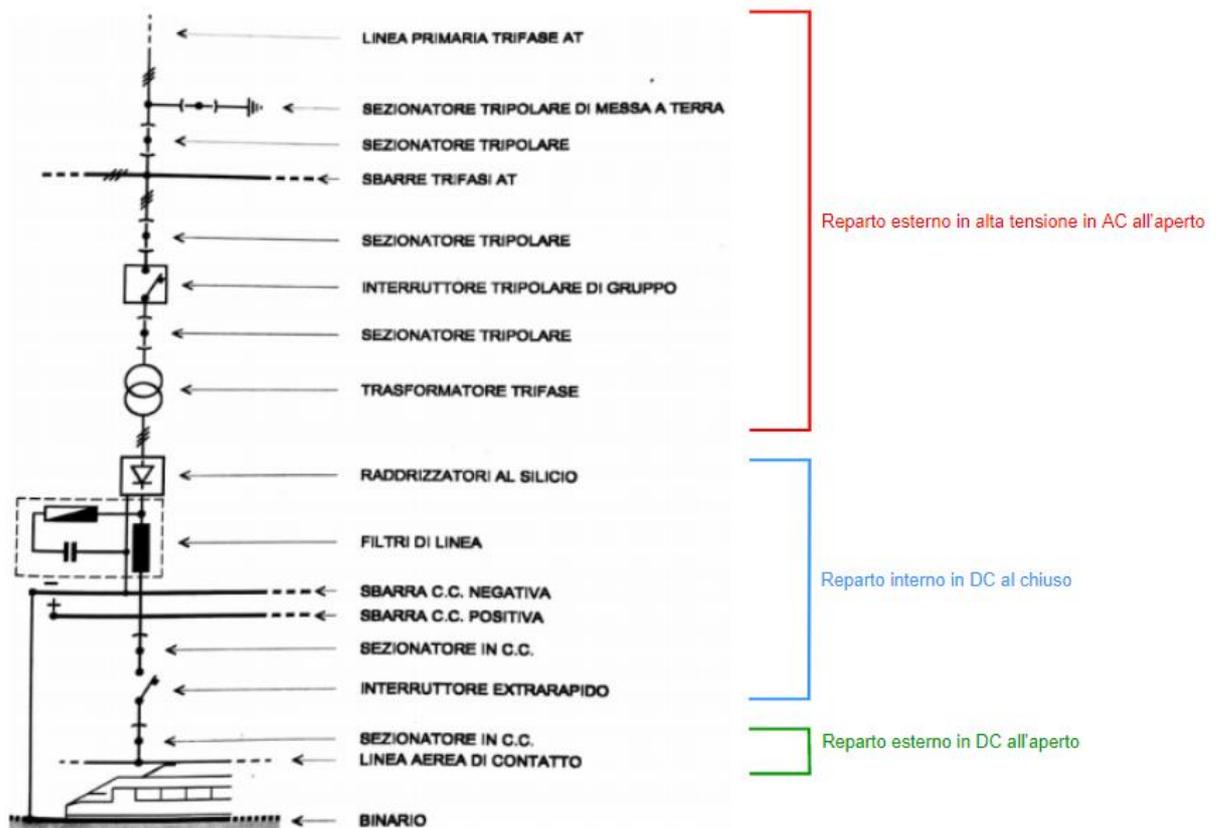


Figura 4 Schema elettrico SSE in corrente continua

### Reparto esterno in AT in AC all'aperto

Le linee primarie alimentano il reparto esterno in alta tensione. In primo luogo, seguendo lo schema in Figura 4 dall'alto verso il basso, si trova il sezionatore tripolare di messa a terra.

Successivamente si trova il sezionatore tripolare il cui compito è quello di sezionare la linea primaria dal circuito elettrico della SSE. Tramite questo elemento si ha un riscontro visivo evidente sullo stato di chiusura/apertura del circuito elettrico. A differenza di un interruttore classico, il sezionatore non può essere manovrato sotto carico. Per effettuare una manovra è quindi necessario che la linea sui cui opera il sezionatore non venga alimentata.

Il ramo appena descritto si conclude nella sbarra trifase AT. Generalmente questo elemento viene collegato alla linea primaria attraverso due rami identici composti dalle componenti appena descritte. In questo modo viene garantita la continuità di esercizio anche nel caso di un guasto o manutenzione dei sezionatori tripolari.

A valle della sbarra trifase AT sono collocati, in serie, un sezionatore tripolare, l'interruttore tripolare di gruppo ed un secondo sezionatore tripolare. L'interruttore può essere manovrato sotto carico elettrico e consente, quindi, di interrompere rispettivamente alimentare la SSE. L'ultimo elemento del reparto esterno è il trasformatore trifase, il quale consente di portare la tensione ad un valore utile alla LC.

### **Reparto interno in DC al chiuso**

In questo reparto si trovano gli elementi di conversione e smistamento della corrente così come gli elementi di protezione della SSE da sovracorrenti e cortocircuiti.

La corrente alternata proveniente dal reparto esterno viene convertita dal raddrizzatore al silicio. In seguito a quest'operazione avviene un filtraggio ad alte frequenze per bloccare determinate armoniche grazie al filtro di linea. Alcune armoniche presenti nella tensione raddrizzata potrebbero infatti disturbare le linee di telecomunicazione oppure gli apparecchi dedicati agli impianti di sicurezza dell'infrastruttura. La corrente viene poi convogliata attraverso le sbarre c.c. agli interruttori extrarapidi passando per un sezionatore c.c. La sbarra negativa (catodica) viene collegata all'impianto di terra della SSE, mentre quella positiva (anodica) collega la sottostazione alla linea di contatto.

L'interruttore extrarapido ha lo scopo di proteggere la sottostazione e la linea di contatto dalle sovracorrenti causate da cortocircuiti o guasti che potrebbero verificarsi sulla LC.

Le principali cause di corto circuito sono:

- contatto diretto tra LC e rotaie
- contatto diretto tra LC e circuito di protezione
- scarica elettrica su un elemento isolante della LC

L'interruttore extrarapido (IER) deve essere tarato in modo tale da poter proteggere tempestivamente (millisecondi) gli elementi della LC e della SSE. Una volta rilevata una corrente di guasto (e quindi superato il valore di taratura), l'interruttore scollega la SSE dalla linea di contatto proteggendo così gli elementi elettrici della SSE.

Questi interruttori sono sottoposti a frequenti interventi, spesso dovuti a sovraccarichi istantanei e quindi non causati da guasti potenzialmente pericolosi. Ad esempio, l'avviamento contemporaneo di più treni sulla stessa sezione potrebbe provocare picchi di corrente, i quali verrebbero rilevati dall'extrarapido come un cortocircuito. L'alimentazione verrebbe a mancare nonostante l'assenza di un guasto effettivo. Per questo motivo è presente un circuito di prova linea in parallelo all'interruttore extrarapido, il cui compito è di verificare la presenza di un guasto permanente. Se il guasto non viene rilevato l'interruttore viene richiuso e l'esercizio può essere di nuovo garantito. Il procedimento di verifica viene eseguito tre volte; se il guasto viene sempre rilevato, l'extrarapido rimane definitivamente aperto, in quanto è alta la probabilità di guasto sulla linea.

Infine, a valle dell'interruttore extrarapido, si trova il sezionatore in c.c.

### **Reparto esterno in corrente continua all'aperto**

Il collegamento tra la SSE e la LC avviene tramite i sezionatori in c.c. ed interruttori di linea, i quali consentono di gestire l'approvvigionamento elettrico.

In alcuni casi, presso le SSE vengono ubicati i posti interruttori, luoghi in cui viene gestita l'alimentazione e la distribuzione della linea di contatto. La SSE alimenta la barra comune degli interruttori, la quale permette di porre in parallelo elettrico sezioni differenti della LC. L'approvvigionamento di quest'ultima viene gestita dagli interruttori manovrabili in loco oppure a distanza. A valle di ogni interruttore troviamo il cavo che viene collegato fisicamente al conduttore della LC.

Nel reparto si trova, inoltre, la barra colletttrice del circuito negativo. In questo punto convogliano tutti i conduttori che determinano il circuito di ritorno. La barra colletttrice permette di collegare il circuito di ritorno al polo negativo della SSE in modo da completare lo schema elettrico del circuito.

### 3.2.2. Linea di contatto (circuito positivo)

La LC è composta dagli elementi che permettono la trasmissione di energia dalle SSE ai motori elettrici dei mezzi di trazione. Uno schema generale di LC è riportato di seguito:

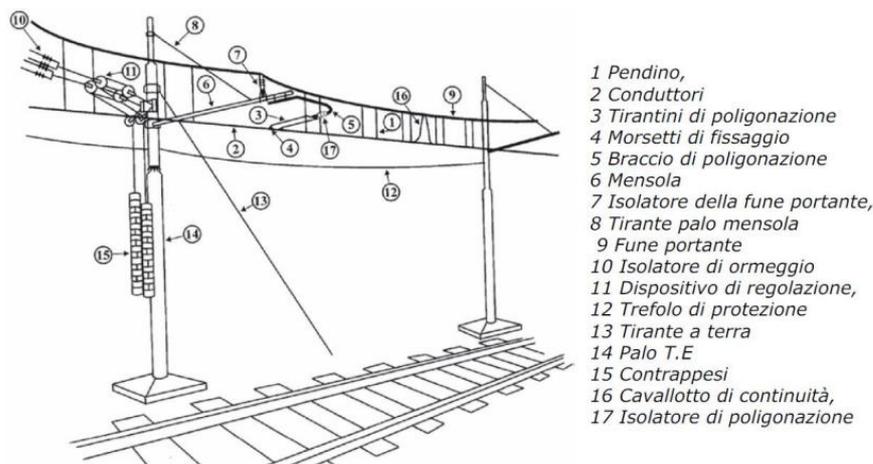


Figura 5 Schema di LC

Il conduttore LC (2) viene appeso ad una fune portante (9), la quale viene sostenuta da pali di sostegno formando così un profilo a catenaria. Questo sistema a sospensione viene utilizzato al fine di mantenere il conduttore LC ad un'altezza costante rispetto al piano del ferro, garantendo così una maggiore qualità della captazione elettrica da parte del pantografo. Il collegamento meccanico tra fune portante e conduttore LC avviene mediante i pendini (1), i quali si agganciano tramite apposite ganasce alle scanalature presenti sul conduttore.

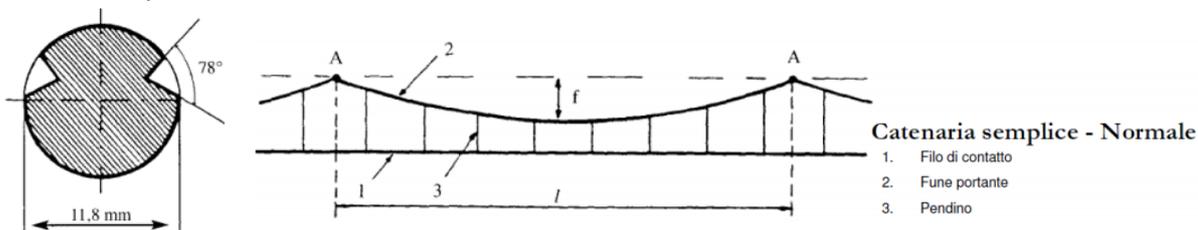


Figura 6 Raffigurazione della sezione del conduttore LC (sinistra) e catenaria semplice (destra)

Dato che i pendini costituiscono un collegamento elettrico tra LC e fune portante, tra questi due elementi potrebbero instaurarsi pericolose differenze di potenziale. Questo problema viene mitigato dall'installazione dei cavallotti di continuità (16), i quali consentono un migliore collegamento elettrico portando i due cavi alla stessa tensione.

Il posizionamento longitudinale del conduttore della linea di contatto è definito dalla poligonazione (andamento a "zig-zag" che limita l'usura del pantografo in un unico punto). Questa geometria viene realizzata dagli appositi bracci di poligonazione (5) montati sui pali LC (14).

Per compensare le dilatazioni termiche dei cavi, è presente un sistema di regolazione composto da pulegge (11) e contrappesi (15), i quali permettono di pareggiare l'allungamento o l'accorciamento del conduttore LC e della fune portante dovuto agli sbalzi termici stagionali cui è sottoposta la struttura. In questo modo l'altezza del conduttore LC rispetto al piano del ferro rimane costante indipendentemente dalla temperatura di esercizio.

Generalmente, oltre al conduttore LC, vengono utilizzati dei feeder, il cui scopo è alimentare in più punti la LC. Questi conduttori realizzati in rame, disposti in parallelo elettrico con il conduttore LC, garantiscono un collegamento continuo lungo tutta la linea e non solo ai capi del conduttore. Tramite questa configurazione l'approvvigionamento di corrente viene ripartito su più cavi, diminuendo quindi

l'impedenza complessiva del circuito positivo con conseguente riduzione delle cadute di tensione. L'insieme dei conduttori predisposti a questo scopo viene denominato «linea di alimentazione».

### 3.2.3. Circuito di ritorno (circuito negativo)

Il circuito di ritorno è costituito da una o entrambe le rotaie del binario. Dal punto di vista elettrico, il parametro più importante delle rotaie è la conduttanza di dispersione verso terra. Generalmente non è possibile isolare perfettamente questi elementi rispetto al terreno; si riduce così il rischio di portare il binario a tensioni troppo pericolose. Nel caso di alimentazione in DC, il fluire di una parte della corrente di ritorno verso il suolo potrebbe però provocare fenomeni di corrosione delle rotaie o di altri manufatti metallici inseriti nel terreno (come ad esempio tubazioni, condotte, pali, ecc). Per questo motivo vengono utilizzati dei conduttori disposti in parallelo elettrico alle rotaie il cui scopo è di convogliare la corrente di ritorno verso il polo negativo della SSE e limitare quindi il flusso di corrente al suolo. Il valore della conduttanza verso terra è un valore che dipende dalle caratteristiche della massiciata e dal terreno sottostante. A dipendenza dei materiali utilizzati, dalle condizioni ambientali e dalle caratteristiche geologiche del terreno, si possono ottenere valori differenti. Alcuni valori di riferimento vengono proposti all'interno della norma BS EN 50122-1.

- 2 rotaie con traverse in Beton: 0,4 – 1,7 S/km
- 2 rotaie con traverse in legno/acciaio: 1,7 – 7,0 S/km

## 3.3. Schemi di alimentazione

La LC può essere alimentata da più SSE distribuite lungo il percorso per garantire l'apporto di energia elettrica necessaria al materiale rotabile. La distanza tra due sottostazioni dipende dall'intensità del traffico ferroviario e dall'assorbimento elettrico dei motori di trazione, il quale dipende a sua volta dal profilo piano altimetrico del tracciato e dal consumo dei sistemi ausiliari di ogni singolo treno. Tanto più la richiesta energetica è elevata, minore dovrà essere la distanza tra le SSE. Nel caso in cui non si potessero installare due sottostazioni ravvicinate (per esempio a causa della conformazione del territorio), viene aumentata la sezione del conduttore LC.

La LC viene suddivisa in sezioni, separate fisicamente dai sezionatori. Questi elementi elettromeccanici isolano oppure collegano i differenti segmenti della LC, in modo da garantire la continuità di esercizio anche in caso di guasto ad una delle SSE.

Nella pratica esistono diverse configurazioni per alimentare la LC; di seguito si illustrano i tipi principali ai fini di una migliore comprensione del tema.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a [3] e [4].

### 3.3.1. Alimentazione a sbalzo

Questo tipo di alimentazione viene utilizzato prevalentemente nelle tratte in cui non è possibile installare una seconda SSE. Secondo questo tipo di configurazione, la LC viene alimentata da un'unica sottostazione, di conseguenza le cadute di tensione risultano essere maggiori se paragonate ad altri tipi di modelli. Per questo motivo le sezioni alimentate in questo modo non possono superare determinate lunghezze, in quanto si verificherebbero cadute di tensione troppo elevate e di conseguenza le tolleranze di operabilità non sarebbero garantite.

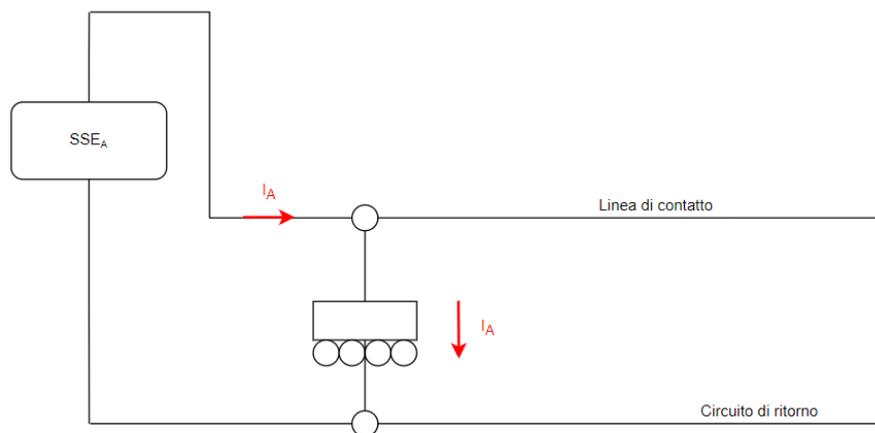


Figura 7 Schema elettrico di una linea alimentata a sbalzo

### 3.3.2. Alimentazione bilaterale

Questo tipo di schema di alimentazione è maggiormente diffuso in quanto offre maggiori benefici rispetto alla configurazione precedente (cap. 3.3.1.). La LC viene alimentata contemporaneamente da una coppia di SSE, riducendo così le cadute di tensione rispetto ad una configurazione a sbalzo. Questo tipo di alimentazione permette inoltre di mantenere l'esercizio attivo anche in caso di guasto ad una delle due sottocentrali evitando la chiusura all'esercizio della tratta alimentata.

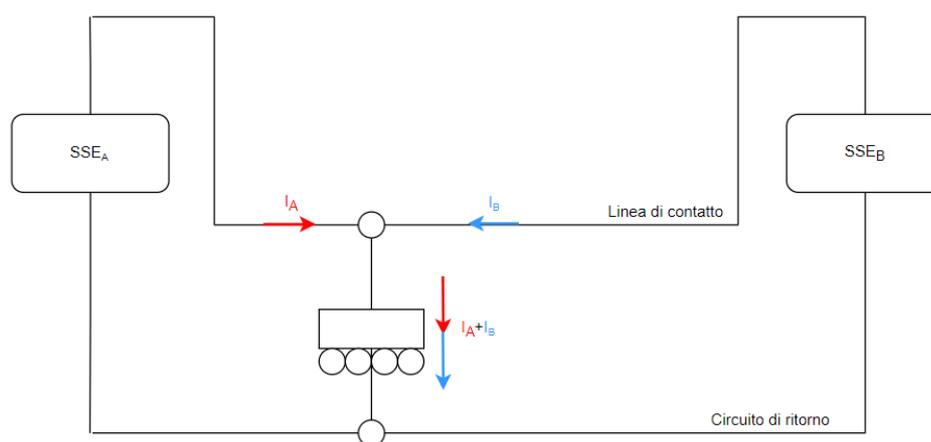


Figura 8 Schema elettrico di una linea alimentata bilateralmente

### 3.4. Posizione del problema

I motori elettrici dei veicoli ferroviari assorbono energia elettrica, la quale viene trasportata attraverso l'impianto TE descritto in precedenza. La natura dei conduttori che compongono l'impianto di corrente di trazione genera (secondo la legge di Ohm) una riduzione della tensione utile sulla linea: questo fenomeno viene definito caduta di tensione.

Ogni treno necessita di una tensione minima per poter assicurare il proprio esercizio in sicurezza e mantenendo i parametri di accelerazione e velocità stabiliti. Cadute di tensione troppo elevate porterebbero quindi ad una tensione utile in linea non sufficiente a garantire l'operabilità del materiale rotabile circolante.

Oltre alle cadute di tensione, nel caso di veicoli ferroviari predisposti per la frenata rigenerativa, esiste anche un problema di sovratensione. Questo particolare sistema di frenatura permette di recuperare una parte dell'energia utile che andrebbe altrimenti dissipata in calore durante il rallentamento. I motori elettrici di trazione vengono utilizzati, dunque, come generatori elettrici, recuperando così una quota parte dell'energia, che verrà immessa nella rete elettrica dell'impianto TE. Nel caso di raggiungimento della tensione limite di esercizio, il sistema di protezione del treno interviene interrompendo la rigenerazione e garantendo una frenata di tipo dissipativo mediante appositi chopper di frenatura [5].

Le sovratensioni dipendono dalle caratteristiche di progettazione del materiale rotabile e soprattutto dalla quantità e dalla durata delle decelerazioni lungo il percorso (dovute a fermate oppure pendenze).

Le cadute di tensione dipendono fondamentalmente da due parametri:

- la corrente assorbita dai convogli
- la resistenza elettrica complessiva del circuito di trazione.

La potenza necessaria ai motori elettrici dipende a sua volta dalla conformazione plano-altimetrica del tracciato, così come dalle accelerazioni e dalle velocità raggiunte dal materiale rotabile. La resistenza elettrica dipende invece dal materiale utilizzato per i conduttori, dalla loro lunghezza e sezione.

#### 3.4.1. Equazione della trazione

Affinché un veicolo possa muoversi, è necessario che la forza di trazione sviluppata dai motori vinca tutte le forze resistenti al moto. Nel caso di un veicolo ferroviario, le resistenze possono essere distinte in:

- resistenze ordinarie  $R_O$
- resistenze accidentali  $R_A$

Si riporta a [6] per ulteriori approfondimenti.

#### Resistenze ordinarie

Le resistenze ordinarie sono sempre presenti, indipendentemente dal tipo di tracciato su cui viaggia il veicolo ferroviario. Queste forze comprendono:

- resistenza al rotolamento  $R_r$  delle ruote sui binari
- resistenza aerodinamica frontale  $R_{a,f}$  e laterale  $R_{a,l}$ . dovute al movimento di un corpo all'interno di un fluido (ovvero l'aria)

Le resistenze ordinarie sono quindi esprimibili come:

$$R_O = R_r + R_{a,f} + R_{a,l} \quad (3.4.1)$$

Nel campo della trazione ferroviaria si tende a non esprimere le componenti delle resistenze ordinarie individualmente, preferendo espressioni sperimentali aggregate e dipendenti dalla tipologia di convoglio ferroviario, del tipo:

$$R_O = P \cdot r_O = P \cdot (a + b \cdot v + c \cdot v^2) \quad (3.4.2)$$

dove:

- $r_O$  è il coefficiente delle resistenze ordinarie, il quale viene espresso mediante un polinomio di costanti  $a$  [N/KN],  $b$  [N h/ kN km] e  $c$  [N h<sup>2</sup>/ kN km<sup>2</sup>] definite empiricamente
- $v$  è la velocità istantanea del treno in km/h
- $P$  è il peso del convoglio espresso in kN (peso a vuoto più carico)

Tipiche espressioni presenti in letteratura [7] sono:

- formula di Armstrong 
$$r_O = \frac{24}{\sqrt{m_{tot}}} + 0,01 \cdot v + 0,0035 \cdot \frac{S}{m_{tot}} \cdot v^2 \quad (3.4.3)$$

- formula Svizzera 
$$r_O = 2,5 + 0,0003 \cdot v^2 \quad (3.4.4)$$

- formula di De Gregorio 
$$r_O = 3,5 + 0,005 \cdot \frac{S}{m_{tot}} \cdot v^2 \quad (3.4.5)$$

con:

- $S$  area maestra del convoglio in m<sup>2</sup>
- $m_{tot}$  la massa totale espressa in tonnellate

Nello specifico, i coefficienti del polinomio vengono stabiliti dal produttore del veicolo. Il loro valore può quindi variare a seconda della geometria delle casse, dei materiali utilizzati, dall'area maestra e della superficie laterale.

### Resistenze accidentali

Le resistenze accidentali  $R_A$  non dipendono dal tipo di veicolo, bensì dal tracciato percorso.

Queste forze comprendono:

- resistenza alla pendenza  $R_P$
- resistenza alle curve  $R_C$
- resistenza aerodinamica in galleria  $R_G$

Questi fattori non sono sempre presenti durante la corsa di un treno e determinano quindi la variabilità del consumo di potenza da parte dei motori elettrici di trazione. Le resistenze accidentali sono così definite:

$$R_A = R_P + R_C + R_G \quad (3.4.6)$$

### Resistenza alle pendenze

La geometria verticale del tracciato dà luogo a forze che si oppongono (in salita) o favoriscono (in discesa) il moto del convoglio in presenza di una pendenza. Partendo dal concetto del piano inclinato, si ricava la componente parallela al piano della forza peso  $P_x$ :

$$P_x = P \cdot \sin(\alpha) \quad (3.4.7)$$

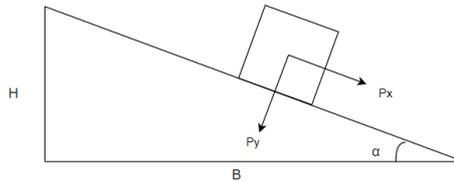


Figura 9 Rappresentazione delle forze sul piano inclinato

In ambito ferroviario le pendenze non raggiungono mai valori elevati a causa della problematica dell'aderenza ruota-rotaia. In base a questa considerazione si può approssimare il seno dell'angolo con la propria tangente.

Si ottiene quindi:

$$R_p = P \cdot \sin(\alpha) \cong P \cdot \tan(\alpha) \cong P \cdot i \quad (3.4.8)$$

dove:

- $P$  è il peso del convoglio espresso in N (peso a vuoto più carico)
- $i$  indica la pendenza della tratta espressa in ‰

### Resistenza alle curve

In letteratura è possibile trovare formule differenti per calcolare la forza di resistenza in curva: la formula francese (più comunemente utilizzata) e la formula di Von Röckl.

Secondo la formula francese, utilizzata per raggi di curva maggiori di 350 m, la resistenza in curva si definisce come:

$$R_c = P \cdot \frac{K}{R^c} \quad (3.4.9)$$

dove:

- $P$  è il peso del convoglio espresso in kN (peso a vuoto più carico)
- $R^c$  è il raggio di curva espresso in m. Nel caso di rettilinei il raggio tende ad infinito con conseguente resistenza nulla
- $K$  è un coefficiente  $\left[\frac{N \cdot m}{kN}\right]$  che dipende dalle condizioni delle rotaie e può variare in base alla nazionalità dell'amministrazione ferroviaria. La tabella seguente raffigura alcuni valori di  $K$  in funzione di esperienze praticate in differenti paesi:

Stato	$K \left[\frac{N \cdot m}{kN}\right]$
Russia	700
America	446
Italia	800
Inghilterra	600
Cina	573

Tabella 3 Esempi di coefficienti K secondo alcune nazionalità [8]

In altri paesi come Svizzera e Germania viene invece utilizzata la formula di Von Röckl:

$$R_C = P \cdot \frac{a}{R^c - b} \quad (3.4.10)$$

dove:

- $P$  è il peso del convoglio espresso in kN (peso a vuoto più carico)
- $R^c$  è il raggio di curva espresso in m. Nel caso di rettilinei il raggio tende ad infinito con conseguente resistenza nulla
- $a$  e  $b$  sono coefficienti ricavati sperimentalmente, i quali possono essere riassunti nella seguente tabella:

Raggio curvatura [m]	a [m]	b [m]
≥300	650	55
<300	500	30

Tabella 4 Coefficienti a e b in funzione del raggio di curvatura [8]

#### Resistenza in galleria

Il moto dei treni attraverso uno spazio ristretto genera un effetto pistone dovuto all'occupazione improvvisa di un volume d'aria delimitato. Questo fenomeno genera una forza opposta al moto, contribuendo quindi ad aumentare le forze resistenti accidentali.

La resistenza in galleria può essere calcolata come [9]:

$$R_G = k \cdot \frac{L}{D} \cdot v^2 \quad (3.4.11)$$

dove:

- $k$  è un coefficiente che descrive la rugosità della superficie della galleria e può assumere valori da 0,001 (pareti lisce) a 0,005 (pareti rugose) [N h<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>]
- $L$  esprime la lunghezza della galleria [m]
- $D$  esprime il diametro della galleria [m]
- $v$  è la velocità del treno [km/h]

Analogamente ai coefficienti che descrivono le resistenze ordinarie, anche le resistenze in galleria possono essere espresse in questo modo. Il coefficiente in questione viene stabilito dal produttore del veicolo ed è indipendente dalle caratteristiche della galleria.

#### **Sforzo di trazione**

La forza totale che deve vincere un veicolo per poter proseguire la sua corsa è di:

$$R = R_0 + R_A \quad (3.4.12)$$

Si giunge ora all'equazione della trazione, che esprime l'equilibrio dinamico tra le forze agenti sul veicolo nella direzione del moto:

- nel caso di moto uniforme 
$$F_t - R = 0 \quad (3.4.13)$$

- nel caso di moto accelerato 
$$F_t - R = m_e \cdot a \quad (3.4.14)$$

dove:

- $F_t$  è lo sforzo di trazione in direzione del binario applicato dai motori
- $R$  è la forza di resistenza totale
- $m_e$  è la massa equivalente. Questo valore serve per considerare il contributo delle masse rotanti  $m_r$  (quali ruote, assi, alberi). L'inerzia generata dalla rotazione di questi elementi viene quindi considerata all'interno dell'equazione della trazione. Generalmente viene utilizzata la massa totale del convoglio  $m_{tot}$  maggiorata del 10%
- $a$  è l'accelerazione del treno [m/s<sup>2</sup>]

Affinché le ruote non perdano aderenza, in caso di accelerazione o frenatura, lo sforzo di trazione non deve superare la forza di aderenza limite  $F_{a,y}$ :

$$F_t < F_{a,y} \quad (3.4.15)$$

$$F_t < P_a \cdot \mu_{a,y} \quad (3.4.16)$$

dove:

- $P_a$  è il peso aderente, ovvero un'aliquota del peso del convoglio che può essere utilizzata ai fini della trazione
- $\mu_{a,y}$  è il coefficiente di attrito lungo il binario. Questo valore dipende dalle condizioni di contatto tra ruota e rotaia

Nel caso di superamento di questo valore limite (con conseguente slittamento delle ruote sul binario), la centralina elettronica interviene riducendo la potenza dei motori fino a quando non verrà recuperata di nuovo l'aderenza tra le ruote e le rotaie.

### Potenza dei motori elettrici

Una volta noto lo sforzo di trazione, è possibile calcolare la potenza al pantografo richiesta dal materiale rotabile per poter proseguire la propria corsa rispettivamente la potenza al pantografo sviluppata dal sistema di frenata rigenerativa:

- nel caso di trazione 
$$P_{pant,t} = \frac{F_t \cdot v}{\eta} \quad (3.4.17)$$

- nel caso di frenata 
$$P_{pant,f} = F_f \cdot v \cdot \eta \quad (3.4.18)$$

dove:

- $P_{pant,t}$  e  $P_{pant,f}$  sono le potenze misurate al pantografo [W]
- $F_t$  e  $F_f$  sono la forza di trazione rispettivamente di frenatura [N]
- $v$  è la velocità del convoglio [m/s]
- $\eta$  è il rendimento della catena di conversione elettro-meccanica (in questo parametro ritroviamo i rendimenti dei convertitori elettrici, dei motori e della trasmissione meccanica)

### Potenza dei sistemi ausiliari

L'assorbimento elettrico del materiale rotabile non è però unicamente riconducibile all'equazione della trazione. Nel computo energetico bisogna anche tener conto dei sistemi ausiliari, ovvero di tutti i dispositivi volti al funzionamento dei sottosistemi di bordo e degli impianti destinati al comfort della clientela (condizionatore, schermi orari, prese di corrente, illuminazione interna, ecc). Questi sistemi contribuiscono, quindi, ad aumentare il consumo elettrico da parte del treno, anche nel caso in cui sia fermo durante una sosta. In generale, il consumo di questi apparecchi non è definito da formule matematiche, ma viene stabilito dal produttore del treno. A dipendenza della tecnologia, dell'efficienza e dal tipo di materiale rotabile, si possono avere consumi differenti.

La potenza assorbita non è sempre costante ma può variare a seconda delle condizioni ambientali. Il maggior consumo energetico è dovuto ai sistemi di riscaldamento e di raffreddamento dell'ambiente interno, per questo motivo si differenziano i consumi estivi da quelli invernali.

La potenza al pantografo necessaria ai sistemi ausiliari viene calcolata come:

$$P_{pant,aux} = \frac{P_{aux}}{\eta_{conv}} \tag{3.4.19}$$

con:

- $P_{aux}$  la potenza necessaria al funzionamento dei sistemi ausiliari [W], definita dal costruttore
- $\eta_{conv}$  il rendimento del convertitore

### 3.4.2. Cadute di tensione

Il caso più semplice di impianto TE può essere schematizzato come un circuito elettrico composto da un generatore di tensione (la SSE) e da un carico assorbitore ideale (il materiale rotabile) collegati tra loro dalla LC e dal circuito di ritorno.

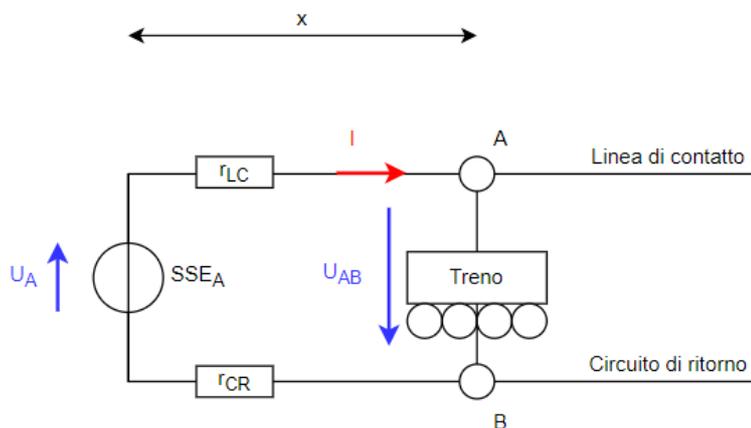


Figura 10 Schema elettrico impianto TE

$U_A$  indica la differenza di potenziale tra la sbarra positiva e negativa della SSE, mentre con  $U_{AB}$  ci si riferisce alla differenza di potenziale tra LC e circuito di ritorno (ovvero la tensione al pantografo).

Le cadute di tensione ( $\Delta V$ ) lungo la LC possono essere descritte risolvendo la maglia del circuito elettrico e sono provocate dal passaggio di corrente nei conduttori che definiscono il sistema:

$$U_A - r_{LC} \cdot x \cdot I - U_{AB} - r_{CR} \cdot x \cdot I = 0 \tag{3.4.20}$$

$$U_A - U_{AB} = I \cdot (r_{LC} + r_{CR}) \cdot x \tag{3.4.21}$$

$$\Delta V = I \cdot r \cdot x \tag{3.4.22}$$

dove:

- $I$  rappresenta la corrente in linea [A]
- $r$  rappresenta la resistenza chilometrica complessiva [ $\Omega/\text{km}$ ] dell'impianto di trazione elettrica del circuito. Come si osserva dall'equazione 3.4.21. l'impedenza complessiva può essere scomposta in due elementi:
  - resistenza della linea di contatto  $r_{LC}$
  - resistenza del circuito di ritorno  $r_{CR}$
- $x$  è la distanza tra la SSE che alimenta la LC e il materiale rotabile [km]

Per garantire la potenza ed il corretto esercizio del treno, la corrente richiesta alla LC vale (in caso di trazione):

$$I = \frac{P_{pant,t} + P_{pant,aux}}{U_{AB}} = \frac{P_{pant}}{U_{AB}} \quad (3.4.23)$$

dove:

- $P_{pant}$  rappresenta la potenza al pantografo necessaria all'alimentazione dei motori di trazione così come dei sistemi ausiliari
- $U_{AB}$  rappresenta la tensione utile al pantografo

#### Resistenza della linea di contatto

In tecnica ferroviaria si definisce una resistenza chilometrica, ovvero la resistenza elettrica di un conduttore LC per chilometro di linea. Questo valore è così definito:

$$r_{LC} = \frac{\rho_{Cu}}{A_{LC}} \quad (3.4.24)$$

dove:

- $\rho_{Cu}$  è la resistività in [ $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{km}}$ ] del materiale di cui è costituito il conduttore della LC (generalmente viene utilizzato rame (Cu) o lega di rame)
- $A_{LC}$  è la sezione del conduttore LC in [ $\text{mm}^2$ ]

A causa dello strisciamento dovuto allo scorrere del pantografo sul conduttore, la sezione tende a ridursi con il tempo. Come si osserva dall'equazione 3.4.24., una riduzione dell'area utile aumenta l'impedenza chilometrica, causando a sua volta un incremento delle cadute di tensione.

Questo significa che la tensione utile sulla linea diminuisce con il passare degli anni di esercizio ferroviario.

Per tenere conto di questo aspetto si introduce un fattore correttivo  $k_{LC}$ ; la resistenza corretta è quindi definita dall'equazione:

$$r_{LC} = \frac{\rho_{Cu}}{A_{LC} \cdot k_{LC}} \quad (3.4.25)$$

Generalmente viene utilizzato un valore di  $k_{LC}$  pari a 0,9375 [4].

Resistenza del circuito di ritorno

Come nel caso della LC, anche il circuito di ritorno presenta una resistenza che si oppone al fluire della corrente di ritorno. La resistenza chilometrica delle due rotaie disposte in parallelo elettrico è così definita:

$$r_{CR} = \frac{\rho_{Ac}}{2 \cdot A_r} \quad (3.4.26)$$

dove:

- $\rho_{Ac}$  è la resistività in  $\left[\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{km}}\right]$  del materiale cui è costituita la rotaia (generalmente acciaio)
- $A_r$  è la sezione della singola rotaia [ $\text{mm}^2$ ]

Analogamente a quanto accade alla LC, il fenomeno di usura delle rotaie contribuisce ad aumentarne la resistenza elettrica. Per tenere conto di questo fattore si introduce dunque un fattore di correzione  $k_B$ . La resistenza corretta è quindi definita dall'equazione:

$$r_{CR} = \frac{\rho_{Ac}}{2 \cdot A \cdot k_B} \quad (3.4.27)$$

Tendenzialmente si utilizza un valore di  $k_B$  pari a 0,9. Questo valore permette di considerare una sezione ridotta pari al 10% della sezione nominale [4].

Resistenza totale dell'impianto TE

Il circuito elettrico generato dall'impianto di trazione elettrica si compone delle due resistenze ( $r_{LC}$  e  $r_{CR}$ ) disposte in serie. Una volta determinato il loro valore si ottiene la resistenza chilometrica totale dell'intero impianto di TE:

$$r = r_{LC} + r_{CR} \quad (3.4.28)$$

$$R = r \cdot x \quad (3.4.29)$$

con:

- $r_{LC}$  resistenza chilometrica del conduttore LC [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $r_{CR}$  resistenza chilometrica del circuito di ritorno [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $r$  resistenza chilometrica totale [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $R$  resistenza totale [ $\Omega$ ]
- $x$  distanza SSE-materiale rotabile [ $\text{km}$ ]

## Il problema della temperatura

Quanto descritto finora riguardo il calcolo delle impedenze chilometriche si riferisce ad una situazione ideale, ovvero nel caso in cui i conduttori operino a temperatura ambiente. Le temperature estive, così come il surriscaldamento dovuto all'Effetto Joule, contribuiscono ad aumentare la temperatura di esercizio. Non viene invece considerato il surriscaldamento dovuto allo strisciamento del pantografo lungo il conduttore LC, in quanto la sollecitazione in un punto del conduttore è di breve durata e non permette quindi di scaldare significativamente il conduttore.

La resistività di un materiale varia in funzione della temperatura secondo la legge:

$$\rho_T = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha(T - 20)] \quad (3.4.30)$$

con:

- $\rho_T$  la resistività  $\left[\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{km}}\right]$  di un materiale alla temperatura  $T$
- $\rho_{20}$  la resistività  $\left[\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{km}}\right]$  del materiale a 20°C (temperatura ambiente)
- $T$  è la temperatura di esercizio del conduttore [°C]
- $\alpha$  è il coefficiente termico del materiale  $\left[\frac{1}{^\circ\text{C}}\right]$ . Nel caso specifico si trattano principalmente due materiali, rame e acciaio:
  - $\alpha_{Cu} = 0,00404 \text{ 1/}^\circ\text{C}$  [10]
  - $\alpha_{Ac} = 0,005 \text{ 1/}^\circ\text{C}$  [10]

Come si può osservare dall'equazione 3.4.30., la resistività di un materiale aumenta all'aumentare della temperatura. Di conseguenza anche l'impedenza del conduttore aumenta, determinando quindi un incremento delle cadute di tensione.

## Cadute di tensione negli impianti alimentati a sbalzo

Questo tipo di alimentazione prevede una sola SSE dedicata ad una sezione di lunghezza pari a  $L$ , di conseguenza le cadute di tensione aumentano linearmente con la distanza tra convoglio e SSE. In una sezione a distanza generica  $x$  dalla SSE la corrispettiva caduta di tensione vale:

$$\Delta V = r \cdot x \cdot I \quad (3.4.31)$$

dove:

- $r$  è la resistenza chilometrica complessiva del circuito di TE [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $x$  rappresenta la distanza del convoglio dalla SSE [km]
- $I$  è la corrente richiesta dai motori elettrici [A]

Alla distanza  $L$ , pari alla lunghezza della sezione, si ottiene la caduta di tensione massima:

$$\Delta V_{max} = r \cdot L \cdot I \quad (3.4.32)$$

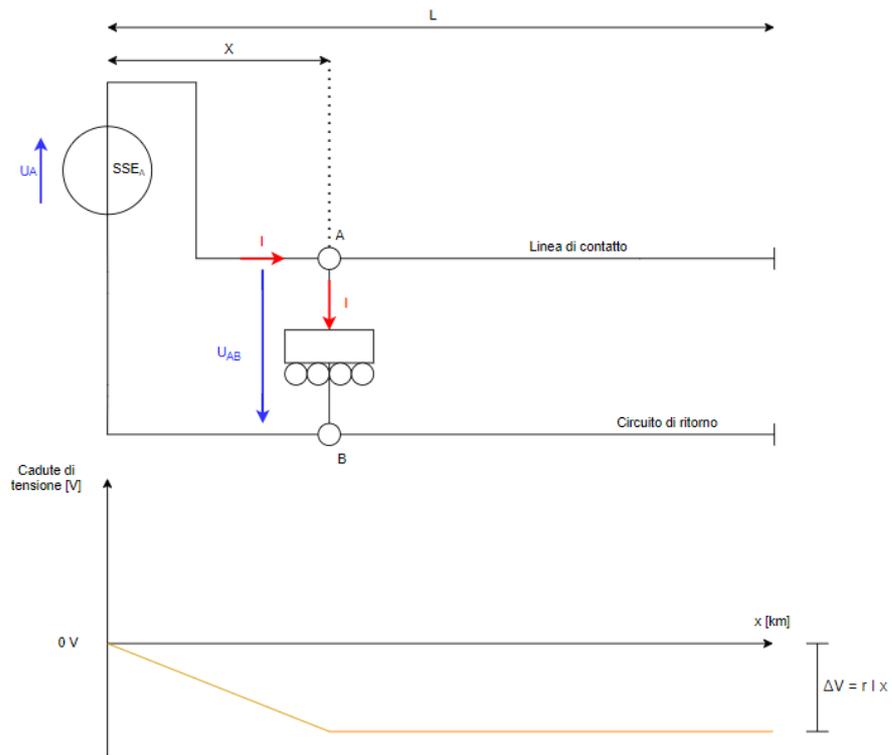


Figura 11 Cadute di tensione negli impianti alimentati a sbalzo

Nel caso in cui il convoglio si trovi sull'estremo non alimentato, si ottengono le cadute di tensione massime:

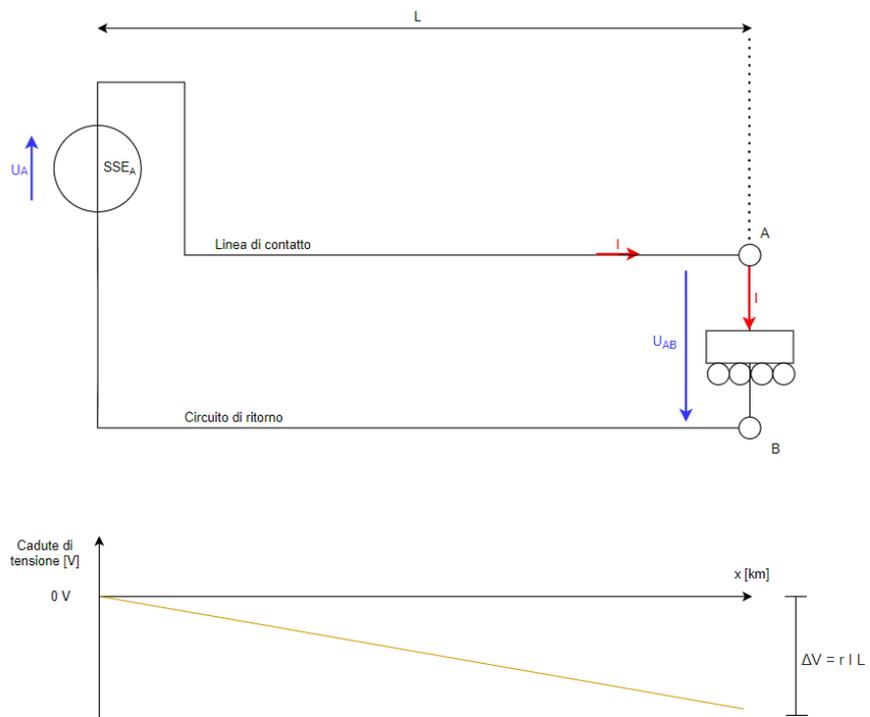


Figura 12 Massime cadute di tensione in linea, alimentazione a sbalzo

Nel caso di treni ad assorbimento costante di potenza, è possibile determinare la tensione al pantografo in funzione della tensione  $U_A$ , della potenza richiesta dal materiale rotabile e della sua posizione. Partendo dall'equazione 3.4.31. che definisce le cadute di tensione:

$$\Delta V = r \cdot x \cdot I \quad (3.4.33)$$

ed utilizzando l'equazione 3.4.23. si ottiene:

$$\Delta V = r \cdot x \cdot \frac{P_{pant}}{U_{AB}} \quad (3.3.34)$$

Riscrivendo l'equazione precedente in funzione della tensione in uscita dalla SSE:

$$U_A - U_{AB} = r \cdot x \cdot \frac{P_{pant}}{U_{AB}} \quad (3.4.35)$$

Risolviendo per la tensione al pantografo  $U_{AB}$  si ottiene:

$$U_{AB} = \frac{U_A}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{U_A}{2}\right]^2 - r \cdot x \cdot P_{pant}} \quad (3.4.36)$$

Affinché si ottenga un valore reale positivo deve valere:

$$r \cdot x \cdot P_{pant} \leq \frac{U_A^2}{4} \quad (3.4.37)$$

Il termine  $x \cdot P_{pant}$  è chiamato momento di potenza ed è definito come il prodotto tra la potenza richiesta dal materiale rotabile e la distanza dello stesso dalla SSE che lo alimenta [3].

### Cadute di tensione negli impianti alimentati bilateralmente

Questo tipo di schema di alimentazione prevede due SSE dedicate alla stessa sezione di infrastruttura ferroviaria di lunghezza pari a  $L$ . La corrente assorbita  $I$  dal materiale rotabile è la somma delle correnti provenienti dalle due SSE, di conseguenza la corrente sulla linea sarà minore così come le cadute di tensione. Data una posizione generica  $x$  posta tra  $SSE_A$  e  $SSE_B$ , la caduta di tensione risentita dalle due porzioni di LC alimentate dalle rispettive sottostazioni deve corrispondere. In notazione matematica questo può essere descritto come:

$$\begin{cases} U_A - U_{AB} = U_B - U_{AB} \\ I = I_A + I_B \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta V_A = \Delta V_B \\ I = I_A + I_B \end{cases} \quad \begin{cases} r \cdot x \cdot I_A = r \cdot (L - x) \cdot I_B \\ I = I_A + I_B \end{cases} \quad (3.4.38)$$

dove:

- $r$  è la resistenza chilometrica complessiva del circuito [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $x$  rappresenta la distanza del convoglio dalla  $SSE_A$  [km]
- $I_A$  e  $I_B$  sono le correnti sulla LC provenienti da  $SSE_A$  rispettivamente  $SSE_B$  [A]
- $I$  è la corrente richiesta dai motori elettrici [A]

Risolvendo si ottiene:

$$\Delta V_A = \Delta V_B = \Delta V = r \cdot x \cdot I \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \tag{3.4.39}$$

Alla distanza  $\frac{L}{2}$ , pari alla metà della sezione, si ottiene la caduta di tensione massima:

$$\Delta V_{Max} = \frac{r \cdot I \cdot L}{4} \tag{3.4.40}$$

A parità di condizioni, l'alimentazione bilaterale consente cadute di tensione quattro volte inferiori a quelle che si otterrebbero con un'alimentazione a sbalzo (vedere eq. 3.4.32.).

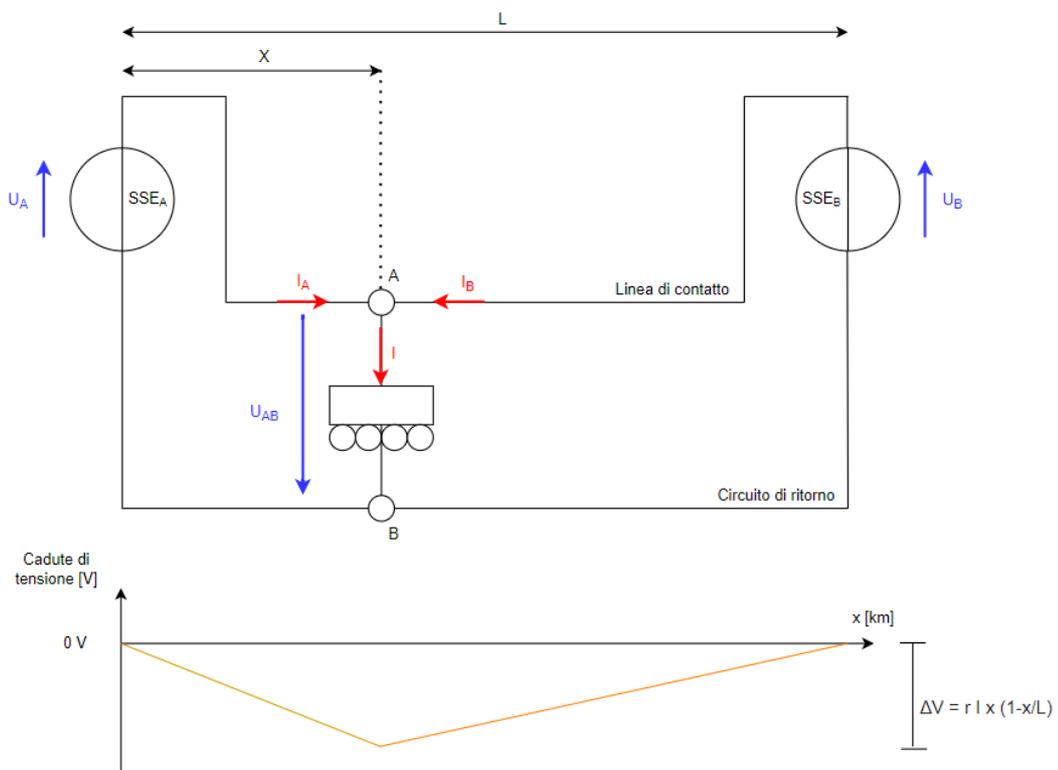


Figura 13 Cadute di tensione negli impianti alimentati bilateralmente

Nel caso in cui il convoglio si trovi a metà tra le due SSE, si ottengono le massime cadute di tensione:

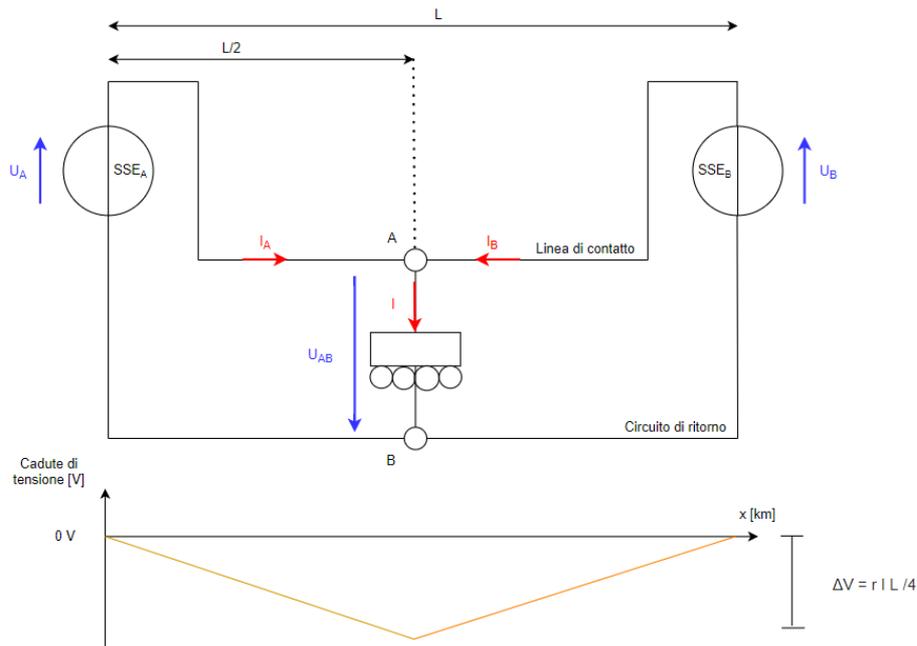


Figura 14 Massime cadute di tensione in linea, alimentazione bilatera

Le cadute di tensione in funzione della posizione del veicolo possono essere rappresentate dal seguente grafico:



Figura 15 Cadute di tensione in funzione della posizione del convoglio, alimentazione bilatera

Nel caso di treni ad assorbimento costante di potenza, è possibile determinare la tensione al pantografo in funzione della tensione  $U_A$ , della potenza richiesta dal materiale rotabile e della sua posizione. Partendo dall'equazione 3.4.39. che definisce le cadute di tensione:

$$\Delta V = r \cdot x \cdot I \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \tag{3.4.41}$$

ed utilizzando l'equazione 3.4.23. si ottiene:

$$\Delta V = r \cdot x \cdot \frac{P_{pant}}{U_{AB}} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \tag{3.4.42}$$

Riscrivendo l'equazione precedente in funzione della tensione in uscita dalle SSE:

$$U_A - U_{AB} = U_B - U_{AB} = r \cdot x \cdot \frac{P_{pant}}{U_{AB}} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \tag{3.4.43}$$

Risolvendo per la tensione al pantografo  $U_{AB}$  si ottiene:

$$U_{AB} = \frac{U_A}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{U_A}{2}\right]^2 - r \cdot x \cdot P_{pant} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right)} \quad (3.4.44)$$

Il massimo momento di potenza erogabile da una SSE vale come nel caso precedente:

$$x \cdot P_{pant} \leq \frac{U_A^2}{4 \cdot r} \quad (3.4.45)$$

Avendo due SSE disposte in parallelo il momento di potenza massimo sulla linea sarà quindi il doppio rispetto alla configurazione di alimentazione a sbalzo [3].

### Altre configurazioni di alimentazione e cadute di tensione

Per altre configurazioni di alimentazione e le rispettive cadute di tensione si rimanda a [3]

## 3.5. Verifica degli impianti di trazione

Il calcolo delle cadute di tensione permette di determinare il corretto apporto di potenza ai motori elettrici del materiale rotabile. Nonostante ciò, esistono altri criteri che hanno l'obiettivo di preservare e mantenere il funzionamento e di garantire la sicurezza durante l'esercizio. La verifica dell'impianto TE deve quindi soddisfare anche i seguenti punti:

- applicazione della Norma EN 50163:  
la tensione al pantografo deve mantenersi entro i limiti di operabilità della linea di contatto
- applicazione della Norma EN 50122-1:  
il potenziale di rotaia non deve superare i valori massimi di tensione di contatto
- i carichi sui raddrizzatori delle sottocentrali non devono superare i valori limite imposti dal costruttore (carichi di punta e sovraccarichi)
- la taratura degli extrarapidi deve consentire di rilevare le correnti minime di cortocircuito in modo da disconnettere l'alimentazione

### 3.5.1. Tensione in linea

La tensione disponibile lungo la LC può variare entro i limiti stabiliti dalla normativa EN 50163 e deve permettere il corretto funzionamento dei motori elettrici del materiale rotabile circolante. La tabella seguente riporta il range di operabilità per ferrovie alimentate in DC secondo la norma citata sopra:

Tipo di alimentazione	Tensione minima non permanente $U_{\min 2}$ [V]	Tensione minima permanente $U_{\min 1}$ [V]	Tensione nominale $U_n$ [V]	Tensione massima permanente $U_{\max 1}$ [V]	Tensione massima non permanente $U_{\max 2}$ [V]
DC	400	400	600	720	800
	500	500	750	900	1000
	1000	1000	1500	1800	1950
	2000	2000	3000	3600	3900

Tabella 5 Tensioni limite di operabilità secondo EN 50163

In condizioni di normale esercizio, la tensione sulla LC deve rimanere entro i valori di  $U_{\min,1}$  e  $U_{\max,2}$ . Sono ammessi tensioni comprese tra  $U_{\max,1}$  e  $U_{\max,2}$ , ma non per una durata superiore a 5 min.

Alessandro Bianchi FART - Ferrovia della Centovalli: analisi e verifica dell'impianto di corrente di trazione elettrica

### 3.5.2. Carichi ammissibili sui raddrizzatori

Una richiesta simultanea di potenza potrebbe portare ad un sovraccarico del gruppo trasformatore/raddrizzatore. A causa della variabilità dei carichi, potrebbero quindi verificarsi sovracorrenti dannose per questi elementi.

All'interno dei dati di targa dei raddrizzatori è possibile trovare i valori dei sovraccarichi ammessi dal costruttore.

### 3.5.4. Taratura degli extrarapidi

Un corto circuito può verificarsi nel caso in cui si presenti un collegamento a bassa impedenza tra la LC (sotto tensione) ed il circuito di ritorno. Questo fenomeno, nel caso di correnti di circuito molto elevate e prolungate, può portare al degrado dei conduttori di ritorno a causa del calore o delle forze elettromagnetiche generate e anche al danneggiamento delle SSE e degli impianti di sicurezza.

Il valore di taratura deve essere minore della corrente minima di cortocircuito, onde evitare danni al sistema di alimentazione. Nel caso di cortocircuiti lontani dall'interruttore, la corrente rilevata diminuisce a causa dell'impedenza chilometrica. Per questo motivo la taratura non deve consentire all'extrarapido di confondere il carico assorbito da un treno con un cortocircuito. Per evitare che tali fenomeni provochino l'apertura definitiva degli interruttori, viene predisposto un circuito di prova. Entro una finestra temporale di 10" dall'apertura viene verificata la persistenza del guasto:

- se il cortocircuito non è più presente l'alimentazione viene ristabilita
- se il cortocircuito permane l'alimentazione viene disinserita e la sezione isolata

Generalmente gli interruttori extrarapidi sono collegati tra loro mediante un circuito dedicato, il quale permette di isolare, in caso di guasto, la sezione interessata. In caso di apertura di un extrarapido, seguirà l'apertura dell'extrarapido della SSE posta all'altro estremo della sezione evitando così di alimentare la linea in presenza di un guasto.

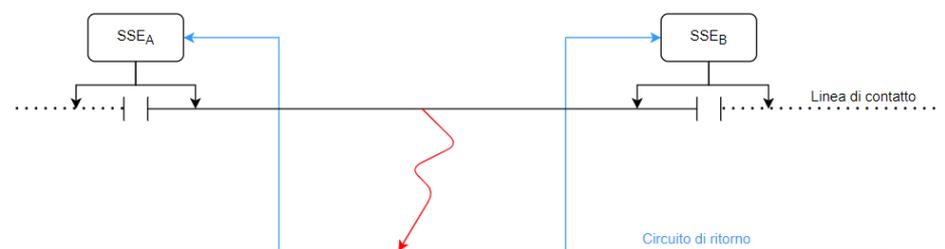


Figura 16 Raffigurazione di un cortocircuito tra linea di contatto e circuito di ritorno

### 3.5.5. Potenziale di rotaia

La corrente assorbita dal treno arriva alle ruote del veicolo per poi giungere alla barra negativa della SSE attraverso il circuito di ritorno. Come citato nel cap. 3.4.2. le rotaie sono caratterizzate, analogamente alla LC, da un'impedenza chilometrica. Il fluire della corrente di ritorno genera quindi una differenza di potenziale rispetto al terreno.

Nel caso di un unico treno circolante su una linea alimentata da una singola SSE, il potenziale massimo positivo si trova in corrispondenza del materiale rotabile, mentre nei pressi della SSE il potenziale sarà negativo. Nel punto centrale tra i due elementi il potenziale è quindi nullo.

Nel caso di impianti TE alimentati in DC, il potenziale delle rotaie può essere trattato come una tensione di contatto (secondo EN 50122-1). Il regolamento D RTE 27900 prevede delle tensioni di contatto inferiori a 120 V per garantire la sicurezza durante l'esercizio.

## 4. Infrastruttura ferroviaria FART

### 4.1. Introduzione

La ferrovia a scartamento metrico ( $s = 1000 \text{ mm}$ ) che collega Locarno (CH) a Domodossola (IT), chiamata rispettivamente “Centovallina” e “Vigezzina” dalle omonime valli che attraversa, si snoda per 52 km attraversando il confine fra Svizzera e Italia.

Oggi, la tratta svizzera è gestita dalla società FART SA (Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi) mentre la tratta italiana da SSIF SpA (Società Subalpina di Imprese Ferroviarie).

Il percorso risulta articolato e tortuoso: sono presenti 83 ponti e 34 gallerie, i quali permettono di attraversare le due valli e affrontare un dislivello massimo di 630 m. I raggi di curvatura ridotti (per un raggio minimo pari a 48 m) e le pendenze elevate (fino ad un massimo del 6%) limitano la velocità massima a 60 km/h.

La ferrovia, oltre ad essere una importante attrazione turistica grazie al suggestivo panorama, consente anche di collegare rapidamente il Canton Ticino e il Canton Vallese: infatti, è la via più veloce che unisce la ferrovia del Gottardo a quella del Sempione.

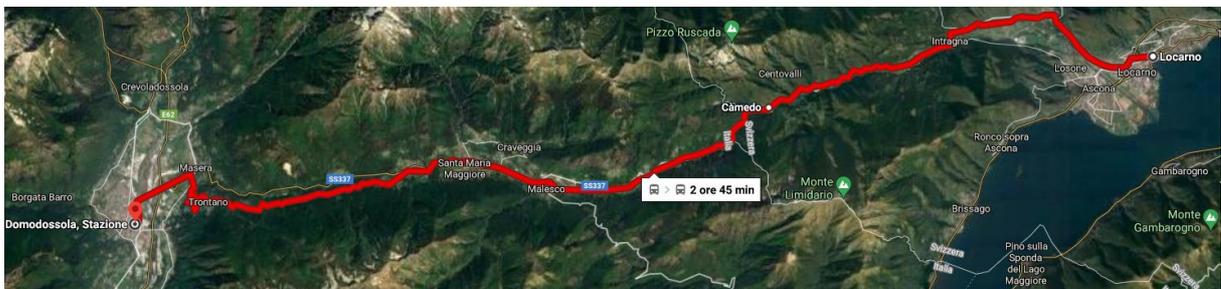


Figura 17 Visione satellitare della tratta Domodossola-Locarno

Il presente lavoro di diploma si focalizza sul tratto ferroviario svizzero, ovvero sulla tratta Locarno-Camedo, la quale ricopre i primi 19 km del percorso partendo da Locarno. La linea così definita è denominata (in CH) L620.



Figura 18 Visione satellitare della tratta Locarno-Camedo

## 4.1. Cambiamenti infrastrutturali futuri

Per poter implementare il nuovo concetto orario, FART SA ha intenzione di realizzare un terzo binario nella stazione di Intragna e un secondo binario nella stazione di Tegna in modo da permettere il cadenzamento semi-orario del nuovo servizio regionale Locarno-Intragna.

Oltre a queste modifiche, è in corso il rinnovo della LC, il quale prevede la sostituzione di alcuni elementi volti a migliorare l'apporto di corrente necessario al nuovo esercizio. Inoltre, il binario verrà rinnovato in alcuni punti della tratta. Per completezza del progetto, l'attuale impianto di corrente di trazione verrà simulato tenendo conto di queste modifiche, in modo da rappresentare al meglio l'esercizio ferroviario una volta completati tutti i lavori finalizzati all'aumento della potenzialità dell'infrastruttura.

## 4.2. Esercizio ferroviario

### 4.2.1. Fermate

Sulla tratta Locarno-Camedo sono presenti 14 fermate, in 8 delle quali è possibile l'incrocio dei convogli che viaggiano in direzione opposta. Questo avviene nelle fermate di:

- S. Martino
- Ponte Brolla
- Verscio
- Cavigliano
- Intragna
- Corcapolo
- Verdasio
- Camedo

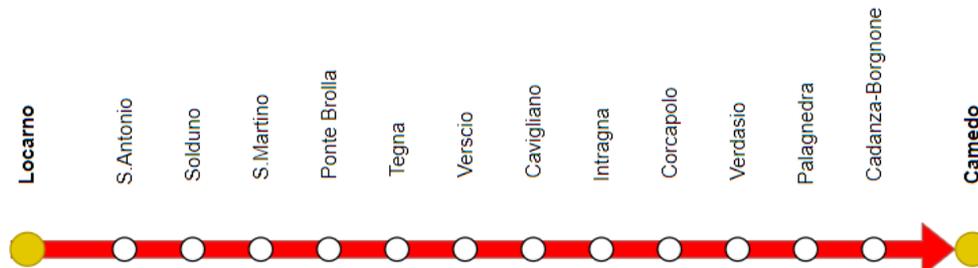


Figura 19 Fermate lungo la linea L620

### 4.2.2. Tipologie di servizi

Attualmente FART SA garantisce tre tipologie di servizio:

- servizio regionale REG Locarno-Camedo (REG)
- servizio internazionale Locarno-Domodossola (INT): questo servizio è suddiviso per circa il 50% con la società SSIF (sul tracciato elvetico circola, quindi, anche materiale rotabile SSIF)
- servizio di rinforzo (BIS) come riserva al traffico regionale ed internazionale in caso di elevata affluenza (soprattutto nel periodo turistico estivo e autunnale)

### 4.2.3. Materiale rotabile attuale

Attualmente la produzione del servizio sulla linea Locarno-Domodossola viene garantita dal seguente materiale rotabile:

- 3 elettrotreni ABe 4/6, acquistati nel 1993, utilizzati nel servizio REG (Locarno-Camedo)
- 4 elettrotreni ABe 4/8, acquistati nel 1993 e restaurati nel 2011, utilizzati nel servizio INT (Locarno-Domodossola)
- 2 elettrotreni ABDe 6/6 e 4 vagoni, acquistati nel 1963; tale composizione viene utilizzata unicamente per il servizio BIS

Modello	Elettrotreno
FART ABe 4/6	 <p data-bbox="876 645 1193 674">Figura 20 FART ABe 4/6 [11]</p>
FART ABe 4/8	 <p data-bbox="876 1070 1193 1099">Figura 21 FART ABe 4/8 [12]</p>
FART ABDe 6/6	 <p data-bbox="868 1485 1201 1514">Figura 22 FART ABDe 6/6 [13]</p>

Tabella 6 Lista materiale rotabile attualmente in uso presso FART

Il servizio internazionale viene ripartito equamente tra le società FART SA e SSIF SpA. Sul tracciato elvetico circola quindi anche materiale rotabile italiano (e viceversa):

Modello	Elettrotreno
SSIF ABe 4/4	 <p data-bbox="882 730 1187 763">Figura 23 SSIF ABe 4/4 [14]</p>
SSIF ABe 8/8	 <p data-bbox="882 1140 1187 1173">Figura 24 SSIF ABe 8/8 [15]</p>

Tabella 7 Lista materiale rotabile attualmente in uso presso SSIF

#### 4.2.4. Materiale rotabile futuro

Il nuovo servizio che FART SA ha intenzione di implementare sarà garantito dalla nuova flotta composta da 8 elettrotreni Stadler, i quali entreranno in servizio entro la fine del 2023:

- 4 elettrotreni Stadler a tre casse utilizzati nel servizio REG
- 4 elettrotreni Stadler a quattro casse utilizzati nel servizio INT e BIS

Modello	Elettrotreno
Stadler	 <p data-bbox="855 1850 1212 1883">Figura 25 Nuovi treni Stadler [16]</p>

Tabella 8 Rappresentazione materiale rotabile futuro

## 4.3. Infrastruttura

### 4.3.1. Armamento

L'armamento ferroviario è composto da:

	Rotaie	Peso [kg/m]	Traverse
In stazione	FFS I (cfr. D RTE 22054)	46.16	Legno
In linea	VST 36 (cfr. D RTE 22054)	35.73	Acciaio

Tabella 9 Tipo di rotaie e traverse presenti lungo L620

### 4.3.2. Impianto TE

Di seguito si riportano i principali dati relativi all'impianto TE della L620. Inoltre, si faccia riferimento allo schema elettrico (Allegato 1), agli schemi elettrici unifilari delle tre SSE (Allegato 2), ai dati di targa di trasformatori e raddrizzatori (Allegato 3) e al rapporto tecnico di rinnovo della LC (Allegato 4).

#### Sottostazioni elettriche

La tensione nominale della LC è pari a  $1350 V_{DC}$  ed è garantita dal parallelo elettrico di tre SSE ubicate presso le fermate di Ponte Brolla, Intragna e Verdasio. Le SSE convertono tensione media  $16 kV_{AC}$  fornita dalla rete elettrica della Società Elettrica Sopracenerina (SES) in tensione di linea di contatto  $1350 V_{DC}$ .

Le caratteristiche elettriche principali delle sottostazioni sono indicate di seguito:

	Sottostazione elettrica (SSE)
Potenza trasformatore	1870 kVA
Potenza raddrizzatore	1688 kW
Tensione nominale di servizio MT	16 kV <sub>AC</sub> (SES)
Tensione linea di contatto	1350 V <sub>DC</sub>

Tabella 10 Caratteristiche principali SSE

Si veda l'Allegato 3 per i rispettivi dati di targa dei trasformatori e dei raddrizzatori.

Attualmente ogni SSE è dotata di un interruttore extrarapido. Essi operano indipendentemente. In presenza di un cortocircuito, l'extrarapido più vicino si apre per proteggere la SSE, ma a causa dell'alimentazione in parallelo della linea, il guasto continua ad essere alimentato dalle SSE rimanenti. L'assenza del collegamento tra i vari interruttori non permette quindi di isolare la sezione sede di un cortocircuito e di conseguenza il cortocircuito viene rilevato dalle altre due SSE. Si genera quindi un processo a cascata in cui tutti gli interruttori extrarapidi si attivano mettendo fuori esercizio l'intera linea. Ogni interruttore opera quindi sul tutta la linea. A causa della resistenza chilometrica, le correnti minime di cortocircuito misurate dagli extrarapidi risultano essere dello stesso ordine di grandezza di sovraccarichi non pericolosi (come ad esempio l'accensione di più convogli nello stesso momento). Questo particolare tipo di sistema necessita dunque di valori di taratura più alti rispetto alle correnti minime di corto circuito, onde evitare che la linea rimanga senza alimentazione anche in assenza di un guasto.

### Linea di contatto

La LC attualmente in esercizio è in fase di rinnovo. Per completezza del progetto, si modellerà la linea di contatto basandosi sui dati previsti dal progetto di rinnovo (per ulteriori riferimenti si faccia riferimento all'Allegato 4). La linea di contatto lungo la tratta Locarno-Camedo, una volta terminati i lavori, sarà caratterizzata da:

	Impianto linea di contatto
Tensione nominale	1350 V <sub>DC</sub>
Conduttore di LC	107 mm <sup>2</sup> Cu
Fune portante	92 mm <sup>2</sup> Ac/Cu
Feeder	2 x 95 mm <sup>2</sup> Cu

Tabella 11 Caratteristiche principali LC

Nella galleria Muralto – S. Martino è presente una catenaria rigida del tipo Furrer&Frey. La sezione del corpo portante estruso in alluminio è di 1288 mm<sup>2</sup> equivalenti rame (si veda l'Allegato 5).

Ad eccezione di questo tratto, l'infrastruttura presenta una LC a catenaria semplice. Nelle gallerie presenti (eccetto il tunnel Muralto – S.Martino), i feeder sono sostituiti da un cavo isolato di sezione pari a 240 mm<sup>2</sup> Cu (si veda l'Allegato 4). Nel caso della galleria Muralto – S.Martino l'alimentazione è garantita dall'ampia sezione del corpo portante della catenaria rigida; non sono quindi necessari feeder o altri cavi di alimentazione.

Il collegamento tra il conduttore LC e la linea di alimentazione avviene ogni 250 m grazie a conduttori in rame isolati di sezione pari a 120 mm<sup>2</sup>.

Il collegamento di ogni SSE alla LC avviene tramite quattro interruttori:

- interruttore principale nr. 10: alimenta la barra comune degli interruttori posti all'esterno della SSE
- interruttore nr. 1: alimenta la sezione di LC a valle della SSE
- interruttore nr. 2: alimenta la sezione di LC a monte della SSE
- interruttore nr. 3: alimenta la LC presente in stazione

Nelle pagine successive si riportano i collegamenti tra SSE e LC.

### SSE Ponte Brolla

Il polo positivo della SSE è collegato al posto interruttori ubicato a ~80 m a sud mediante due conduttori in parallelo di sezione pari a 300 mm<sup>2</sup>. In questo punto si concentrano gli interruttori 1, 2 e 3 finalizzati all'alimentazione della LC a valle, a monte così come in stazione. Il collegamento elettrico alla linea di contatto viene garantito da due conduttori in parallelo con sezione pari a 150 mm<sup>2</sup>.

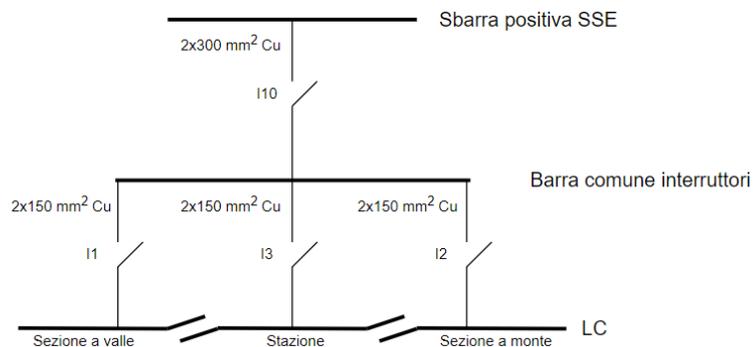


Figura 26 Schema elettrico collegamento SSE-LC Ponte Brolla

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-posto interruttori	2x300 Cu	80
Interruttore 1-LC	2x150 Cu	300
Interruttore 2-LC	2x150 Cu	104
Interruttore 3-LC	2x150 Cu	10

Tabella 12 Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Ponte Brolla

### SSE Intragna

Il collegamento tra SSE e LC non avviene tramite un posto interruttori, ma ogni interruttore si colloca direttamente nei pressi della LC. L'alimentazione è sempre garantita da due conduttori in rame di area pari a 150 mm<sup>2</sup>.

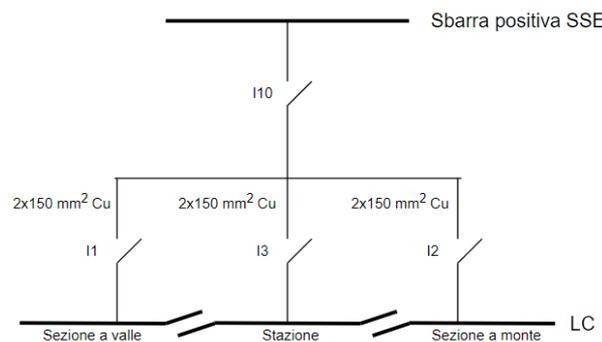


Figura 27 Schema elettrico collegamento SSE-LC Intragna

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-Interruttore 1	2x150 Cu	175
SSE-Interruttore 2	2x150 Cu	110
SSE-Interruttore 3	2x150 Cu	20

Tabella 13 Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Intragna

### SSE Verdasio

Il polo positivo della SSE è collegato al posto interruttori localizzato di fronte alla SSE mediante due conduttori in parallelo di sezione pari a 300 mm<sup>2</sup>. In questo punto si concentrano gli interruttori 1,2 e 3 finalizzati all'alimentazione della LC a valle, a monte così come in stazione. Il collegamento elettrico alla linea di contatto viene garantito da due conduttori in parallelo con sezione pari a 150 mm<sup>2</sup>.

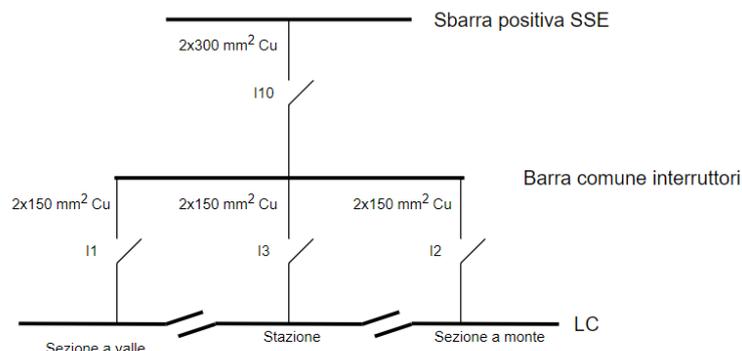


Figura 28 Schema elettrico collegamento SSE-LC Verdasio

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-posto interruttori	2x300 Cu	20
Interruttore 1-LC	2x150 Cu	280
Interruttore 2-LC	2x150 Cu	80
Interruttore 3-LC	2x150 Cu	10

Tabella 14 Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Verdasio

Attualmente gli interruttori in esercizio presso le SSE non sono motorizzati/telecomandati e vengono lasciati in posizione chiusa per garantire l'alimentazione della linea nel seguente modo:

- Locarno-Ponte Brolla: alimentazione a sbalzo da SSE Ponte Brolla
- Ponte Brolla-Intragna: alimentazione in parallelo da SSE Ponte Brolla e SSE Intragna
- Intragna-Verdasio: alimentazione in parallelo da SSE Intragna e SSE Verdasio
- Verdasio-confine: alimentazione a sbalzo da SSE Verdasio

Il sezionamento nei pressi delle sottocentrali viene effettuato disponendo in parallelo (senza collegamento elettrico) i conduttori della LC delle rispettive sezioni per una lunghezza di ~30-40 m.

Sulla LC sono presenti anche sezionatori meccanici, i quali garantiscono il sezionamento su una lunghezza di linea pari ~30-40 cm. Questo tipo di sezionatori viene utilizzato al di fuori della linea principale, ovvero nell'officina treni di Ponte Brolla e nella rimessa di Camedo. Eccezione viene fatta a Locarno (km. 0,201), Ponte Brolla (km. 5,275) e Ruinacci (km.18,125).

Come si può notare dallo schema elettrico (Allegato 1), le sezioni Locarno – Ponte Brolla e Verdasio – Ribellasca sono alimentate a sbalzo.

In caso di guasto della SSE di Verdasio, il tratto Verdasio-Ribellasca (lunghezza ~4 km), potrebbe essere alimentato dal SSIF SpA, previo accordo tra le due società. A Ribellasca (confine) è predisposto un doppio interruttore (ognuno gestito dalla rispettiva amministrazione) finalizzato a questo scopo.

Per quanto riguarda la tratta Locarno-Ponte Brolla (lunghezza ~5 km), l'alimentazione non può essere garantita in caso di guasto dell'interruttore 1 in posizione aperta.

Dato che le tre SSE operano in parallelo, ovvero con gli interruttori 1,2,3 e 10 sempre in posizione chiusa, diventa laborioso alimentare diversamente la tratta, in quanto è necessario recarsi fisicamente sul posto per manovrare gli interruttori.

La società FART ha quindi intenzione di installare degli interruttori motorizzati e manovrabili a distanza in modo da facilitare la gestione dell'alimentazione in caso di manutenzione, guasti oppure incidenti lungo la linea. Le SSE potrebbero così approvvigionare indipendentemente le sezioni di loro competenza nel seguente modo:

- SSE Ponte Brolla:  
alimenta a sbalzo la sezione Locarno-Ponte Brolla e l'officina treni a Ponte Brolla
- SSE Intragna:  
alimenta a sbalzo la sezione da Ponte Brolla a Intragna
- SSE Verdasio:  
alimenta a doppio sbalzo la sezione Intragna-Verdasio e la sezione Verdasio-confine

La SSE di Verdasio alimenta quindi tratta più lunga del tracciato (8,8 km), ma anche la tratta con meno traffico (questa sezione non viene infatti toccata dalle modifiche di concetto orario previste).

### Circuito di ritorno

Il circuito di ritorno è composto da:

- rotaie FFS I (in stazione) e rotaie VST 36 (in linea)
- conduttore di ritorno RL (1x95 mm<sup>2</sup>, Cu)

In linea vengono utilizzate entrambe le rotaie collegate in parallelo, mentre nei pressi delle stazioni viene utilizzata una singola rotaia in modo da poter utilizzare il circuito di binario. Ciò significa che una rotaia viene isolata elettricamente e utilizzata dagli impianti di sicurezza per rilevare l'occupazione del binario. Di conseguenza solo una rotaia può venir impiegata per il circuito di ritorno. A causa dei giunti elettrici utilizzati per isolare la rotaia, è necessario collegare in modo alternato le rotaie non isolate per garantire la continuità del circuito di ritorno (si veda regolamento D RTE 27900). Questa connessione avviene tramite dei connettori a Z da 95 mm<sup>2</sup> Cu.

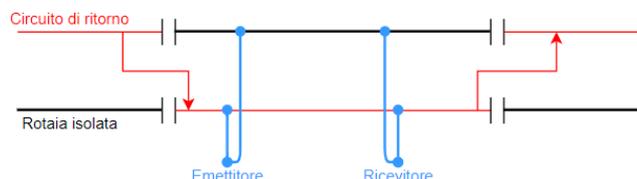


Tabella 15 Schematizzazione del circuito di ritorno in presenza di un circuito di binario

All'interno del progetto di rinnovo LC (si veda l'Allegato 4), FART SA ha intenzione di installare un conduttore di ritorno in rame (non isolato) di sezione pari a 95 mm<sup>2</sup>. Utilizzando questo collegamento disposto in parallelo alle rotaie si ha l'obiettivo di ridurre la resistenza elettrica del circuito di ritorno, riducendo di conseguenza le cadute di tensione. Le rotaie e il conduttore di ritorno saranno collegate ogni 250-300 m mediante collegamenti trasversali (Cu 1x95 mm<sup>2</sup>, isolato).

Il collegamento tra il circuito di ritorno e SSE avviene tramite le barre collettrici presenti nei posti interruttori prossimi alle SSE. In tale barra vi convergono i cavi collegati al circuito di ritorno formato dalle rotaie così come il conduttore RL proveniente dalla sezione a valle e a monte della sottostazione. Il collegamento tra SSE e circuito di ritorno viene così definito:

SSE Ponte Brolla

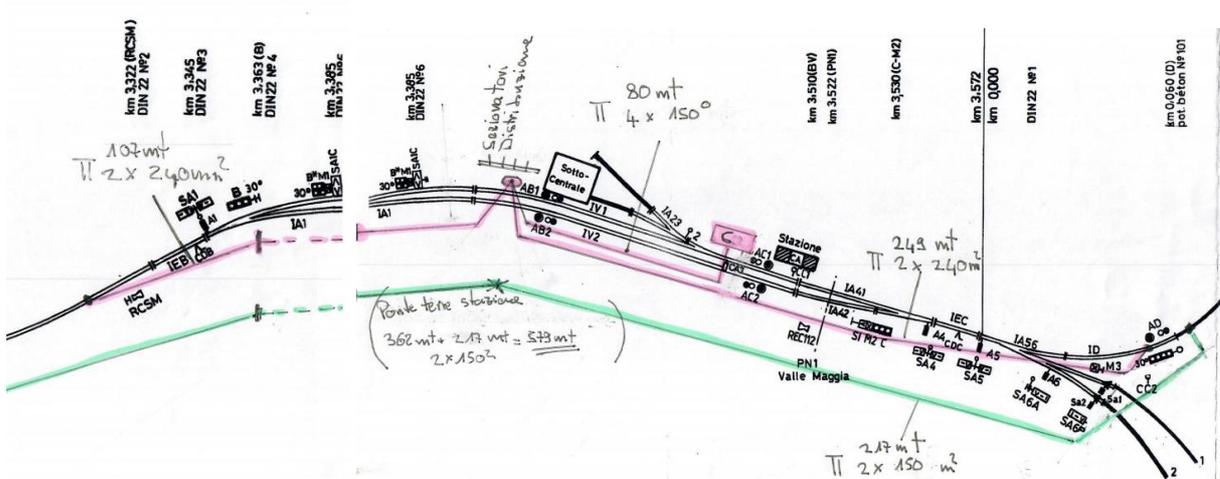


Figura 29 Circuito di ritorno binario-SSE presso Ponte Brolla (in rosa)

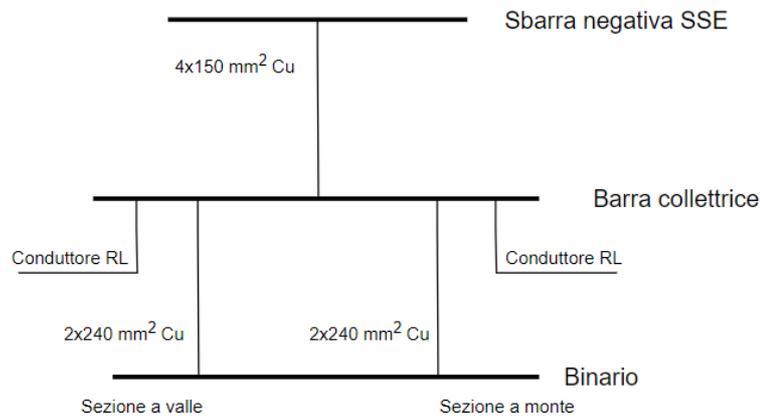


Figura 30 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Ponte Brolla

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-barra colletttrice	4x150 Cu	80
Barra colletttrice-rotaia (lato Locarno)	2x240 Cu	107
Barra colletttrice-rotaia (lato Intragna)	2x240 Cu	249

Tabella 16 Caratteristiche principali dei cavi di collegamento binario-SSE Ponte Brolla



SSE Verdasio

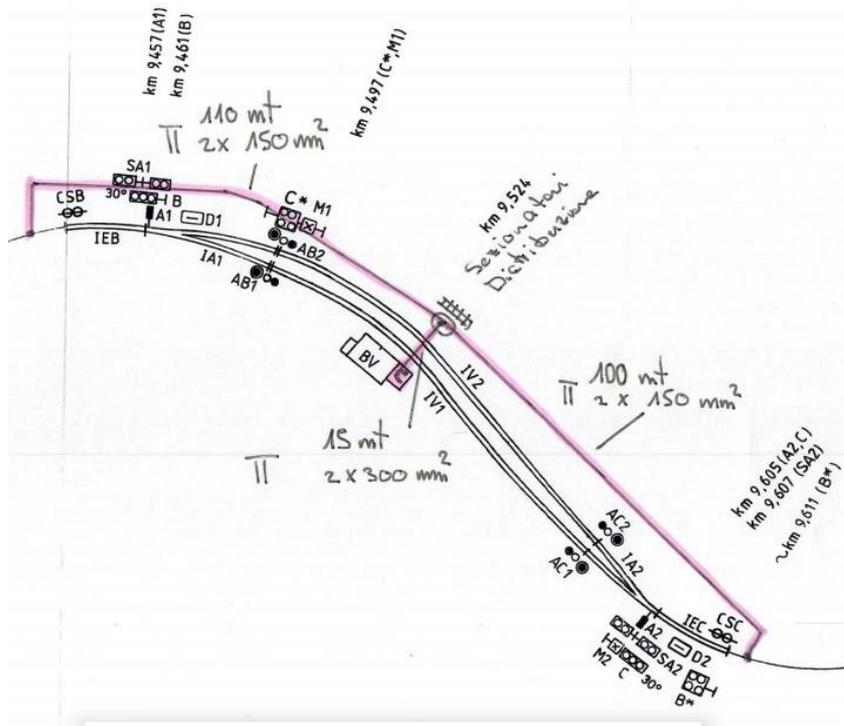


Figura 33 Circuito di ritorno binario-SSE presso Verdasio (in rosa)

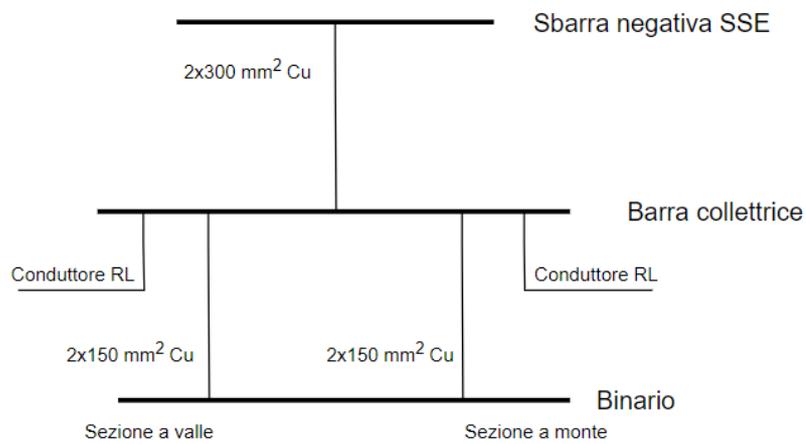


Figura 34 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Verdasio

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-barra colletttrice	2x300 Cu	15
Barra colletttrice-rotaia (lato Intragna)	2x150 Cu	110
Barra colletttrice-rotaia (lao Ribellasca)	2x150 Cu	100

Tabella 18 Caratteristiche principali dei cavi di collegamento binario-SSE Intragna

Per ulteriori chiarimenti si faccia riferimento all'Allegato 6.

## 4.4. Criteri di verifica dell'impianto TE

### 4.4.1. Tensioni limite

Nota la tensione nominale della LC, la normativa EN 50163 stabilisce i limiti di tensione di alimentazione dell'impianto TE:

Tensione nominale	
$U_n$	1350 V
Tensione minima	
$U_{min,1}$	900 V
$U_{min,2}$	900 V
Tensione massima	
$U_{max,1}$	1620 V
$U_{max,2}$	1755 V

Tabella 19 Tensioni limite di operabilità secondo EN 50163

La EN 50163 prescrive che:

- in condizioni di normale esercizio, la tensione di alimentazione dell'impianto TE debba rimanere entro i valori di  $U_{min,1}$  e  $U_{max,2}$
- valori compresi tra  $U_{max,1}$  e  $U_{max,2}$  sono ammessi ma per una durata non superiore a 5 minuti

Nota: la normativa EN 50163 considera tensioni nominali di 1000 e 1500 V<sub>DC</sub>. Si è effettuata un'interpolazione lineare per ottenere i valori relativi a 1350 V<sub>DC</sub>, i quali riguardano la tensione nominale della linea in studio.

La tensione lungo la linea deve inoltre permettere il funzionamento dei motori elettrici del materiale rotabile. Si faccia riferimento al cap. 5.3. per i dettagli inerenti ai nuovi treni.

### 4.4.2. Carichi ammissibili sui raddrizzatori

Dai dati di targa presenti sui raddrizzatori (Allegato 3), è possibile determinare le massime correnti ammissibili:

SSE Ponte Brolla	
Corrente nominale $I_{dN}$	1250 A
Sovraccarico 2 h	150% $I_{dN}$ pari a 1875 A
Sovraccarico 1 min	200% $I_{dN}$ pari a 2500 A
SSE Intragna	
Corrente nominale $I_{dN}$	1250 A
Sovraccarico 2 h	150% $I_{dN}$ pari a 1875 A
Sovraccarico 1 min	200% $I_{dN}$ pari a 2500 A
SSE Verdasio	
Corrente nominale $I_{dN}$	1250 A
Sovraccarico 2 h	150% $I_{dN}$ pari a 1875 A
Sovraccarico 1 min	300% $I_{dN}$ pari a 3750 A

Tabella 20 Sovracorrenti ammissibili per i raddrizzatori

La corrente sui raddrizzatori, durante l'esercizio, non deve superare i valori limite di sovraccarico definiti su 1 minuto rispettivamente 2 ore.

Per quanto riguarda la corrente di picco, i dati di targa non riportano valori in merito. Per questo motivo il valore limite viene considerato analogo alla corrente di sovraccarico su 1 minuto.

#### **4.4.3. Taratura degli extrarapidi**

Si faccia riferimento al cap. 3.5.4.

#### **4.4.4. Potenziale di rotaia**

Si faccia riferimento al cap. 3.5.5.

# 5. Modellazione dell'impianto di corrente di trazione attuale

## 5.1. Software TrainsRunner

TrainsRnner è un simulatore elettromeccanico specifico per sistemi di trasporto vincolati a trazione elettrica che integra l'equazione della trazione (descritta nel cap. 3.4.1.) su tutta la lunghezza del tracciato definito. Modellando le pendenze, i raggi di curvatura, le gallerie e le stazioni è possibile rappresentare dettagliatamente una linea ferroviaria reale. Tutte queste informazioni verranno utilizzate per calcolare le resistenze al moto ad ogni passo di integrazione, definendo quindi per ogni istante di esercizio lo sforzo di trazione richiesto dai motori elettrici di un convoglio.

Attraverso una modellazione dettagliata dell'impianto è possibile simulare l'intero circuito elettrico del sistema. Vengono definite le caratteristiche elettriche delle SSE, dei conduttori che compongono il circuito positivo e negativo, così come le caratteristiche del materiale.

La schematizzazione dell'impianto TE permette di raffigurare l'esatta posizione di tutti gli elementi, in modo da rappresentare le lunghezze effettive del circuito positivo, negativo e dei conduttori.

Il simulatore permette di simulare l'esercizio di più convogli lungo la stessa linea; definendo il concetto orario è possibile simulare il traffico ferroviario reale.

Impostando parametri differenti è possibile simulare dal punto di vista elettromeccanico diversi scenari di esercizio ed analizzare le grandezze elettriche dell'impianto TE.



Figura 35 Diagramma di flusso TrainsRunner

## 5.2. Modellazione del tracciato e dell'orario

### 5.2.1. Considerazioni preliminari

Il software TrainsRunner necessita dei seguenti parametri iniziali:

- numero di linee (con rispettivo nome identificativo)
- numero di binari per ogni linea (con rispettivo numero identificativo)
- punto zero e punto finale della progressiva chilometrica di ogni linea
- punto zero e punto finale di ogni binario della progressiva
- altitudine iniziale di ogni binario
- posizione delle stazioni presenti
- raggi di curva
- pendenze
- velocità ammissibili
- tratte in galleria oppure all'aria aperta

Per quanto riguarda la modellazione dell'orario di esercizio, gli aspetti fondamentali sono:

- denominazione delle fermate
- percorso (binari impegnati) per ogni traccia (binari di incrocio inclusi)
- numero di identificazione del treno che percorre una determinata traccia
- orario di arrivo e partenza ad ogni fermata
- tempo minimo di sosta ad ogni fermata
- azione presso la fermata (transito oppure sosta)

### 5.2.2. Modellazione del tracciato

Dai dati plano-altimetrici della linea messi a disposizione dal gestore dell'infrastruttura (FART SA) si ricavano la progressiva chilometrica iniziale e finale (la progressiva chilometrica è definita a partire dal respingente posto sull'attuale binario 11 della stazione di Locarno-Muralto) di ogni binario e la rispettiva altitudine iniziale.

In questo caso la ferrovia presenta un binario unico con binari di incrocio (BS) presso la stazione di Locarno, Galleria FART e le fermate di S.Martino, Ponte Brolla, Verscio, Cavigliano, Intragna, Corcapolo, Verdasio e Camedo. Ai fini della simulazione è stato modellato anche il binario morto BM situato presso la stazione di Camedo. In questo modo si potrà gestire l'incrocio dei convogli presso la fermata in questione.

Il binario su cui è stata misurata tale progressiva è stato definito come binario principale BP.

Inoltre, ai fini della modellazione topologica della linea Locarno-Camedo, si è tenuto conto dei nuovi lavori previsti per garantire la nuova offerta a cadenza semi-oraria sulla tratta Locarno-Intragna: il modello comprende quindi anche il terzo binario presso la fermata di Intragna e il secondo binario presso la stazione di Tegna.

Tutte le informazioni relative alla definizione dei binari sono descritte nell'Allegato 7.1.

All'interno dello studio non sono stati considerati i binari relativi all'officina treni di Ponte Brolla e della rimessa di Camedo in quanto non influiscono sul risultato delle analisi.

## Pendenze

Al fine di calcolare la forza di resistenza alla pendenza  $R_p$ , il SW TrainsRunner necessita dei valori relativi alla geometria verticale del tracciato. Il SW non considera i raggi di raccordo verticali; per questo motivo si è ricorso a modellazioni geometriche semplificate per tenere conto di questi elementi. Per il 71,07% della traccia è stato possibile inserire le pendenze effettive definite dal profilo altimetrico. Per il restante 28,93% si è intervenuti con le considerazioni geometriche descritte di seguito:

### Caso 1

I raggi di raccordo verticali  $R^C$  tra due tratti a pendenza costante sono stati modellati come prolungamento di tali pendenze. Il raccordo viene quindi diviso a metà: la prima parte è caratterizzata dalla pendenza costante  $i_1$  precedente, mentre la seconda dalla pendenza costante successiva  $i_2$ .

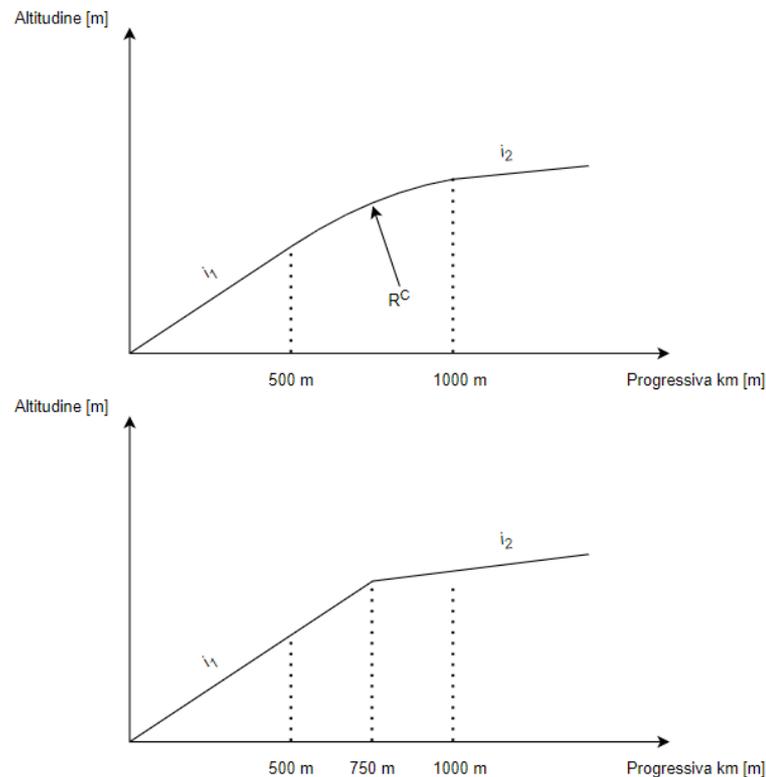


Figura 36 Esempio di modellazione dei raccordi tra pendenze costanti (Caso 1)

Questo tipo di modellazione è stata fatta per una lunghezza pari a 2989,2 m, ovvero il 15,74% della tratta Locarno-Camedo.

### Caso 2

I doppi raggi di raccordo verticale  $R^{C_1}$  e  $R^{C_2}$  tra due tratti a pendenza costante sono stati modellati come prolungamento di tali pendenze. Il primo raccordo viene definito dalla pendenza costante precedente  $i_1$ , mentre il secondo raccordo dalla pendenza costante successiva  $i_2$ .

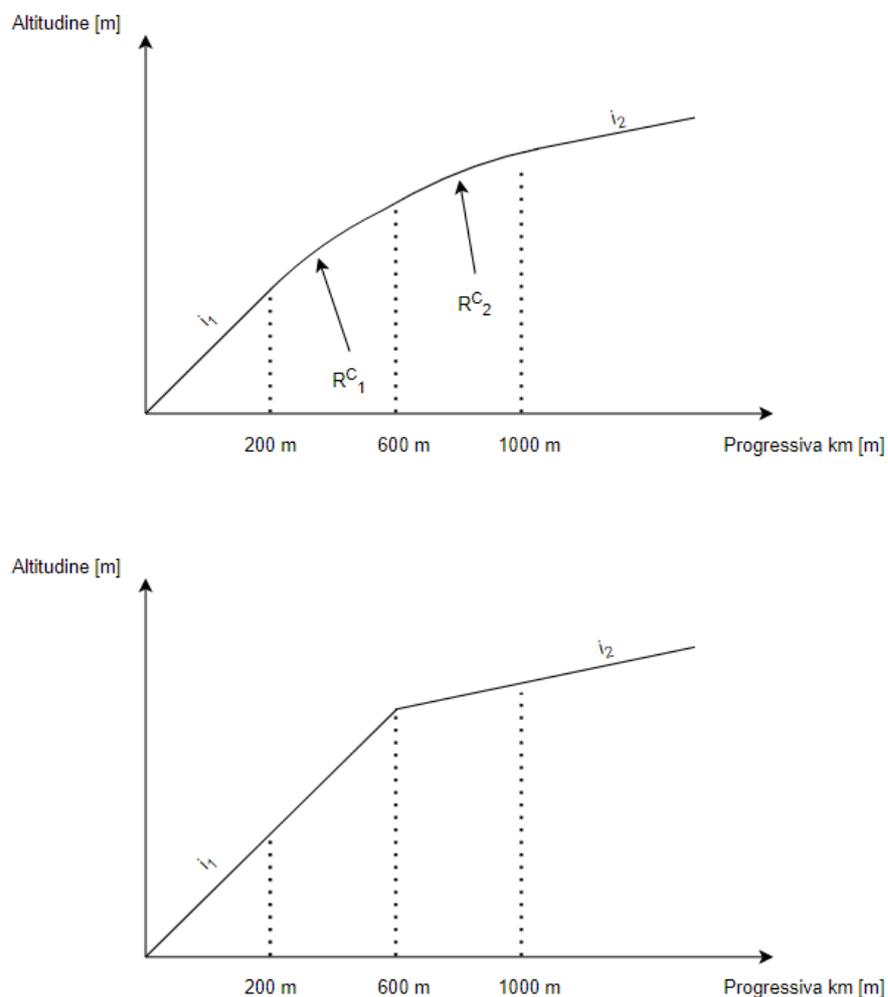


Figura 37 Esempio di modellazione dei raccordi tra pendenze costanti (Caso 2)

Questo tipo di modellazione è stata fatta per una lunghezza pari a 2186,01 m, ovvero il 11,51% della tratta Locarno-Camedo.

### Caso 3

I tripli raggi di raccordo verticali  $R^{C_1}$ ,  $R^{C_2}$  e  $R^{C_3}$  tra tratti a pendenza costante sono stati modellati come prolungamento di tali pendenze. Il primo raccordo viene definito dalla pendenza costante precedente  $i_1$ , mentre il terzo raccordo dalla pendenza costante successiva  $i_2$ . Il secondo raccordo viene invece modellato come descritto nel Caso 1.

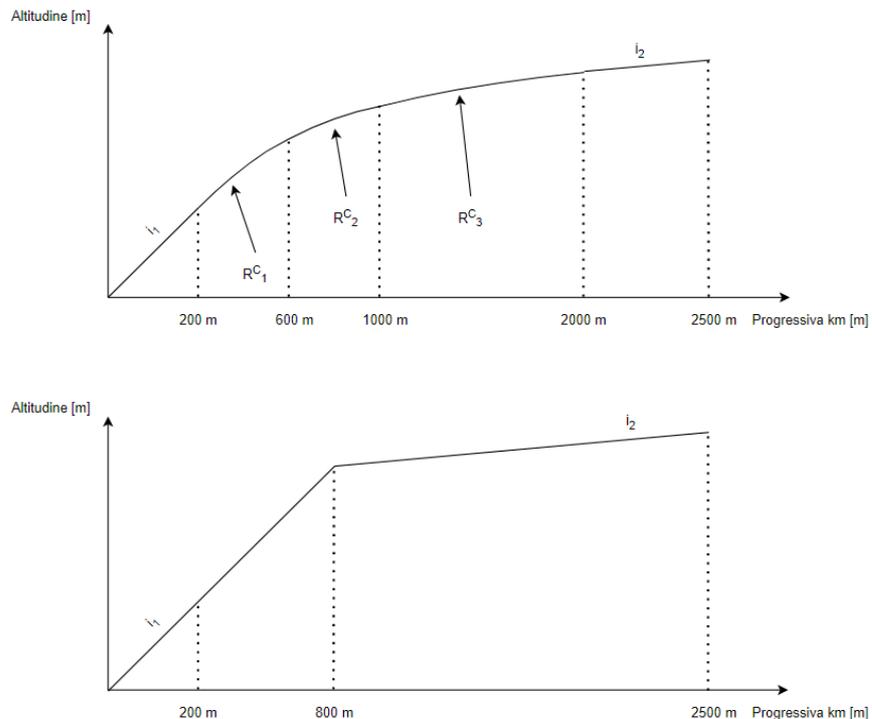


Figura 38 Esempio di modellazione dei raccordi tra pendenze costanti (Caso 3)

Questo tipo di modellazione è stata fatta per una lunghezza pari a 318,65 m, ovvero l'1,68% della tratta Locarno-Camedo.

L'Allegato 7.2. riporta le pendenze del tracciato della tratta analizzata.

### Curve

Al fine di calcolare la forza di resistenza in curva  $R_c$ , il SW TrainsRunner necessita come dati di input i raggi di curvatura costanti. Il SW non considera i raccordi a raggio variabile, per questo motivo si è dovuto ricorrere a considerazioni geometriche per tenere conto di questi elementi. Per il 80,97% della tratta è stato possibile inserire i raggi costanti effettivi della geometria orizzontale. Per il restante 19,03% si è dovuto invece intervenire con le modellazioni geometriche descritte di seguito.

### Caso 1

I raggi di raccordo orizzontali a raggio variabile  $R^V$  tra due curve a raggio costante  $R^C$  sono stati modellati come prolungamento di tali curve. Il raccordo viene quindi diviso a metà: la prima parte è caratterizzata dal raggio costante  $R^{C_1}$  della curva precedente, mentre la seconda dal raggio costante  $R^{C_2}$  della curva successiva.

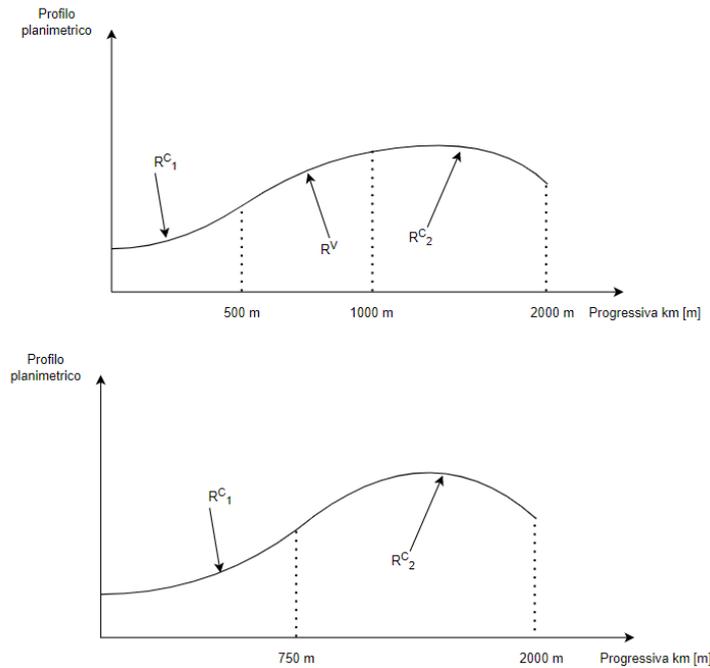


Figura 39 Esempio di modellazione dei raccordi a raggio variabile tra curve a raggio costante (Caso 1)

Il rettilineo è un caso di particolare di curva a raggio costante infinito. Per questo motivo si utilizza lo stesso procedimento descritto in precedenza per modellare anche i rettilinei.

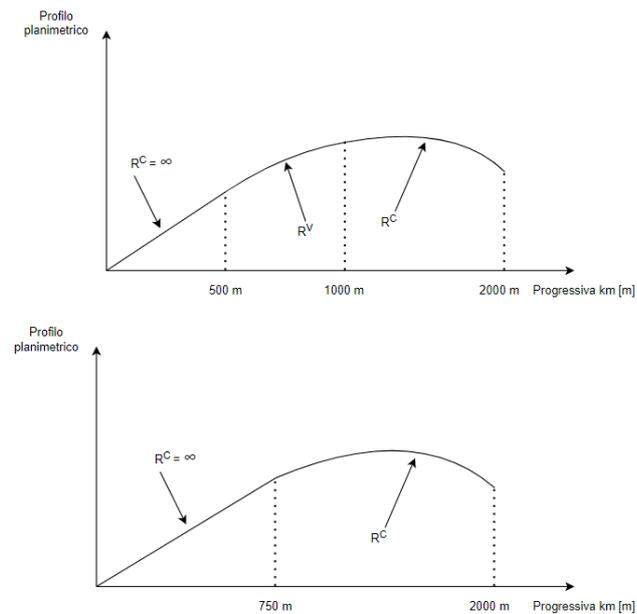


Figura 40 Esempio di modellazione dei raccordi a raggio variabile tra curve a raggio costante e rettilinei (Caso 1)

Queste modellazioni sono state fatte per una lunghezza pari a 3530.42 m, ovvero il 18,58% della tratta Locarno-Camedo.

## Caso 2

I doppi raccordi orizzontali a raggio variabile  $R^V_1$  e  $R^V_2$  tra due curve a raggio costante  $R^C$  sono stati modellati come prolungamento di tali curve. Il primo raccordo viene definito dal raggio costante  $R^C_1$  della curva precedente, mentre il secondo raccordo dal raggio costante  $R^C_2$  della curva successiva.

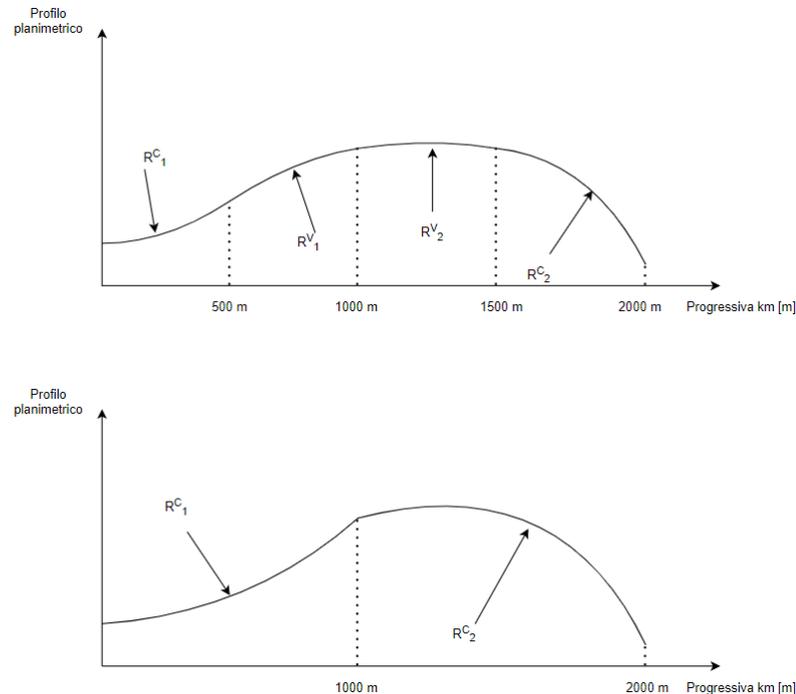


Figura 41 Esempio di modellazione dei raccordi a raggio variabile tra curve a raggio costante (Caso 2)

Questo tipo di modellazione è stata fatta per una lunghezza pari a 85,16 m, ovvero il 0,45% della tratta Locarno-Camedo.

L'Allegato 7.3. riporta i raggi di curvatura del tracciato utilizzati per il modello TrainsRunner.

## Tunnel

Per determinare la forza di resistenza aerodinamica in galleria  $R_G$ , è necessario stabilire la presenza e la lunghezza di questi elementi infrastrutturali. Come dati di input si definiscono, mediante le progressive, le tratte in galleria e in aria aperta. Per stabilire la presenza di una galleria il programma utilizza due valori:

- 1 per le tratte percorse all'interno di un tunnel
- 0 per le tratte percorse in aria aperta

L'Allegato 7.4. riporta i valori relative alla modellazione delle gallerie.

## Limiti di velocità

Come mostrato nel cap. 3.4.1., la velocità è un parametro molto importante dell'equazione della trazione: è quindi fondamentale definire questo valore ad ogni passo di integrazione per poter determinare la potenza richiesta ai motori di un convoglio. Per modellare le velocità massime vengono distinti i sensi di percorrenza della linea. Il termine UP definisce i limiti di velocità considerando il naturale senso di percorrenza della progressiva chilometrica (ovvero da km 0 a km 19). Il termine DOWN indica invece le velocità considerando un senso di percorrenza opposto (da km 19 a km 0). Ai fini delle simulazioni vengono utilizzate le velocità proposte da uno studio riguardante l'ottimizzazione del tracciato. L'obiettivo di tale studio è di modificare il sovrizzo di alcuni binari in modo da garantire velocità

di percorrenza maggiori ma al contempo di consentire valori di accelerazione laterale tollerabili dalla clientela durante la marcia. L'obiettivo è quindi quello di raggiungere velocità maggiori (rispetto ai valori attualmente in vigore) in alcuni tratti della linea garantendo al contempo i parametri di comfort.

Velocità più elevata significa consumo maggiore da parte del materiale rotabile; la corrente assorbita aumenta, così come le cadute di tensione. Considerando questi valori si vuole dunque rendere la simulazione più conservativa dal punto di vista energetico.

L'Allegato 7.5. riporta le informazioni riguardanti la modellazione delle velocità.

### **Stazioni**

Per stabilire i profili di velocità dei treni in prossimità delle fermate, è importante stabilire la loro posizione lungo la tratta. Per identificare la progressiva di una fermata è stato considerato l'asse della banchina. In questo modo il treno (il cui punto di riferimento è posizionato a metà della propria lunghezza) fermerà esattamente a metà della fermata, evitando così eventuali occupazioni degli scambi. Anche in questo caso si distingue il senso di percorrenza della traccia secondo le denominazioni UP e DOWN descritte in precedenza.

L'Allegato 7.6. riporta le progressive di ogni fermata.

### **Segnalamento ferroviario**

Il software offre la possibilità di inserire nel modello anche semafori e segnali ferroviari per poter simulare nodi complessi con traffico intenso.

L'obiettivo del lavoro consiste nella verifica elettrica dell'impianto TE e non di una verifica di potenzialità ed efficienza del sistema di segnalamento. Per questo motivo, dato il tipo di esercizio e di orario, si suppone di regolare la circolazione basandosi sul concetto orario.

Pertanto, i semafori e ulteriori elementi del segnalamento non vengono modellati.

#### **5.2.3. Modellazione dell'orario**

Il nuovo concetto orario previsto dalla società FART (si veda l'Allegato 8) presenta tre differenti tipologie di servizio:

- tipo 1: servizio regionale (REG) effettuato mediante il nuovo materiale rotabile STADLER a 3 casse (il servizio ferma ad ogni stazione della linea)
- tipo 2: servizio internazionale (INT) effettuato in collaborazione con SSIF (il servizio è prodotto più o meno equamente tra FART SA e SSIF SpA e prevede l'utilizzo di treni Panoramici SSIF e del nuovo materiale rotabile FART a 4 casse. Il servizio ferma presso le stazioni di Locarno, S. Antonio, Intragna e Camedo)
- tipo 3: tracce BIS previste come servizio di rinforzo nei periodi di massima affluenza di turisti (grazie a questo servizio supplementare è possibile garantire il trasporto a seguito di una maggiore richiesta. Anche in questo caso il servizio è prodotto più o meno equamente tra le società FART e SSIF utilizzando il medesimo materiale rotabile del servizio INT)

Quanto descritto all'interno di questo capitolo è stato implementato mediante un foglio di lavoro Excel (Allegato 9). Grazie a questo formato è possibile importare l'orario direttamente all'interno del software TrainsRunner definendo così il concetto orario.

### **Fermate**

Si stabiliscono le fermate presenti sulla linea L620 a cui viene assegnato un numero identificativo univoco.

## **Materiale rotabile**

All'interno dell'orario è necessario identificare il materiale rotabile in esercizio. I treni vengono così definiti:

- FART NTS 3 casse: Nuovi Treni Stadler FART per il servizio regionale
- FART NTS 4 casse: Nuovi Treni Stadler FART per il servizio internazionale e per il servizio di supporto
- SSIF Abe 4/4: materiale rotabile SSIF per il servizio internazionale e di rinforzo (BIS)
- SSIF Abe 8/8: materiale rotabile SSIF per il servizio internazionale e di rinforzo (BIS)

Ad ogni convoglio viene inoltre assegnato un valore di lunghezza [m] e massa [kg] (definiti nel capitolo 5.3).

## **Percorsi**

Partendo dal nuovo concetto orario, sono state definite le tracce percorse da ogni treno sulla base dei binari modellati nel cap. 5.2.2., binari di scambio inclusi. Per quanto riguarda la gestione degli incroci, è stato assunto che il primo treno ad annunciarsi presso gli impianti di sicurezza di stazione verrà accettato sul binario nr. 1. In base alla traccia e al tipo di servizio sono stati definiti i seguenti orari:

- Intragna-Locarno REG
- Locarno-Intragna REG
- Camedo-Locarno REG
- Locarno-Camedo REG
- Camedo-Locarno INT
- Locarno-Camedo INT
- Locarno-Camedo BIS
- Camedo-Locarno BIS

Per ogni percorso è stata indicata la progressiva iniziale e finale di ogni binario, la direzione di percorrenza mediante il parametro UP/DOWN e lo stile di guida. Ai fini della simulazione è stato ipotizzato uno stile di guida cruising, il quale determina una velocità di percorrenza massima costante. Questo parametro è il più conservativo dal punto di vista energetico, permettendo quindi più sicurezza in considerazione del computo elettrico.

## **Orario**

Successivamente viene costruito l'orario utilizzando i parametri descritti in precedenza. Ad ogni percorso è associato un treno in modo univoco, gli orari di arrivo e partenza (nel caso di fermata) oppure l'orario di passaggio (in caso di solo transito).

Nell'ambito del presente lavoro viene simulato l'intervallo di orario dalle ore 15:00 alle ore 17:00.

L'identificazione del materiale rotabile è stata scelta arbitrariamente. I treni in partenza da Locarno vengono numerati pari, mentre i convogli che viaggiano in direzione opposta vengono numerati dispari.

Nella tabella di seguito è riportata la numerazione dei treni in servizio durante l'intervallo di tempo definito:

Partenza	ID treno	Traccia
14:47:00	421	
15:47:00	423	Intragna-Locarno REG
16:47:00	425	
15:19:00	422	
16:19:00	424	Locarno-Intragna REG
14:50:00	321	
15:50:00	323	Camedo-Locarno REG
16:50:00	325	
14:49:00	322	
15:49:00	324	Locarno-Camedo REG
16:49:00	326	
14:40:00	521	
15:40:00	522	Camedo-Locarno INT
16:40:00	523	
14:42:00	522	
15:42:00	524	Locarno-Camedo INT
16:42:00	526	
15:56:00	723	
16:56:00	725	Camedo-Locarno BIS
14:57:30	721	
15:57:30	722	Locarno-Camedo BIS
16:57:30	724	

Tabella 21 Identificazione materiale rotabile

L'Allegato 10 riporta l'orario grafico con integrata la numerazione dei convogli.

Per quanto riguarda le stazioni di arrivo e partenza di ogni percorso stabilito, occorre anche considerare il tempo di preparazione e spegnimento del veicolo in attesa di ripartenza per la produzione della traccia successiva. Questo intervallo viene considerato come tempo di consumo da parte dei sistemi ausiliari e pertanto rilevanti al fine del computo elettrico della simulazione. Il comportamento del treno viene modellato in funzione del tempo di sosta nel seguente modo:

- in caso di tempo di sosta ridotto (<30 minuti) il convoglio è operativo e connesso alla LC. Tutti i sistemi ausiliari sono quindi attivi e contribuiscono all'assorbimento energetico. Metà del tempo di sosta verrà assegnato alla traccia precedente mentre la restante metà alla traccia successiva
- in caso di tempi di sosta prolungati (>30 minuti) si ipotizza che il convoglio venga spento 5 minuti dopo l'arrivo a destinazione e riavviato 5 minuti prima dell'orario di partenza previsto. Durante questo intervallo di tempo i sistemi ausiliari rimangono attivi

Si definisce inoltre un Minimum Dwell Time, ovvero un tempo minimo di sosta. Questo valore indica il tempo di fermata minimo per cui un treno deve sostare presso una stazione (anche in caso di ritardo). Consultando l'orario previsto da FART SA, si è assunto un valore di Min Dwell Time di 30 secondi, pari al tempo di fermata minimo vigente in alcune delle stazioni.

## 5.3. Modellazione del nuovo materiale rotabile

Il servizio sulla linea Locarno-Camedo verrà effettuato da quattro tipologie di convogli:

- materiale rotabile FART: Stadler a 3 casse e Stadler a 4 casse
- materiale rotabile SSIF: Abe 4/4 e Abe 8/8

I dati necessari alla modellazione di un convoglio sono:

- lunghezza totale del convoglio [m]
- peso a vuoto [kg]
- peso trasportato [kg]
- massa rotante [%], definita come percentuale rispetto alla massa a vuoto
- coefficienti necessari a descrivere le resistenze ordinarie e accidentali
- consumo da parte dei sistemi ausiliari
- tipo di frenatura (rigenerativa o dissipativa)
- Velocità massima [km/h]
- accelerazione massima [m/s<sup>2</sup>] e decelerazione massima [m/s<sup>2</sup>] in approccio a stazioni e limiti di velocità
- tensione nominale, massima e minima [V]
- forze al cerchione [N], le quali si suddividono in forza di trazione, forza di trazione aggiuntiva, forza totale di frenatura e forza elettrica di frenatura. Ognuno delle forze citate viene rappresentata in funzione della velocità [km/h]
- rendimento in trazione e in frenatura
- limiti di corrente in trazione e in frenatura
- caratteristiche elettriche del Super Capacitor (se presente)
- distribuzione delle masse sulla lunghezza del treno

L'Allegato 11 riporta tutti i valori utilizzati durante la modellazione.

### 5.3.1. Materiale rotabile FART

Si veda l'Allegato 12 per le specifiche dei nuovi treni Stadler (NTS) fornite dal produttore.



Figura 42 Nuovi treni Stadler [16]

#### Lunghezza

Di seguito vengono riportate le lunghezze del convoglio in base alla due configurazioni (tre e quattro casse):

FART NTS 3 casse	
Lunghezza totale [m]	48
FART NTS 4 casse	
Lunghezza totale [m]	64

Tabella 22 Lunghezze nuovi convogli Stadler

## Masse

Le masse consentono di determinare il peso del convoglio, il quale viene utilizzato per calcolare tutte le forze di resistenza al moto (si veda capitolo 3.4.1.). L'inerzia dovuta agli elementi di rotazione (quali assi, ruote, alberi) viene considerata e viene espressa mediante una percentuale della massa a vuoto del convoglio.

FART NTS 3 casse	
Massa a vuoto [kg]	84000
Massa trasportabile [kg]	20000
Massa totale [kg]	104000
Masse rotanti [%]	7
FART NTS 4 casse	
Massa a vuoto [kg]	110000
Massa trasportabile [kg]	26500
Massa totale [kg]	136500
Masse rotanti [%]	7

Tabella 23 Masse e masse rotanti nuovi convogli Stadler

## Resistenze al moto

Si definiscono di seguito i coefficienti necessari a calcolare le resistenze ordinarie ed accidentali utilizzate per risolvere l'equazione della trazione (si veda capitolo 3.4.1.).

Per quanto riguarda le resistenze ordinarie, Stadler fornisce per entrambi i convogli la seguente formula:

$$W = 0,00025 \frac{kN}{\left(\frac{km}{h}\right)^2} \cdot v^2 + 0,00032 \frac{kN}{t \cdot \left(\frac{km}{h}\right)} \cdot v \cdot m + 0,0083 \frac{kN}{t} \cdot m \quad (5.3.1)$$

con:

- $W$  la resistenza ordinaria espressa in [kN]
- 0,00025 il coefficiente quadratico del polinomio, espresso in  $\left[\frac{kN}{\left(\frac{km}{h}\right)^2}\right]$
- 0,00032 il coefficiente lineare del polinomio, espresso in  $\left[\frac{kN}{t \cdot \left(\frac{km}{h}\right)}\right]$
- 0,0083 il coefficiente costante del polinomio, espresso in  $\left[\frac{kN}{t}\right]$
- $m$  e  $v$  sono la massa rispettivamente la velocità del materiale, definite in [t] rispettivamente in  $\left[\frac{km}{h}\right]$

Il software necessita di specificare i coefficienti come combinazioni di unità SI. In alcuni casi sarà necessario considerare la massa totale del materiale rotabile, ovvero 104 t per NTS 3 casse e 136,5 t per NTS 4 casse. Si procede ora alla conversione dei parametri da utilizzare come dati di input:

<b>FART NTS 3 casse</b>				
	Valore Stadler	[UdM]	Valore Trains Runner	[UdM]
Coeff quadratico	0,00025	$\frac{kN}{\left(\frac{km}{h}\right)^2}$	3,24	$N \cdot \frac{s^2}{m^2}$
Coeff lineare	0,00032	$\frac{kN}{t \cdot \left(\frac{km}{h}\right)}$	119,808	$N \cdot \frac{s}{m}$
Coeff costante	0,0083	$\frac{kN}{t}$	863,2	N
<b>FART NTS 4 casse</b>				
	Valore Stadler	[UdM]	Valore Trains Runner	[UdM]
Coeff quadratico	0,00025	$\frac{kN}{\left(\frac{km}{h}\right)^2}$	3,24	$N \cdot \frac{s^2}{m^2}$
Coeff lineare	0,00032	$\frac{kN}{t \cdot \left(\frac{km}{h}\right)}$	157,248	$N \cdot \frac{s}{m}$
Coeff costante	0,0083	$\frac{kN}{t}$	1132,95	N

Tabella 24 Coefficienti per le resistenze ordinarie nuovi convogli Stadler

Per quanto riguarda le resistenze accidentali in galleria, il programma TrainsRunner richiede un coefficiente quadratico simile a quello utilizzato per calcolare le resistenze ordinarie. Purtroppo, il produttore non fornisce alcun coefficiente. Si assume quindi un valore doppio rispetto a quello del coefficiente quadratico definito nell'equazione 5.3.1 riferito al moto in aria libera.

<b>FART NTS 3 casse e FART NTS 4 casse</b>			
Valore moto all'aria aperta	[UdM]	Valore moto in galleria	[UdM]
3,24	$N \cdot \frac{s^2}{m^2}$	6,28	$N \cdot \frac{s^2}{m^2}$

Tabella 25 Coefficiente di moto in galleria nuovi convogli Stadler

Il produttore fornisce il coefficiente relativo alle resistenze in curva; anche in questo caso è necessario convertire il valore fornito da Stadler nell'unità di input:

<b>FART NTS 3 casse e FART NTS 4 casse</b>			
Valore resistenze in curva	[UdM]	Valore resistenze in curva	[UdM]
530	$\frac{N}{kN} \cdot m$	5,2	$\frac{N}{kg} \cdot m$

Tabella 26 Coefficiente resistenze in curva nuovi convogli Stadler

### Carichi ausiliari

I carichi ausiliari identificano il consumo elettrico dovuto ai sistemi non finalizzati alla trazione del convoglio (non rientrano quindi all'interno dell'equazione della trazione). Illuminazione, riscaldamento/raffrescamento delle casse, strumentazione di bordo, ecc provocano un assorbimento di corrente indipendentemente dal moto del treno ed influenzano le cadute di tensione sulla LC.

Ai fini della modellazione si distingue, inoltre, la potenza media assorbita da questi apparecchi in funzione della stagione.

FART NTS 3 casse	
Potenza media sistemi ausiliari (veicolo fermo) [kW]	72 in inverno, 85 in estate
Potenza media sistemi ausiliari (veicolo in moto) [kW]	72 in inverno, 85 in estate
FART NTS 4 casse	
Potenza media sistemi ausiliari (veicolo fermo) [kW]	92 in inverno, 102 in estate
Potenza media sistemi ausiliari (veicolo in moto) [kW]	92 in inverno, 102 in estate

Tabella 27 Carichi ausiliari nuovi convogli Stadler

In questo caso il fornitore assicura lo stesso consumo indipendentemente dalla velocità del treno. Bisogna però ricordare che i valori indicati si riferiscono direttamente ai sistemi: non tengono quindi conto di perdite di potenza dovute al convertitore DC/DC che ne permette la corretta alimentazione. Durante la modellazione si esprime quindi il consumo dei carichi ausiliari al pantografo:

$$P_{aux,pant} = \frac{P_{aux}}{\eta} \quad (5.3.1)$$

con:

- $P_{aux}$  la potenza di assorbimento dei carichi ausiliari
- $\eta$  il rendimento del convertitore (si veda paragrafo "Rendimenti")

### Frenatura

I sistemi proposti dal software per modellare il tipo di frenatura dei convogli sono i seguenti:

- frenata dissipativa
- frenata rigenerativa

Nel caso del primo sistema si definisce un tipo di frenata in cui tutta l'energia viene dissipata (prevalentemente in calore). Il secondo sistema permette, invece, di recuperare una parte di questa energia convertendola in energia elettrica utile all'alimentazione della LC. In questo ultimo caso è necessario specificare a partire da che velocità questo processo avviene.

FART NTS 3 casse e FART NTS 4 casse	
Tipo di frenatura	Rigenerativa
Velocità minima [km/h]	10

Tabella 28 Frenatura nuovi convogli Stadler

### Limitazioni al moto dei convogli

Si definiscono di seguito le velocità massime così come l'accelerazione e la decelerazione ammissibili. Nel caso della decelerazione, viene specificato il valore in linea e in stazione. Questi parametri consentono di porre i limiti massimi alle caratteristiche cinematiche del veicolo.

FART NTS 3 casse e FART NTS 4 casse	
Velocità massima [km/h]	100
Accelerazione massima [m/s <sup>2</sup> ]	1,15
Decelerazione massima in stazione [m/s <sup>2</sup> ]	1,15
Decelerazione massima in linea [m/s <sup>2</sup> ]	1,15

Tabella 29 Caratteristiche cinematiche nuovi convogli Stadler

### Dati elettrici dei convogli

Questi valori vengono specificati con il fine di determinare i limiti di tensione per cui viene garantita l'operabilità del materiale rotabile.

FART NTS 3 casse e FART NTS 4 casse	
Tensione nominale [V]	1350
Tensione minima [V]	900
Tensione massima [V]	1650

Tabella 30 Tensioni limite di operabilità nuovi convogli Stadler

Come si può osservare, dalla Tabella 30, la tensione minima di esercizio corrisponde al valore limite stabilito dalle EN 50163. Al fine di garantire la corretta operabilità dei convogli è necessario che le cadute di tensione non portino al superamento di tale limite.

### Forze al cerchione

La caratteristica meccanica di un mezzo di trazione fornisce la variazione dello sforzo di trazione al cerchione in funzione della velocità del veicolo.

Il diagramma può essere suddiviso in due zone denominate:

- zona dell'aderenza
- zona della potenza

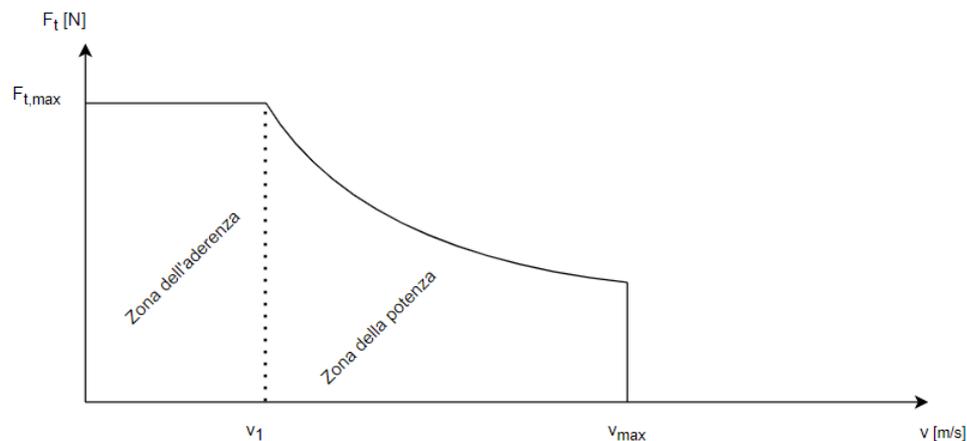


Figura 43 Caratteristica meccanica di un veicolo con motore di trazione a potenza costante

La zona dell'aderenza definisce lo sforzo di trazione ammissibile dal veicolo a basse velocità (fino a  $v_1$ ). All'interno di questa zona troviamo lo sforzo massimo di trazione in quanto i motori elettrici devono vincere le forze di resistenza al moto così come l'inerzia del veicolo. Lo sforzo massimo è però limitato dall'aderenza: la forza di trazione deve essere garantita senza che ci sia uno slittamento delle ruote (si veda 3.4.15 e 3.4.16).

La zona della potenza definisce, invece, il limite di potenza garantito dai motori elettrici. Una volta superata la fase inerziale di avviamento, i motori devono vincere unicamente le resistenze al moto  $R$ , le quali aumentano all'incrementare della velocità (si veda cap. 3.4.1.). La velocità massima  $v_{max}$  viene definita quando la forza di trazione generata dai motori eguaglia le forze di resistenza. Quando la velocità del veicolo è inferiore a  $v_{max}$ , la differenza  $F_a$  tra lo sforzo di trazione e le resistenze al moto determina la forza ancora disponibile per poter accelerare il veicolo.

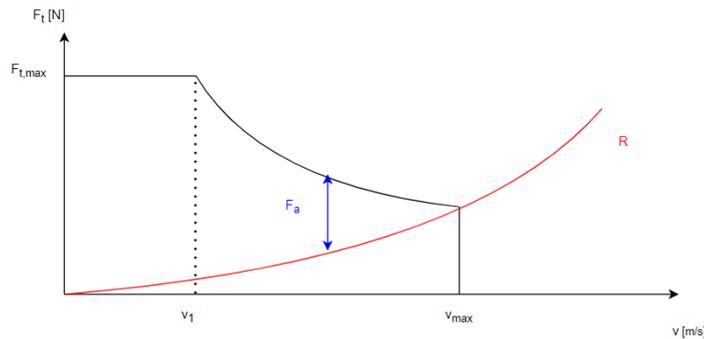


Figura 44 Caratteristica meccanica e forze di resistenza

La curva che descrive la zona di potenza esprime il comportamento dei motori a potenza costante ( $\eta \cdot P_{max}$ ), ovvero:

$$F_t = \frac{\eta \cdot P_{max}}{v} \tag{5.3.2}$$

con:

- $\eta$  il rendimento dei motori
- $P_{max}$  la potenza massima ammissibile dai motori elettrici [W]
- $v$  la velocità del convoglio [m/s]

Analogamente a quanto accade per la trazione, è possibile determinare la caratteristica meccanica relativa al comportamento durante la frenatura del veicolo. Si faccia riferimento a [17] e [18] per ulteriori approfondimenti.

Si riportano di seguito le caratteristiche meccaniche dei nuovi treni Stadler a 3 e 4 casse. Gli sforzi di trazione/frenatura e le velocità che determinano la zona di aderenza sono:

Trazione		
	FART NTS 3 casse	FART NTS 4 casse
$v_1$ [km/h]	32	32
$v_{max}$ [km/h]	110	110
$F_{t,max}$ [N]	120000	160000
Frenatura		
	FART NTS 3 casse	FART NTS 4 casse
$v_1$ [km/h]	54	54
$v_{max}$ [km/h]	110	110
$F_{f,max}$ [N]	120000	160000

Tabella 31 Valori caratteristica meccanica FART NTS 3 e 4 casse

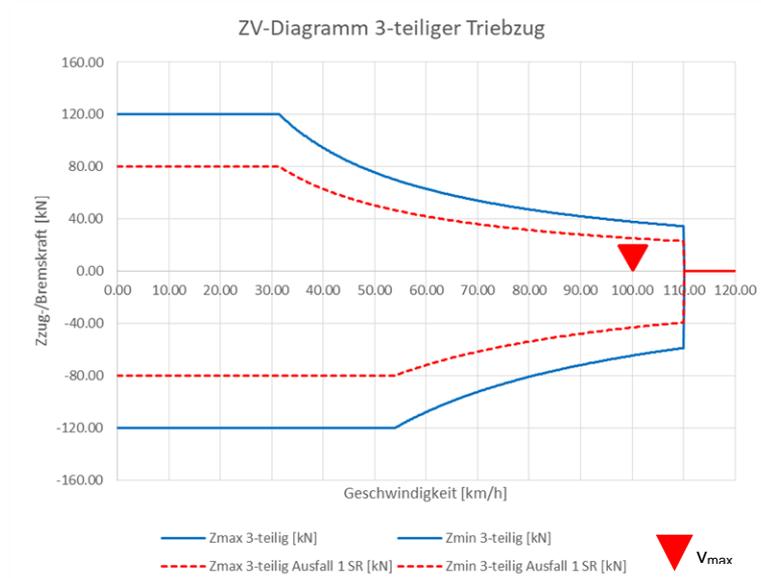


Figura 45 Diagramma trazione/frenatura-velocità nuovi convogli Stadler a 3 casse

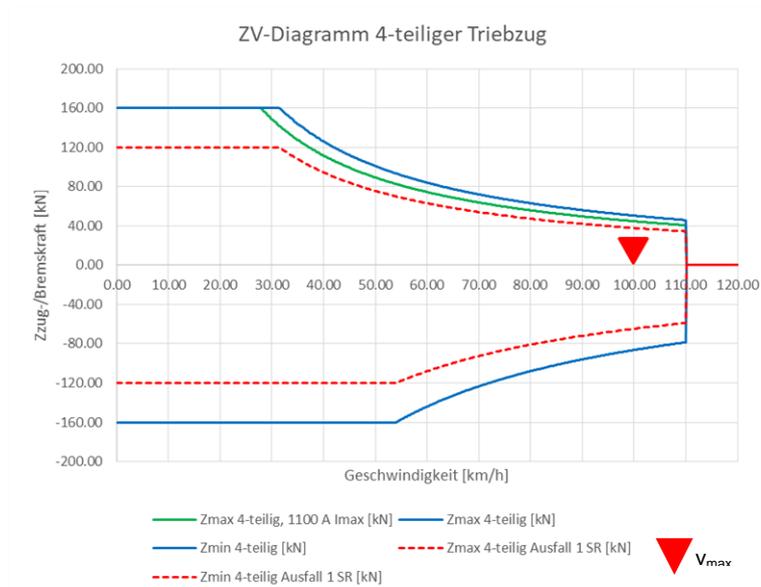


Figura 46 Diagramma trazione/frenatura-velocità nuovi convogli Stadler a 4 casse

**Rendimenti**

I rendimenti esprimono le perdite energetiche durante i processi di trasformazione dell'energia (da elettrica a meccanica e viceversa). I rendimenti dei convogli forniti dal produttore sono:

FART NTS 3 casse e FART NTS 4 casse	
Elemento	Rendimento
Motore	0,8-0,95
Trasmissione	0,97
Convertitore trazione	0,97
Convertitore sistemi ausiliari	0,95

Tabella 32 Rendimenti nuovi convogli Stadler

STUDENTSUPSI

Partendo da questi elementi è possibile determinare il rendimento della catena di conversione elettromeccanica dell'energia di trazione:

$$\eta = \eta_{mot} \cdot \eta_{trasm} \cdot \eta_{traz} = 0,823 \quad (5.3.3)$$

dove:

- $\eta_{mot}$  è il rendimento del motore; in questo caso si è considerato 0,875
- $\eta_{trasm}$  è il rendimento della trasmissione, ovvero 0,97
- $\eta_{traz}$  è il rendimento del convertitore di trazione, ovvero 0,97

### Limiti di corrente/trazione

Nel caso di un assorbimento eccessivo di potenza al pantografo, è possibile limitare l'assorbimento di corrente di trazione per evitare eccessive cadute di tensione. Allo stesso modo, in caso di rigenerazione eccessiva, è possibile limitare la corrente onde evitare pericolose sovratensioni sulla linea. Questi valori limite esprimono, dunque, i limiti di operabilità del materiale rotabile.

Al fine di determinare i limiti di corrente e tensione (sia in trazione che in frenatura) richiesti all'impianto TE, si è considerata la caratteristica potenza al cerchione-tensione di linea messa a disposizione del produttore del convoglio.

Il diagramma riportato in Figura 47 mostra il valore di tensione per cui subentrano le limitazioni di potenza, le quali sono espresse come percentuale rispetto alla potenza al cerchione (in trazione).

Si può osservare che, in caso di trazione, tra i 1350 V e i 1700 V, non si verificano limitazioni in quanto la potenza al cerchione corrisponde al 100%.

Allo stesso modo, in caso di frenata rigenerativa, tra i 1210 V e i 1550 V non si hanno limitazioni di potenza (la percentuale della potenza frenante raggiunge il 170% in quanto rapportata alla potenza al cerchione in trazione).

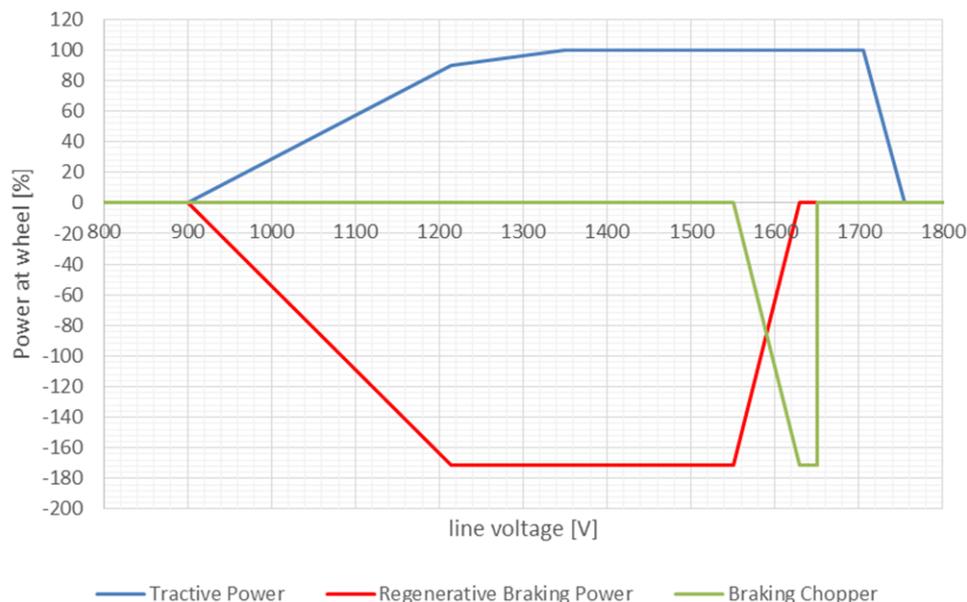


Figura 47 Diagramma potenza al cerchione-tensione di linea nuovi convogli Stadler

Riprendendo le formule 3.4.18 e 3.4.19 è possibile ricavare la potenza al pantografo:

$$P_{pant,t} = \frac{v \cdot F_t}{\eta} \quad (5.3.4)$$

	$P_{pant,f} = v \cdot F_f \cdot \eta$	(5.3.5)
--	---------------------------------------	---------

con:

- $v$  la velocità del convoglio [m/s] definita dalla caratteristica meccanica (Figura 45 e 46)
- $F_t$  e  $F_f$  le forze di trazione e frenata [N] definite dalla caratteristica meccanica (Figura 45 e 46)
- $\eta$  il rendimento della catena di conversione meccanico-elettrica, in questo caso 0,823

Si ottengono quindi le potenze al pantografo in funzione della velocità. Una volta stabilita la potenza massima al pantografo (sia in trazione che in frenatura), si ricavano le potenze massime secondo i limiti definiti dalla Figura 47.

$$P_{max,pant,t} = P_{pant,t} \% \quad (5.3.6)$$

	$P_{max,pant,f} = P_{pant,f} \%$	(5.3.7)
--	----------------------------------	---------

Ottenuta la potenza massima al pantografo (corrispondente alla potenza sulla linea di contatto), è possibile ricavare a che valore di corrente avviene la limitazione di potenza:

$$I_t = \frac{P_{max,pant,t}}{U_{linea}} \quad (5.3.8)$$

	$I_f = \frac{P_{max,pant,f}}{U_{linea}}$	(5.3.9)
--	--	---------

dove:

- $P_{max,pant,t}$  e  $P_{max,pant,f}$  sono le potenze massime calcolate al pantografo in trazione rispettivamente in frenatura [W]
- $U_{linea}$  sono le tensioni a cui avvengono le limitazioni di potenza [V] secondo Figura 47

L'Allegato 13 riporta i valori ottenuti per quanto riguarda la limitazione di tensione/corrente.

### 5.3.2. Materiale rotabile SSIF

L'esercizio viene svolto da:

- SSIF ABe 4/4 (servizio internazionale)
- SSIF ABe 8/8 (servizio internazionale)

In quanto non è stato possibile ottenere i parametri necessari per modellare il materiale rotabile SSIF, si è assunto che tali veicoli siano simili al materiale rotabile FART attuale (si veda cap. 4.2.3.).

Confrontando i treni futuri con i treni odierni si nota una maggiore differenza di peso compresa tra il 44-47%.

<b>Servizio REG</b>			
	Materiale rotabile FART attuale	Materiale rotabile FART futuro	Differenza [%]
Modello	ABe 4/6	Stadler 3 casse	-
Peso totale [t]	57,4	104	+44,8%
<b>Servizio INT</b>			
Modello	ABe 4/8	Stadler 4 casse	-
Peso totale [t]	72,5	136,5	+46,9%

Tabella 33 Confronto peso materiale rotabile attuale e futuro

Inoltre, i nuovi treni sono caratterizzati da una zona di aderenza maggiore: lo sforzo di trazione costante è garantito per velocità maggiori e questo si traduce in un maggior consumo elettrico.

Nel caso dei veicoli attuali destinati al servizio regionale, la forza di trazione massima è superiore di 15 kN rispetto ai nuovi treni Stadler, mentre per i treni internazionali lo sforzo di trazione massimo è inferiore di 25 kN.

<b>Servizio REG</b>			
	Materiale rotabile FART attuale	Materiale rotabile FART futuro	Differenza [%]
Modello	ABe 4/6	Stadler 3 casse	-
$v_1$ [km/h]	27	32	+16%
$F_{t,max}$ [N]	135000	120000	-11%
<b>Servizio INT</b>			
Modello	ABe 4/8	Stadler 4 casse	-
$v_1$ [km/h]	27	32	+16%
$F_{t,max}$ [N]	135000	160000	+16%

Tabella 34 Confronto caratteristica di trazione materiale rotabile attuale e futuro

Paragonando inoltre le caratteristiche dei treni attuali e futuri si nota che nella zona della potenza gli sforzi di trazione del nuovo materiale rotabile sono maggiori. Questo si traduce in un maggior consumo elettrico complessivo.

Queste considerazioni hanno quindi permesso di modellare il materiale rotabile SSIF con gli stessi parametri dei nuovi treni Stadler a 4 casse senza includere coefficienti maggiorativi e garantendo un calcolo elettrico cautelativo.

L'Allegato 14 riporta i valori relativi al materiale rotabile attuale, così come le relative caratteristiche meccaniche.

## 5.4. Modellazione dell'impianto di corrente di trazione

Per questa fase di modellazione si definiscono cinque sezioni, le quali andranno a caratterizzare il modello dell'impianto TE all'interno del software TrainsRunner:

- circuito positivo
- circuito negativo
- dati cavi
- dati sottostazioni
- schema elettrico unifilare impianto di trazione elettrica

Per ogni punto citato si definiscono le caratteristiche elettriche degli elementi che costituiscono l'impianto di TE. Ogni componente servirà successivamente a definire lo schema unifilare dell'impianto TE. Tutti i calcoli effettuati all'interno di questo capitolo sono stati svolti considerando una temperatura di esercizio pari a 20°C. In questo modo è possibile verificare le impedenze chilometriche ottenute e paragonarle con i valori della letteratura.

Ai fini di verifica si analizzerà lo scenario peggiore, ovvero quando le temperature di esercizio dei conduttori raggiungono i valori massimi ammissibili (80°C secondo EN 50119). Si riporta al piano di simulazione (cap. 7.) per le considerazioni riguardanti la temperatura.

L'Allegato 15 riporta i valori utilizzati all'interno di TrainsRunner.

### 5.4.1. Circuito positivo

La caratterizzazione del circuito positivo richiede la definizione dei conduttori della LC. Per ognuno di essi è necessario stabilire la resistenza chilometrica così come la soglia di corrente ammissibile. Per la costruzione dello schema elettrico, si considera il conduttore LC in parallelo al sistema di sostegno (supporto della catenaria rigida per i primi 2,791 km e fune portante per i successivi chilometri). In questo modo sarà possibile implementare nello schema elettrico un singolo conduttore con impedenza calcolata sui due elementi.

Utilizzando le formule definite nel capitolo 3.4. si calcolano le rispettive resistenze chilometriche:

#### Parallelo elettrico conduttore LC e fune portante

La resistenza elettrica del solo conduttore LC vale:

$$r_{C.LC} = \frac{\rho_{Cu}}{A_{LC} \cdot k_{LC}} = 0,177 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (5.4.1)$$

dove:

- $\rho_{Cu}$  è la resistività del materiale costituente il conduttore LC. Si ipotizza che l'elemento sia rame e non lega di rame. Si assume quindi un valore di  $17,8 \left[ \frac{\Omega \cdot mm^2}{km} \right]$  [6]
- $A$  è la sezione utile del cavo LC, ovvero  $107 \text{ mm}^2$
- $k_{LC}$  è il coefficiente di usura del cavo, pari a  $0,9375$

Al fine di validare il risultato ottenuto, è stata effettuata una ricerca riguardo la resistenza chilometrica garantita da alcuni produttori di conduttori LC.

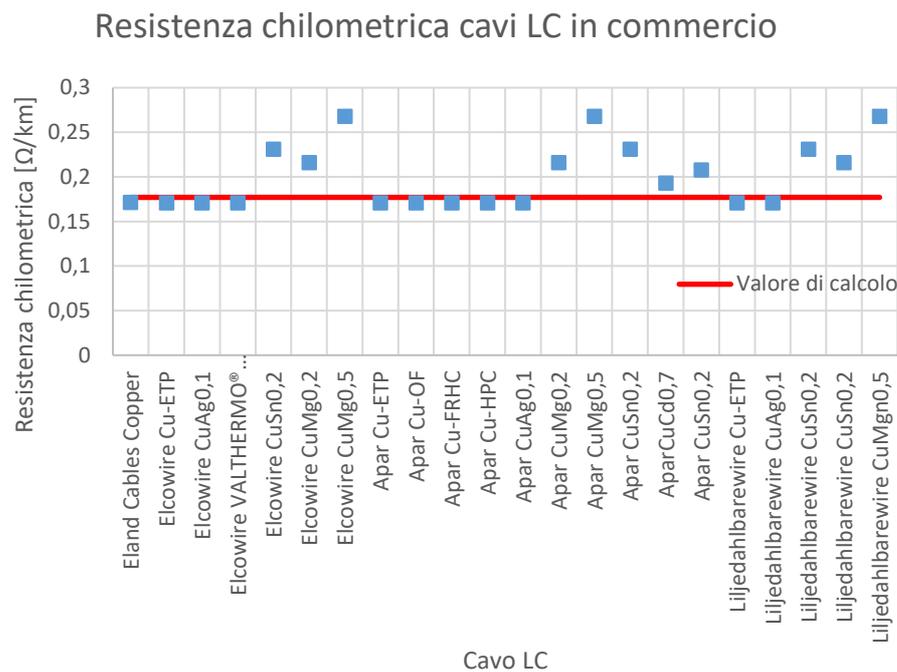


Figura 48 Confronto resistenza chilometrica calcolata e dei conduttori LC presenti in commercio

Dai risultati ottenuti si osserva che il valore calcolato (0,177 Ω/km) è conforme alle resistenze chilometriche dei conduttori LC comunemente presenti in commercio (0,171 Ω/km). Nei risultati si notano anche leghe di rame con resistenze chilometriche più elevate, ma tali prodotti sono impiegati in settori specifici (linee AV/AC, ecc), differenti quindi dalla linea analizzata.

#### **Benchmark resistività rame**

All'interno del valore calcolato si è tenuto conto del fenomeno di usura che aumenta la resistenza chilometrica, il quale spiega il valore più elevato rispetto a quello presente in letteratura. Ripetendo i calcoli senza questo coefficiente si ottiene una resistenza di 0,166 Ω/km, conforme a quello ricavato dalla letteratura. Si può quindi concludere che il materiale ipotizzato riproduce fedelmente quello impiegato dalle amministrazioni ferroviarie.

Questa validazione permette di ipotizzare  $\rho_{Cu}$  pari a  $17,8 \frac{\Omega \cdot mm^2}{km}$  anche per altri tipi di conduttori in rame presenti all'interno dell'impianto di corrente di trazione.

La fune portante è costituita da un cavo di 92 mm<sup>2</sup> in AcCu. Ai fini del calcolo si assume che il materiale sia equamente distribuito sulla sezione.

La resistenza chilometrica vale:

$$r_{fune} = \frac{1}{\frac{\rho_{Cu}}{A} + \frac{\rho_{Ac}}{A}} = 0,352 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (5.4.2)$$

dove:

- $\rho_{Cu}$  e  $\rho_{Ac}$  sono le resistività del materiale costituente la fune portante, ovvero 17,8 rispettivamente  $180 \left[ \frac{\Omega \cdot mm^2}{km} \right]$  [6]
- $A$  è la sezione equivalente definita per ogni materiale, ovvero 46 mm<sup>2</sup>

È ora possibile determinare la resistenza chilometrica costituita dal parallelo elettrico tra conduttore LC e fune portante:

$$r_{LC} = \frac{1}{\frac{1}{R_{C.LC}} + \frac{1}{R_{fune}}} = 0,117 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (5.4.3)$$

### Parallelo elettrico conduttore LC e supporto catenaria rigida

All'interno del datasheet relativo alla catenaria rigida (si veda l'Allegato 5) vengono riportati dati utili al calcolo della resistenza chilometrica dell'intero sistema (supporto, conduttore LC e grasso anticorrosivo). La catenaria rigida può essere schematizzata come un unico conduttore di impedenza pari a quella definita da 1288 mm<sup>2</sup> di rame a 40°C.

In base alle considerazioni fatte nel capitolo 3.4. si ottiene:

$$r_{Cat.rigida} = \frac{\rho_{20^{\circ}C} \cdot [1 + \alpha(T - 20)]}{A \cdot k_{LC}} = 0,016 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (5.4.4)$$

dove:

- $\rho_{20^{\circ}C}$  la resistività del materiale a 20°C (temperatura ambiente) pari a 17,8  $\left[ \frac{\Omega \text{ mm}^2}{km} \right]$
- $\alpha$  è il coefficiente termico del materiale, ovvero 0,00404  $\left[ \frac{1}{^{\circ}C} \right]$
- $T$  è la temperatura specificata all'interno del datasheet, ovvero 40°C
- $A$  è la sezione equivalente specificata all'interno del datasheet, ovvero, 1288 mm<sup>2</sup>
- $k_{LC}$  è il coefficiente di usura del conduttore LC, pari a 0,9375

Il circuito positivo viene quindi descritto nel seguente modo:

Circuito positivo	
Denominazione TrainsRunner	Corrispondente reale
LC	Conduttore LC 107 mm <sup>2</sup> Cu + Fune portante LC 92 mm <sup>2</sup> AcCu
Cat. rigida	Conduttore LC 107 mm <sup>2</sup> Cu + Supporto catenaria rigida Cu

Tabella 35 Legenda circuito positivo

### 5.4.2. Circuito negativo

Si caratterizzano ora i conduttori del circuito di ritorno. Per ognuno di essi è necessario stabilire la resistenza chilometrica, la soglia di corrente ammissibile e la conduttanza verso il terreno. Il circuito negativo della linea è composto dal conduttore di ritorno in rame con sezione pari a 95 mm<sup>2</sup> e dalle rotaie di tipo VST 36 e FFS 1.

In linea, il circuito di ritorno viene realizzato da entrambe le rotaie collegate in parallelo, mentre nei pressi delle stazioni viene utilizzata una singola rotaia per non interferire con il circuito di binario.

Il regolamento D RTE 27900 propone, per le ferrovie alimentate in DC, i seguenti valori (che non tengono conto del coefficiente di usura delle rotaie  $k_B$ ):

	Profilo 46E1 (FFS 1)	Profilo 54E2 (FFS 4)	Profilo 60E2 (FFS 6)
1 rotaia	0,039 Ω/km	0,034 Ω/km	0,030 Ω/km
2 rotaie	0,019 Ω/km	0,017 Ω/km	0,015 Ω/km

Tabella 36 Impedenze per differenti tipologie di rotaie secondo regolamento D RTE 27900

Per calcolare l'impedenza delle rotaie VST 36 si inverte la formula 3.4.26 in modo da ottenere la resistività del materiale:

$$\rho_{Ac} = r_{FFS1} \cdot A_{FFS1} = 229,32 \left[ \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{km}} \right] \quad (5.4.5)$$

con:

- $r_{FFS1}$  l'impedenza chilometrica di una rotaia profilo FFS 1 definita dal regolamento D RTE 27900
- $A_{FFS1}$  è la sezione della rotaia, pari 5880 mm<sup>2</sup> (cfr. D RTE 22054)

È ora possibile determinare le impedenze per le due tipologie di binari che compongono il circuito negativo considerando anche l'usura:

$$r_{VST\ 36} = \frac{\rho_{Ac}}{2 \cdot A_{VST36} \cdot k_B} = 0,028 \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (5.4.6)$$

$$r_{FFS\ 1} = \frac{\rho_{Ac}}{A_{FFS1} \cdot k_B} = 0,043 \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (5.4.7)$$

dove:

- $\rho_{Ac}$  è la resistività del materiale costituente le rotaie. Nel nostro caso le rotaie sono costituite da acciaio di resistività pari a 229,32  $\left[ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}} \right]$
- $A$  è la sezione delle rotaie, pari a 4551 mm<sup>2</sup> per il tipo VST 36 (cfr. D RTE 22054) e 5880 mm<sup>2</sup> per il modello FFS 1 (cfr. D RTE 22054)
- $k_B$  è il coefficiente di usura della rotaia, pari a 0,9

Nella definizione del circuito negativo è necessario esprimere anche la conducibilità dei binari verso il terreno. Questo valore non è ricavabile analiticamente ma viene misurato in loco in quanto dipende da più fattori (caratteristiche geologiche del terreno, ambiente, temperatura, umidità, ecc). La normativa EN 50122-1 attualmente in vigore non prevede dei valori di riferimento per quanto riguarda la conduttanza. Per questo motivo si fa riferimento alla vecchia versione BS EN 50122-1 (1997), la quale prevede una conduttanza di 2,175 S/km per un binario con traverse in legno o acciaio.

### 5.4.3. Cavi

In questa sezione vengono definite le caratteristiche elettriche dei conduttori secondari che definiscono l'impianto di corrente di trazione. Per ognuno di essi è necessario stabilire la resistenza chilometrica così come la soglia di corrente ammissibile. Anche in questo caso vengono considerati gli elementi previsti dal progetto di rinnovo della linea di contatto. Per quanto riguarda conduttori isolati, la conduttanza verso terra non viene considerata. Si ipotizza quindi che l'isolazione del cavo non consenta trasmissioni verso l'infrastruttura oppure verso il terreno. I conduttori vengono denominati secondo la loro funzione, la sezione utile e il materiale. Viene inoltre usata una denominazione abbreviata a scopo semplificativo:

Cavi	
Denominazione TrainsRunner	Corrispondente reale
Feeder 2x 95 Cu	Feeder 2x 95 mmq Cu
Feeder 240 Cu	Feeder 240 mmq Cu
C. RL 95 Cu	Conduttore circuito di ritorno 95 mmq Cu
C. Feeder-LC 120 Cu	Collegamento feeder-LC 120 mmq Cu
C. trasv 95 Cu	Collegamento trasversale 95 mmq Cu
C. SSE-DS 2x300 Cu	Collegamento SSE-distribuzione 2x300 mmq Cu
C. DS-LC 2x150 Cu	Collegamento distribuzione-LC 2x1300 mmq Cu
C.RL-BC 2x150 Cu	Collegamento RL-barra colletttrice 2x 150 mmq Cu
C. BC-SSE 4x150 Cu	Collegamento barra colletttrice-SSE 4x 150 mmq Cu
C. RL-BC 2x240 Cu	Collegamento RL-barra colletttrice 2x 240 mmq Cu
C. BC-SSE 2x300 Cu	Collegamento barra colletttrice-SSE 2x 300 mmq Cu

Tabella 37 Legenda cavi

Per le formule utilizzate al fine di ricavare i valori di resistenza chilometrica si rimanda al capitolo 3.4.2. La validazione dei valori ottenuti può essere eseguita mediante il risultato conseguito per il conduttore LC in quanto si assume lo stesso materiale (Cu). Si è quindi utilizzato lo stesso valore di resistività. Un'ulteriore verifica è stata fatta grazie alla resistenza del conduttore di ritorno. Il valore calcolato è di 0,187  $\Omega$ /km a fronte di una resistenza pari a 0,184  $\Omega$ /km indicata nel regolamento D RTE 27900. Quest'analogia conferma nuovamente la veridicità delle proprietà del materiale utilizzato nei calcoli.

#### 5.4.4. Sottostazioni elettriche (SSE)

Si determinano ora i dati necessari a modellare le tre SSE. Le SSE di Ponte Brolla ed Intragna hanno caratteristiche elettriche identiche. La SSE di Verdasio è caratterizzata da proprietà simili ma differenti. Il software richiede come dati di input i seguenti valori:

- rendimento della SSE
- perdite a vuoto
- corrente nominale
- corrente di sovraccarico
- corrente massima
- tensione nominale

### SSE Ponte Brolla

Grazie ai dati di targa dei raddrizzatori e dei trasformatori impiegati presso SSE FART (si veda l'Allegato 3) è possibile determinare tutti i parametri necessari.

I dati di input per caratterizzare la SSE sono:

Grandezza	Valore
<b>Trasformatore</b>	
Potenza nominale [VA]	1870000
Tensione nominale primario (p) [V]	16000
Tensione nominale secondario (s1, s2) [V]	1057
Vcc p-s [%]	8
Perdite in cortocircuito [W]	2000
<b>Raddrizzatore</b>	
Potenza nominale [W]	1688000
Tensione nominale [V]	1350
Corrente nominale [A]	1250
Prima Soglia corrente [A]	1875
Seconda Soglia corrente [A]	2500
<b>Perdite</b>	
Rendimento [p.u.]	0,95
Perdite a vuoto [W]	1000
<b>Caratteristiche uscita</b>	
Percentuale di tensione al secondario [%]	100
Resistenza di sbarramento [ $\Omega$ ]	4000

Tabella 38 Caratteristiche elettriche SSE Ponte Brolla

In base a questi valori, viene determinata la caratteristica tensione corrente della SSE:

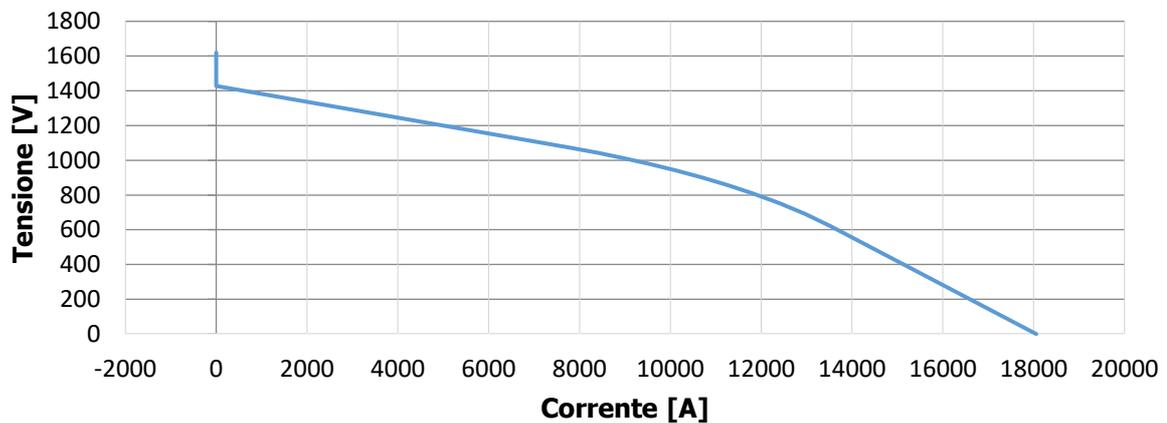


Figura 49 Caratteristica tensione-corrente SSE Ponte Brolla

### SSE Intragna

Questa SSE è composta dagli stessi elementi della sottostazione di Ponte Brolla (si veda l'Allegato 3 per i rispettivi dati di targa).

### SSE Verdasio

Si ripete lo stesso procedimento eseguito in precedenza (si veda l'Allegato 3 per i rispettivi dati di targa). Il trasformatore della SSE è meno recente, mentre il raddrizzatore è identico a quello delle altre SSE.

Si ottiene quindi:

Grandezza	Valore
<b>Trasformatore</b>	
Potenza nominale [VA]	1924000
Tensione nominale primario (p) [V]	16000
Tensione nominale secondario (s1, s2) [V]	1088
Vcc p-s [%]	7,19
Perdite in cortocircuito [W]	2000
<b>Raddrizzatore</b>	
Potenza nominale [W]	1688000
Tensione nominale [V]	1350
Corrente nominale [A]	1250
Prima Soglia corrente [A]	1875
Seconda Soglia corrente [A]	3750
<b>Perdite</b>	
Rendimento [p.u.]	0,95
Perdite a vuoto [W]	1000
<b>Caratteristiche uscita</b>	
Percentuale di tensione al secondario [%]	100
Resistenza di sbarramento [ $\Omega$ ]	4000

Tabella 39 Caratteristiche elettriche SSE Verdasio

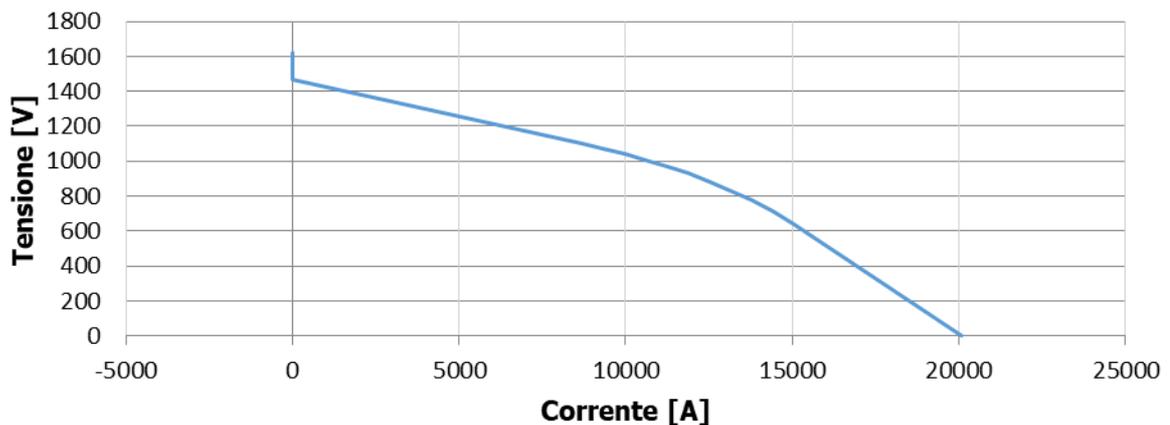


Figura 50 Caratteristica tensione-corrente SSE Verdasio

### 5.4.5. Schema elettrico unifilare impianto TE

Definiti tutti gli elementi dell'impianto TE, è possibile modellare lo schema elettrico dell'impianto di corrente di trazione.

Tale schema viene riportato nell'Allegato 17.

#### Circuito positivo

La linea di contatto (in rosso) viene ricreata utilizzando l'elemento Cat. Rigida fino alla progressiva chilometrica 2,791 e l'elemento LC per il resto della tratta. L'alimentazione della LC (in blu) viene modellata tramite l'elemento Feeder 2x95 mm<sup>2</sup> Cu, posto in parallelo rispetto alla LC. Il parallelo elettrico tra i due elementi è realizzato dai connettori Feeder-LC 120 mm<sup>2</sup> Cu disposti ogni ~250 m (linea tratteggiata in nero) di lunghezza pari a 2,5 m.

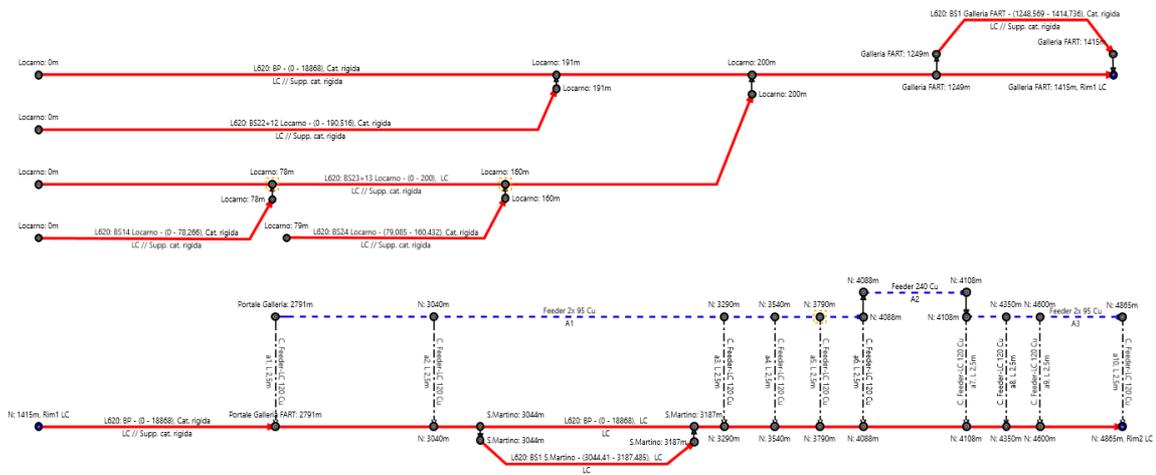


Figura 51 Esempio circuito positivo modellato in TrainsRunner

Il polo negativo (Sbarra -) della SSE viene collegato al polo positivo (Sbarra +) attraverso il raddrizzatore. Successivamente, seguendo il circuito, si ritrova l'interruttore extrarapido (IER) e l'interruttore principale (I10) della sottocentrale. La SSE viene poi collegata agli interruttori secondari (I1, I2 e I3).

Il posto interruttori, se presente, viene realizzato da un nodo elettrico comune. Questo elemento rappresenta la barra comune di alimentazione, a cui sono collegati tutti e tre gli interruttori secondari. In entrata a tale nodo troviamo il cablaggio che unisce il posto interruttori alla SSE. In uscita vengono invece posti i 3 interruttori secondari collegati alla barra comune. Ogni interruttore è infine collegato alla LC con il rispettivo cavo di lunghezza e proprietà specifiche.

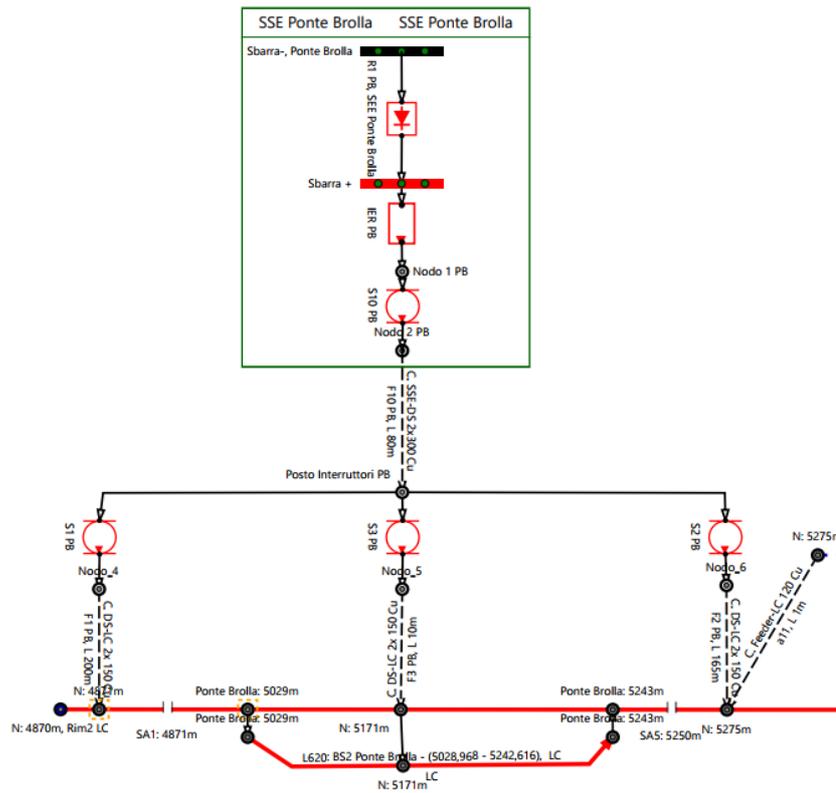


Figura 52 SSE Ponte Brolla modellata sul circuito positivo in TrainsRunner

Come descritto nel cap 4.3.2., il sezionamento della LC avviene sia tramite il parallelo dei conduttori appartenenti a sezioni differenti ma anche attraverso sezionatori meccanici. Per modellare la LC vengono quindi utilizzati dei sezionatori ad aria collocati alla progressiva definita dallo schema elettrico della linea (vedere l'Allegato 1). In questo modo è possibile rappresentare la situazione reale di sezionamento della linea.

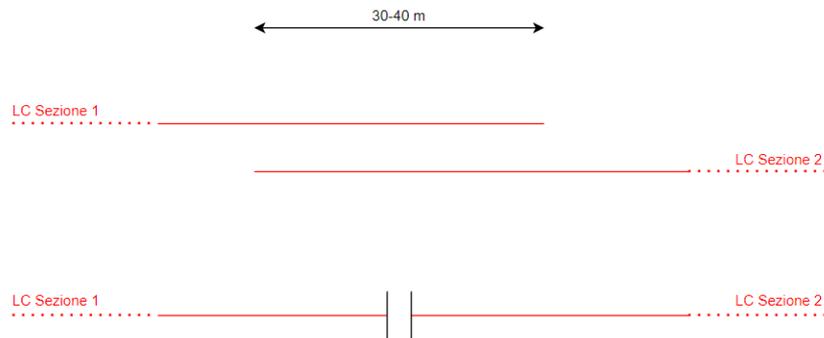


Figura 53 Sezionamento reale effettuato tramite il parallelo dei conduttori LC (sopra) e sezionamento modellato in TrainsRunner (sotto)

Per facilitare la costruzione dello schema elettrico, si è suddivisa la LC in più livelli. Il collegamento tra i differenti livelli viene effettuato tramite i rimandi predisposti da TrainsRunner.

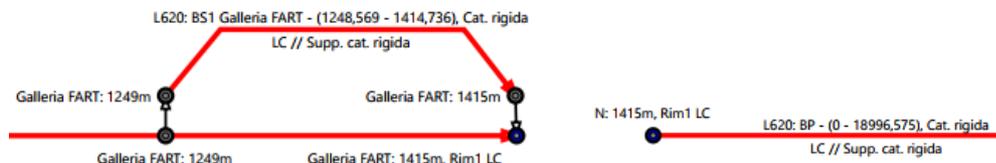


Figura 54 Esempio di rimando per collegare livelli differenti

### Circuito negativo

Il circuito di ritorno è costituito dalle rotaie (in nero) e il conduttore RL (in blu). Il collegamento in parallelo tra i due elementi viene effettuato attraverso il cavo C.trasv 95 Cu posto ogni ~250-300m (linea nera tratteggiata). Per la lunghezza di questo conduttore si è ipotizzato 7 m, ovvero 5 m lungo il palo della linea e 2 m sotto la massicciata fino ad arrivare alle rotaie.

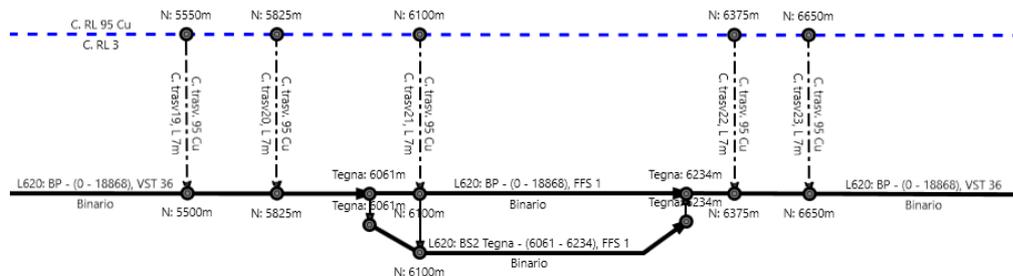


Figura 55 Esempio di circuito negativo modellato in TrainsRunner

La SSE è costituita da una singola sbarra negativa, la quale viene collegata mediante un rimando al rispettivo polo definito nella parte positiva del circuito (si veda paragrafo precedente). La barra colletttrice posta nei pressi della SSE viene rappresentata dal nodo BC. In questo punto convergono il circuito di ritorno delle rotaie e del conduttore RL. Questo tipo di collegamento viene effettuato per le sezioni a valle e a monte della SSE.

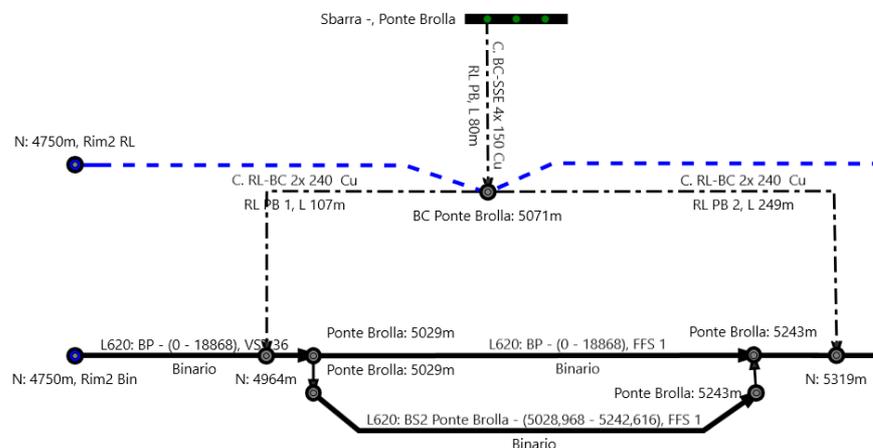


Figura 56 SSE Ponte Brolla modellata sul circuito negativo in TrainsRunner

La struttura del circuito negativo viene schematizzata su più livelli analogamente al circuito positivo. Anche in questo caso vengono utilizzati i rimandi per connettere livelli differenti.

### 5.4.6. Modellazione dei cortocircuiti

TrainsRunner permette di simulare anche scenari di cortocircuito, il quale viene modellato come un generatore di tensione ed una resistenza elettrica disposti in serie.

Attraverso la resistenza si può modellare l'impedenza dell'arco di cortocircuito, ovvero la resistenza dell'oggetto che permette il contatto tra LC e binario. La tensione definisce invece la tensione d'arco del cortocircuito.

In accordo con Setteldea, vengono utilizzati i seguenti valori per simulare il cortocircuito e poter analizzare il comportamento degli extrarapidi:

	Tensione [V]	Resistenza [ $\Omega$ ]
Caratteristiche cortocircuito	200	0

Tabella 40 Valori tipici per modellare un cortocircuito

Per valutare la taratura degli extrarapidi verranno analizzate le correnti minime di cortocircuito. A tal fine viene ricreata una condizione di cortocircuito ogni 100 m lungo la linea: all'aumentare della distanza dall'extrarapido dal cortocircuito, la corrente rilevata diminuisce, ma l'interruttore deve comunque essere in grado di rilevare il cortocircuito e mettere in sicurezza la SSE.

### 5.4.7. Finestre di osservazione

Il software TrainsRunner permette di impostare delle finestre di osservazione in modo da stabilire il valore efficace (media quadratica o RMS) della corrente durante questi intervalli.

A causa della variabilità dei carichi, il sovraccarico sul raddrizzatore non è costante nel tempo. Il valore efficace permette quindi di determinare la media quadratica della corrente calcolata sul periodo impostato e confrontarla con le sovracorrenti ammesse dai raddrizzatori.

Verranno quindi impostati intervalli di 60 s e 7200 s per verificare il corretto esercizio di tali elementi.

## 6. Validazione del modello

Prima di procedere con la simulazione e l'analisi dei differenti scenari di esercizio, è necessario validare il modello creato. A questo scopo viene simulato l'esercizio ferroviario attuale; i risultati ottenuti dovranno essere attendibili e rispecchiare quindi la situazione corrente.

Il modello utilizzato per la validazione considera una temperatura dei conduttori e dei binari pari a 45°C (inferiori alla temperatura massima secondo EN 50119). La linea raggiunge i 500 m di altitudine e percorre, per la maggior parte, zone boschive. Di conseguenza è molto improbabile che i conduttori, così come le rotaie, possano raggiungere (anche in estate) una temperatura massima di esercizio di 80°C come nel caso peggiore definito dalle normative.

L'orario simulato comprende gli stessi servizi esposti nel capitolo 4.2.2. Non è quindi presente il nuovo servizio a cadenza semi-oraria Locarno-Ponte Brolla-Intragna.

Ai fini del progetto, il materiale rotabile attuale è stato simulato con le stesse caratteristiche dei nuovi treni Stadler, in quanto non è stato possibile ottenere tutti i parametri necessari ad una corretta modellazione. I nuovi treni, più pesanti di quelli attuali, garantiscono però un approccio conservativo a livello di consumi.

Vengono inoltre utilizzati i coefficienti di usura (per conduttore LC e rotaie) descritti nel capitolo 3.4.2. L'alimentazione dell'impianto TE viene modellata con le tre SSE disposte in parallelo analogamente a quanto avviene oggi.

Nome File	Codice	Nome	Considerazioni
Caso0	Sim0	Validazione del modello	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concetto orario attuale</li> <li>• Materiale rotabile futuro, consumo sistemi ausiliari massimo</li> <li>• Condizioni infrastruttura degradate (45°C + usura LC e binario)</li> <li>• SSE in parallelo</li> </ul>

Tabella 41 Rappresentazione dello scenario attuale utilizzato per la validazione del modello

Di seguito vengono riportate le cadute di tensione ottenute simulando il modello appena descritto.



Figura 57 Tensioni linea in funzione della progressiva

Come si può osservare dal grafico in Figura 57, la tensione minima viene garantita sulla maggior parte della tratta. Nei pressi della stazione di Camedo (km. 18,3), il valore minimo misurato raggiunge gli 850 V. Questa tensione non permette quindi di garantire l'esercizio secondo gli standard definiti dalla normativa EN 50163, il cui limite consentito è posto a 900V.

Bisogna però considerare che il materiale rotabile modellato è riferito ai nuovi treni Stadler, più pesanti e con consumi maggiori rispetto ai treni attuali. Di conseguenza, potendo modellare correttamente tali veicoli, si osserverebbe certamente una tensione minima superiore.

La Figura 58 riporta l'andamento della tensione lungo la linea. Le tratte alimentate a sbalzo (Locarno-Ponte Brolla e Verdasio-Ribellasca) raffigurano un andamento lineare, mentre per le tratte alimentate bilateralmente (Ponte Brolla-Intragna e Intragna-Verdasio) la tensione segue un profilo quadratico. Ciò è riconducibile ai profili definiti dalle cadute di tensione trattati nel capitolo 3.4.2.



Figura 58 Andamento delle cadute di tensione lungo la linea (in fucsia)

Per quanto riguarda le sovratensioni, la EN 50163 indica che le tensioni massime durante il normale esercizio non devono superare il valore  $U_{max,2}$  di 1755 V. Le limitazioni imposte sulla frenata rigenerativa del materiale rotabile (cap. 5.3.1.) permettono quindi di rientrare nel range di operabilità per quanto riguarda le sovratensioni.

Il valore massimo assoluto misurato sulla linea è di 1626 V, cioè 6 V superiore al limite  $U_{max,1}$  imposto dalla normativa. Questi valori sono ammessi, ma per una durata non superiore ai 5 minuti.

La Figura 59 riporta la distribuzione percentuale delle tensioni sulla linea. La curva mostra che i valori superiori a 1620 V sono rari (0,14%) e per questo motivo si può dedurre che non vi sia un superamento costante frequente (oltre i 5 minuti) della tensione massima ammissibile  $U_{max,1}$ .



Figura 59 Distribuzione delle tensioni lungo la linea

Come riportato dalla Tabella 42 i carichi sui raddrizzatori non superano in nessun caso i valori di sovraccarico ammissibili riportati sui dati di targa. Questo significa che ogni raddrizzatore opera entro i limiti di sicurezza stabiliti dal produttore.

Carichi raddrizzatori SSE in parallelo						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1021	2500	485	1875	2468	2500
SSE Intragna	838	2500	311	1875	1914	2500
SSE Verdasio	858	3750	432	1875	2038	3750

Tabella 42 Confronto carichi sui raddrizzatori e sovraccarichi ammissibili

La Figura 60 mostra il massimo potenziale delle rotaie espresso in valore assoluto. Bisogna ricordare che i valori raffigurati non sono valori costanti (non valgono quindi per tutta la durata dell'esercizio ferroviario, ma solo per brevi istanti di tempo e per questo motivo si registrano un valore massimo e minimo per ogni punto della linea). I risultati riportano una tensione massima di 105 V, inferiore al limite di 120 V consentito dalla norma EN-50122-1.

Sugli estremi delle tratte alimentate a sbalzo (0 e 18,9 km) si osserva un potenziale elevato. Come descritto nel cap. 3.5.5., in questi punti la resistenza delle rotaie è massima a causa della distanza maggiore dalla SSE; di conseguenza anche la tensione risulta essere superiore. Nei pressi delle SSE, invece, ritroviamo i valori minimi (riportati sempre in valore assoluto).

L'andamento lineare sulle sezioni alimentate a sbalzo è riconducibile all'impedenza chilometrica: all'aumentare della distanza dalla SSE aumenta anche l'impedenza delle rotaie. Sulle tratte alimentate bilateralmente, invece, la corrente di ritorno può fluire verso entrambe le sottostazioni, riducendo quindi la lunghezza del circuito di ritorno e quindi anche il potenziale di binario.



Figura 60 Potenziale di rotaia in funzione della progressiva

Oggi FART SA garantisce l'esercizio ferroviario entro il range di operabilità definiti dalle normative e i raddrizzatori delle SSE non superano i carichi ammissibili. I risultati ottenuti da TrainsRunner rispecchiano tale situazione: per questo motivo il modello può essere considerato valido e può venire utilizzato per simulare il futuro esercizio in modo attendibile.

## 7. Piano di simulazione

Per tutti gli scenari viene rappresentata la situazione peggiore dal punto di vista delle cadute di tensione: viene considerato il massimo assorbimento da parte degli ausiliari così come le temperature massime di esercizio.

La temperatura delle rotaie viene imposta a 80°C, come pure quella dei conduttori (secondo norma EN 50119). Si trascura l'aumento della temperatura della LC causato dallo strisciamento del pantografo. La linea di contatto non è continuamente sollecitata dal passaggio del materiale rotabile e per questo motivo non permane uno stato continuo di surriscaldamento.

Inoltre, si tiene conto dell'usura del conduttore LC e delle rotaie, altro fattore che determina un aumento delle cadute di tensione (si veda cap. 3.4.2.)

Un altro aspetto importante da analizzare è il tipo di configurazione utilizzato per alimentare l'impianto TE. In caso di una SSE fuori esercizio, l'apporto di energia verrebbe garantito soltanto dalle altre due SSE rimanenti. La lunghezza delle sezioni da alimentare aumenta, causando così un incremento delle cadute di tensione. A questo scopo verranno simulati altri scenari basandosi sul modello appena creato:

- SSE Ponte Brolla fuori servizio
- SSE Intragna fuori servizio
- SSE Verdasio fuori servizio

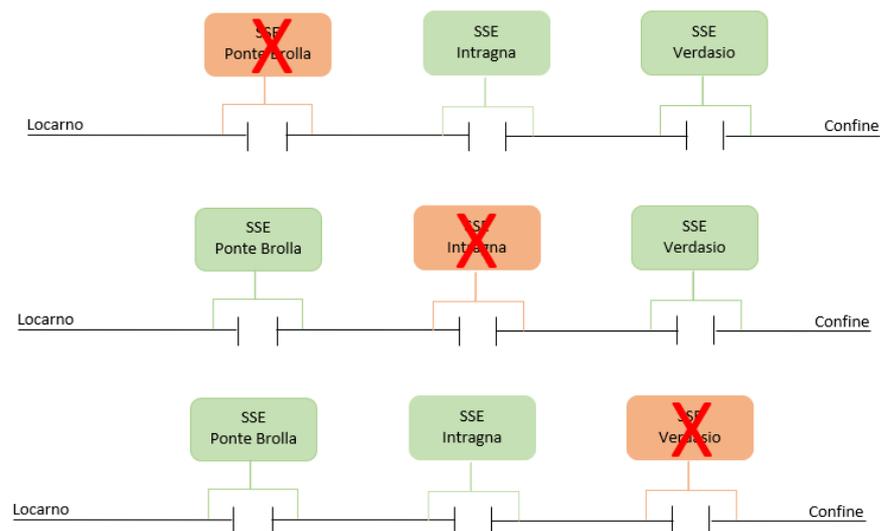


Figura 61 Raffigurazione degli scenari con una SSE fuori esercizio

Attualmente l'alimentazione della LC avviene grazie alle tre SSE in parallelo elettrico. In accordo con FART SA, verrà inoltre simulato lo scenario in cui le singole SSE non alimenteranno la linea in parallelo, bensì ogni sottocentrale approvvigiona a sbalzo una sezione indipendente:

- SSE Ponte Brolla: alimenta da Ponte Brolla a Locarno
- SSE Intragna: alimenta da Intragna a Ponte Brolla
- SSE Verdasio: alimenta da Verdasio a Intragna e da Verdasio al confine

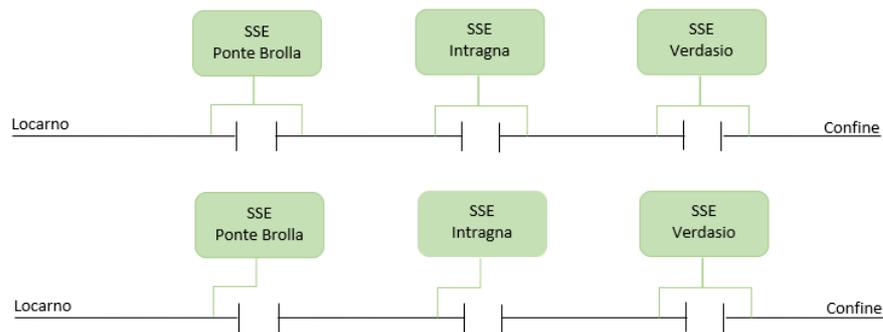


Figura 62 Alimentazione con SSE in parallelo (in alto) e alimentazione indipendente (in basso)

Si riporta di seguito il piano di simulazione per rappresentare differenti scenari di esercizio:

Nome File	Codice	Nome	Considerazioni
Caso0	Sim0	Validazione del modello	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concetto orario attuale</li> <li>• Materiale rotabile futuro, consumo sistemi ausiliari massimo</li> <li>• Condizioni infrastruttura degradate (45°C + usura LC e binario)</li> <li>• SSE in parallelo</li> </ul>
CasoA	Sim1	Nuovo concetto di produzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condizioni infrastruttura degradate (80°C + usura LC e binario)</li> <li>• Consumo sistemi ausiliari massimo</li> <li>• SSE in parallelo</li> </ul>
CasoA SSEPonte BrollaOUT	Sim2	Esercizio futuro in regime degradato: SSE Ponte Brolla fuori esercizio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condizioni infrastruttura degradate (80°C + usura LC e binario)</li> <li>• Consumo sistemi ausiliari massimo</li> <li>• 1/3 SSE fuori esercizio (non contemporaneo)</li> </ul>
CasoA SSEIntragna OUT	Sim3	Esercizio futuro in regime degradato: SSE Intragna fuori esercizio	
CasoA SSEVerdasio OUT	Sim4	Esercizio futuro in regime degradato: SSE Verdasio fuori esercizio	
CasoA SSEIsolate	Sim5	Esercizio futuro con SSE isolate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condizioni infrastruttura degradate (80°C + usura LC e binario)</li> <li>• Consumo sistemi ausiliari massimo</li> <li>• SSE isolate</li> </ul>

Figura 63 Piano di simulazione

## 8. Analisi dei risultati

### 8.1. Cadute di tensione

I valori esposti nella Tabella 43 mostrano che i limiti di operabilità vengono garantiti lungo la maggior parte della linea, indipendentemente dallo scenario proposto. Si nota però un problema presso la fermata di Camedo, dove il limite inferiore di 900 V non viene garantito.

Come si può osservare dai valori ottenuti per quanto riguarda l'alimentazione della LC tramite il parallelo delle SSE, le cadute di tensione sulla sezione Verdasio-Confine sono tali da raggiungere una tensione minima di 799 V. La stazione di Camedo si trova sull'estremità alimentata a sbalzo da SSE Verdasio e di conseguenza la resistenza chilometrica della LC e del circuito di ritorno sono elevate. Inoltre, secondo il concetto orario previsto, presso questa fermata avviene l'incrocio dei treni internazionali e dei treni di supporto BIS, mentre un convoglio regionale effettua una sosta prima di poter riprendere il servizio.

L'orario di partenza del treno internazionale e del treno di supporto si svolge con solo tre minuti di differenza e di conseguenza la LC deve approvvigionare due convogli in fase di accelerazione, ovvero dove l'assorbimento di corrente è massimo. Nello stesso intervallo di tempo i sistemi ausiliari del treno regionale richiedono un assorbimento di corrente minore ma costante.

La combinazione di questi fattori genera quindi delle cadute di tensione elevate in questo particolare punto della linea.

Per quanto riguarda gli scenari che simulano una SSE fuori esercizio, si osserva che l'approvvigionamento della linea può avvenire correttamente solo nel caso in cui SSE Ponte Brolla e Verdasio rimangano attive. Questo risultato è riconducibile alla disposizione delle tre SSE lungo la tratta. La linea analizzata è lunga complessivamente 18,868 km, mentre le SSE di Ponte Brolla, Intragna e Verdasio sono ubicate rispettivamente a 5,2, 9,9 e 14,8 km. Nel caso di manutenzione alla SSE centrale, le due sottocentrali rimanenti permetterebbero di garantire l'esercizio entro i limiti di operabilità. Al contrario invece, se la SSE di Ponte Brolla oppure di Verdasio dovesse essere indisponibile, non sarebbe possibile garantire una tensione sufficiente, soprattutto sulle sezioni approvvigionate a sbalzo (Locarno-Ponte Brolla rispettivamente Verdasio-Confine). A causa delle cadute di tensione troppo elevate, il software riporta un errore di convergenza. In caso di manutenzione della SSE di Verdasio la linea potrebbe essere alimentata dall'amministrazione ferroviaria italiana, previo accordo tra le due società. Presso il confine è predisposto un doppio interruttore (ognuno gestito dalla rispettiva amministrazione) finalizzato a questo scopo.

Lo scenario della SSE Intragna fuori esercizio permette sì di garantire la tensione minima su maggior parte della linea ma presso Camedo permane il problema di cadute di tensione troppo elevate (tensione minima registrata: 791 V).

Nel caso in cui si decidesse di alimentare ogni sezione di linea indipendentemente, si supererebbe la tensione minima consentita presso Camedo ma anche in prossimità della fermata di Ponte Brolla. Secondo questo schema di approvvigionamento, tutte le sezioni sono a sbalzo e di conseguenza presso l'estremità non alimentata si verificano le cadute di tensione maggiori. Si può infatti osservare il comportamento lineare dovuto a questo tipo di alimentazione su ogni sezione della tratta: le cadute di tensione aumentano linearmente con la distanza dalla SSE.



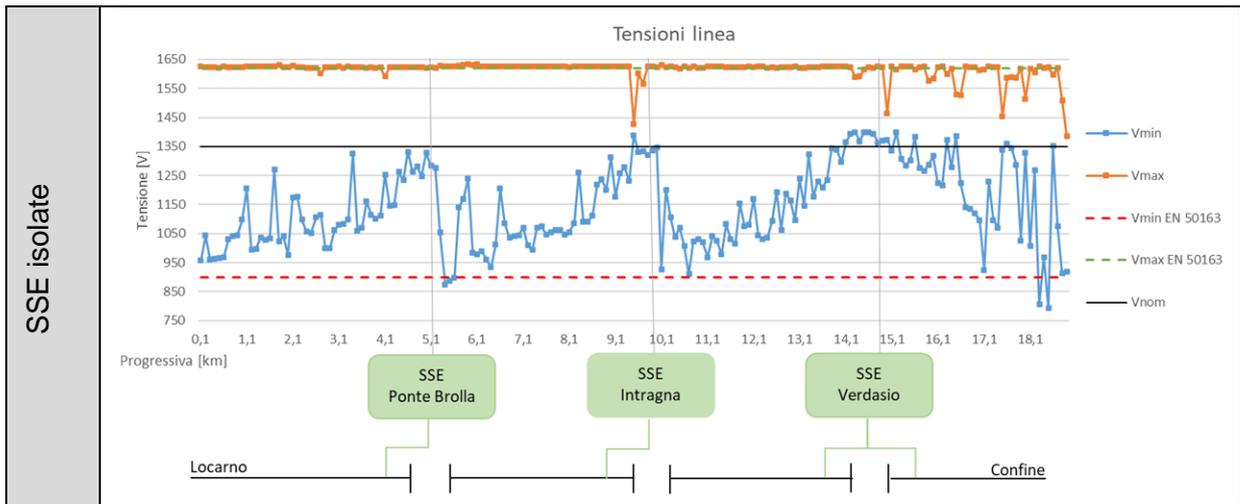


Tabella 43 Tensioni in linea per differenti scenari di esercizio

## 8.2. Carichi sui raddrizzatori

Per verificare i raddrizzatori sono state considerate le correnti di picco così come le correnti ammissibili durante 1 minuto e 2 ore di esercizio. Per quanto riguarda le correnti di picco, i dati di targa non riportano nessun valore. Per questo motivo il massimo assoluto ottenuto dalle simulazioni viene confrontato con la corrente massima ammissibile su 1 minuto definita nei dati di targa del componente. Le correnti massime valutate su 1 minuto e 2 ore di esercizio vengono invece confrontate con i rispettivi valori ammissibili definiti dalla targa del raddrizzatore.

I risultati nella Tabella 44 mostrano che le correnti rientrano nei parametri definiti dal costruttore. Unica eccezione viene fatta per la corrente di picco della SSE di Ponte Brolla. Come si può osservare dai valori ottenuti, la corrente di picco supera, nel caso peggiore, di 216 A il valore ammissibile. Ciò avviene nello scenario in cui la SSE Intragna sia fuori esercizio; la SSE di Ponte Brolla si ritroverebbe ad approvvigionare da sola la tratta più trafficata e quindi quella con gli assorbimenti maggiori.

Carichi raddrizzatori - SSE in parallelo						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1123	2500	582	1875	2524	2500
SSE Intragna	874	2500	348	1875	1977	2500
SSE Verdasio	878	3750	438	1875	2054	3750
Carichi raddrizzatori - SSE Intragna fuori esercizio						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1505	2500	728	1875	2716	2500
SSE Intragna	0	2500	0	1875	0	2500
SSE Verdasio	1006	3750	585	1875	2233	3750
Carichi raddrizzatori - SSE isolate						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1049	2500	552	1875	2553	2500
SSE Intragna	1086	2500	527	1875	2044	2500
SSE Verdasio	1361	3750	599	1875	2325	3750

Tabella 44 Carichi sui raddrizzatori per differenti scenari di esercizio

### 8.3. Taratura extrarapidi

La Tabella 45 mostra il confronto tra le correnti minime di corto circuito misurate dagli interruttori extrarapidi e i carichi massimi rilevati durante il normale funzionamento.

Taratura extrarapidi - SSE in parallelo		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Ponte Brolla	1121	2524
IER Intragna	1595	1977
IER Verdasio	1255	2054

Taratura extrarapidi - SSE Intragna fuori esercizio		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Ponte Brolla	1121	2716
IER Intragna	1595	0
IER Verdasio	1255	2233

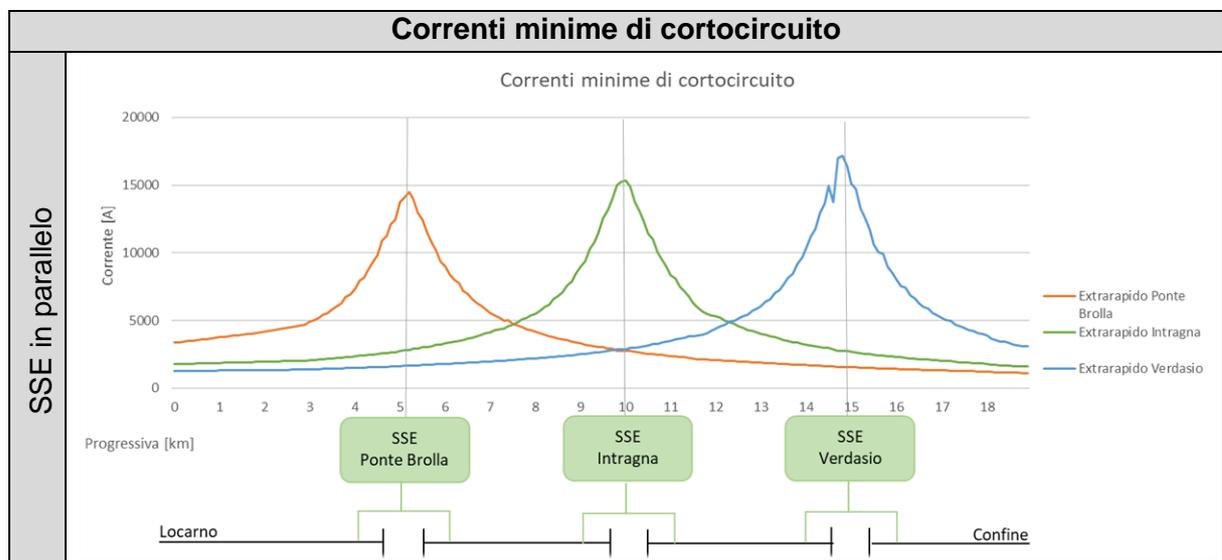
Taratura extrarapidi - SSE isolate		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Ponte Brolla	3373	2553
IER Intragna	2908	2044
IER Verdasio	2972	2325

Tabella 45 Taratura degli interruttori extrarapidi

Come si può osservare, nella configurazione in parallelo le correnti minime di cortocircuito sono inferiori ai carichi di punta sugli interruttori extrarapidi. Ciò significa che il valore di taratura deve essere superiore ai carichi di punta onde evitare che l'apertura del dispositivo in seguito ad un picco di assorbimento di corrente della LC. I valori di taratura proposti sono di 2750 A per IER Ponte Brolla, 2000 A per IER Intragna e 2250 A per IER Verdasio.

Osservando invece i risultati ottenuti per lo scenario SSE isolate, ovvero in cui le SSE alimentano indipendentemente una sola sezione della LC, si nota che la corrente minima di cortocircuito misurata dagli extrarapidi assume valori più elevati. In base a questa configurazione la lunghezza delle sezioni su cui operano gli interruttori diminuisce, così come l'impedenza chilometrica. Il rischio di confondere un picco di assorbimento per un cortocircuito non è più presente, in quanto il valore di taratura è superiore ai picchi di corrente rilevati dall'extrarapido durante il normale esercizio. In questo caso i valori di taratura sono di 3300 A per IER Ponte Brolla, 2900 A per IER Intragna e Verdasio.

La Tabella 46 mostra il confronto delle correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori per i due schemi di alimentazione della LC.



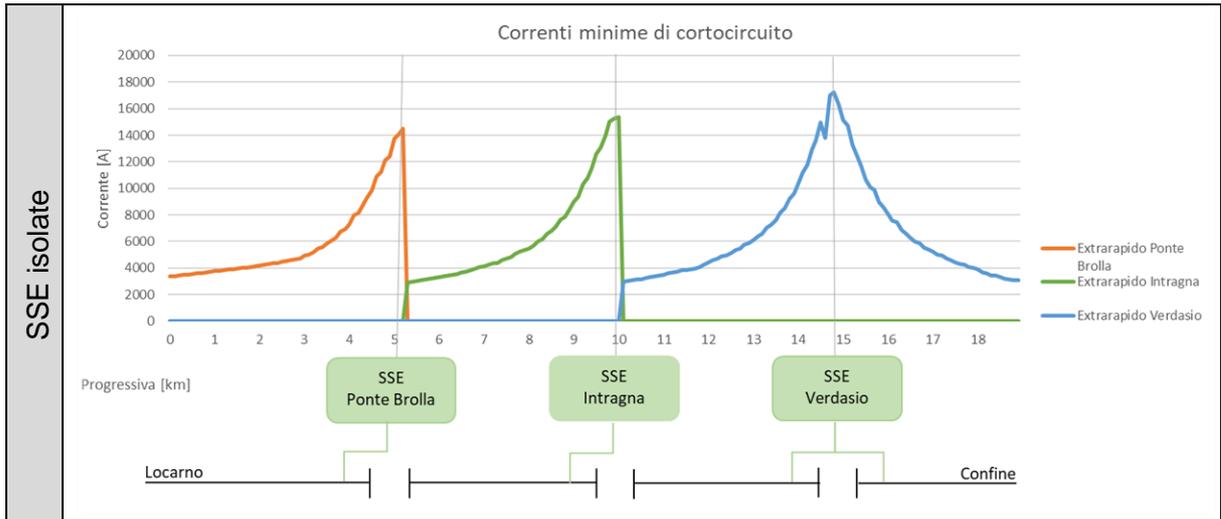


Tabella 46 Correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori extrarapidi

### 8.4. Potenziale delle rotaie

Come si osserva dai risultati riportati nella Figura 64, il potenziale delle rotaie non supera in nessuno scenario il valore limite di 120 V definito dalle normative.

Anche in questo caso si può osservare l'andamento lineare dovuto all'impedenza chilometrica delle rotaie: il potenziale aumenta linearmente in funzione della distanza dal polo negativo della SSE per quanto riguarda le sezioni alimentate a sbalzo.

In caso di guasto alla SSE di Intragna si nota che la tensione aumenta, in quanto la corrente di ritorno deve percorrere più chilometri per fluire verso una delle due SSE operative (Ponte Brolla e Verdasio).



Figura 64 Potenziale massimo binario per differenti scenari di esercizio

## 9. Criticità e misure di ottimizzazione

I risultati esposti nel cap. 8. mostrano che la tensione minima presso la fermata di Camedo non rientra nei limiti stabiliti dalle norme. Inoltre, in prossimità di Locarno si osserva che la tensione raggiunge valori prossimi al limite di operabilità.

Per evitare delle indisponibilità del materiale rotabile e garantire l'esercizio secondo gli scenari esposti, vengono proposte tre misure di ottimizzazione volte a garantire una tensione superiore a 900 V:

- costruzione di una nuova SSE Camedo
- costruzione di una nuova SSE Locarno e revisione del nuovo concetto orario
- limitazione dei consumi ausiliari

### 9.1. Costruzione di una nuova SSE Camedo

La costruzione di una quarta SSE permette di garantire un approvvigionamento energetico proprio nel punto più critico della linea.

Il modello dell'impianto TE viene aggiornato aggiungendo la SSE di Camedo. Si ipotizza che le caratteristiche elettriche siano le stesse della SSE di Ponte Brolla ed Intragna. Anche in questo caso avviene un sezionamento analogo a quello delle SSE attualmente in esercizio:

- interruttore principale nr. 10: alimenta la barra comune degli interruttori posti all'esterno della SSE
- interruttore nr. 1: alimenta la sezione di LC a valle della SSE
- interruttore nr. 2: alimenta la sezione di LC a monte della SSE
- interruttore nr. 3: alimenta la LC presente in stazione

Attraverso questa configurazione, la sezione Camedo-confine assume una lunghezza di 500 m e non è più necessario l'impiego dei feeder per limitare le cadute di tensione.

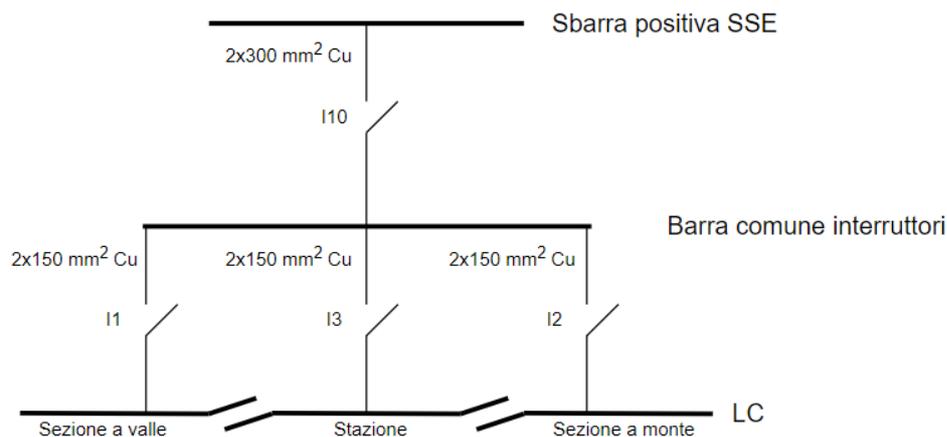


Figura 65 Schema elettrico collegamento SSE-LC Camedo

La lunghezza dei cavi che collegano la SSE alla LC viene ipotizzata riprendendo i valori delle SSE attuali:

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-posto interruttori	2x300 Cu	20
Interruttore 1-LC	2x150 Cu	108
Interruttore 2-LC	2x150 Cu	102
Interruttore 3-LC	2x150 Cu	10

Tabella 47 Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Camedo

Analogamente al circuito positivo, anche il circuito negativo viene modellato basandosi sulle SSE attuali:

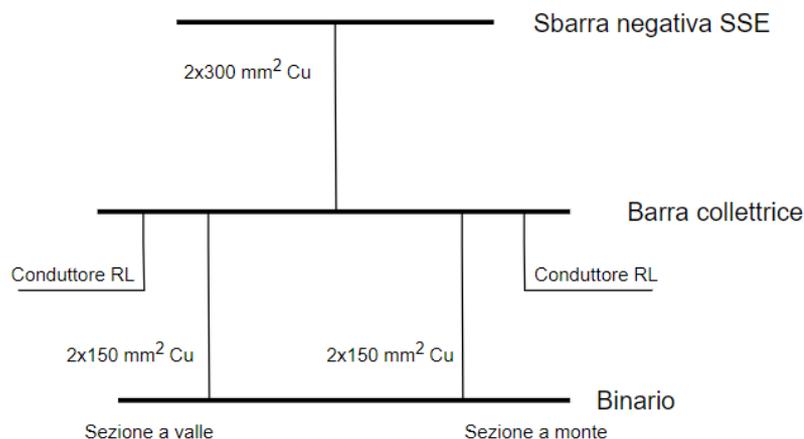


Figura 66 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Camedo

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-barra colletttrice	2x300 Cu	20
Barra colletttrice-rotaia (lato Verdasio)	2x240 Cu	108
Barra colletttrice-rotaia (lato Ribellasca)	2x240 Cu	92

Tabella 48 Caratteristiche principali cavi di collegamento binario-SSE Camedo

### 9.1.1. Cadute di tensione

Come si può osservare dai risultati ottenuti (Figura 67), le cadute di tensione lungo tutta la linea rientrano ora nei limiti di operabilità.

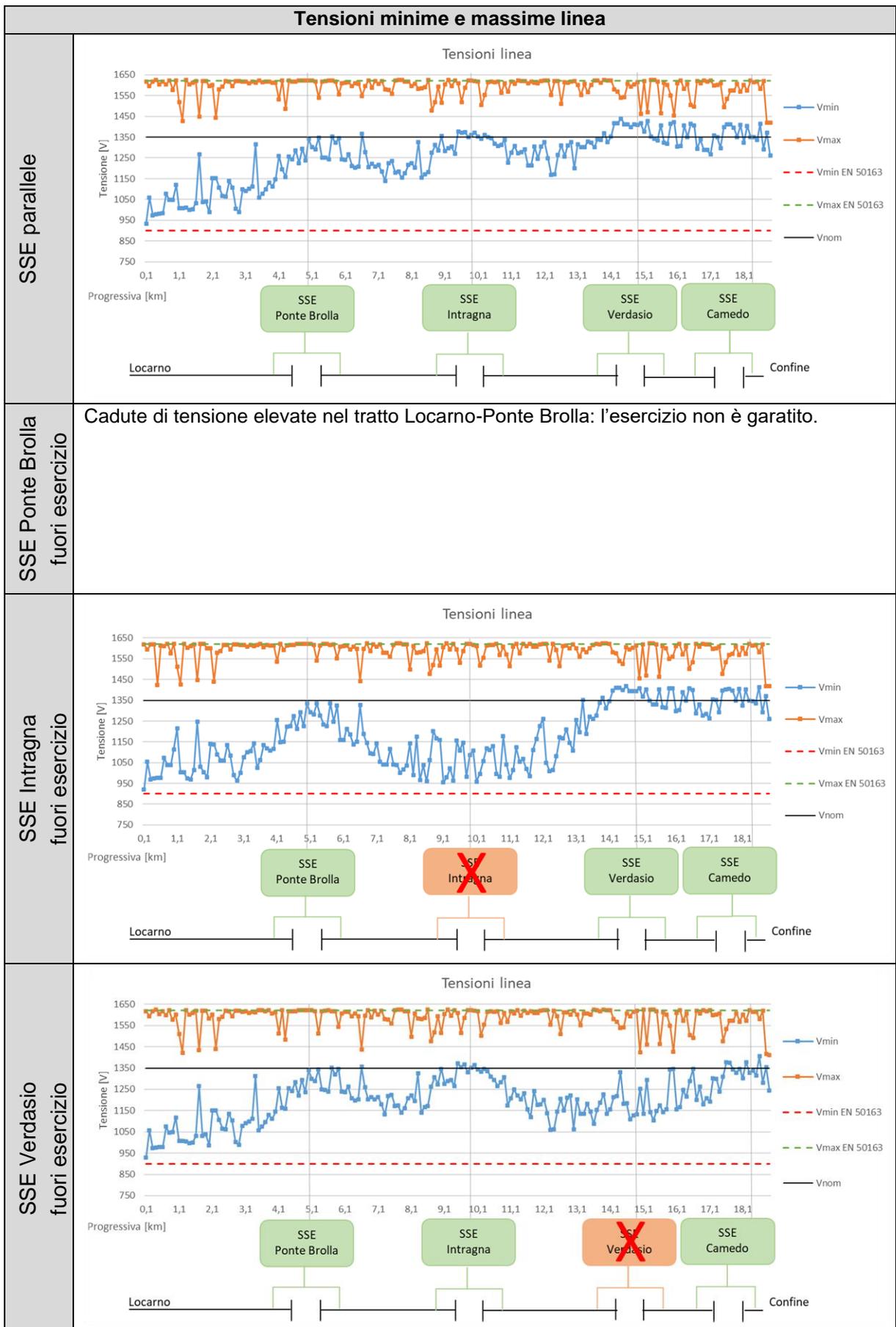
Partendo dal caso in cui le quattro SSE lavorano in parallelo, i risultati mostrano come la tensione minima viene garantita lungo tutta la linea. L'aggiunta della quarta SSE a Camedo permette di alimentare bilateralmente la sezione Verdasio-Camedo, riducendo quindi le cadute di tensione. La tratta alimentata a sbalzo fino al confine si riduce ad una lunghezza di 500 m, a fronte dei 4 km del caso attuale. La tensione minima registrata è di 934 V nei pressi della stazione di Locarno.

Analizzando i risultati ottenuti in merito agli scenari di una SSE fuori esercizio, si osserva un generale miglioramento, in quanto l'alimentazione può essere garantita in caso di indisponibilità da parte della SSE di Intragna oppure di Verdasio. Le tensioni minime valgono 921 V rispettivamente 929 V.

Analogamente a quanto detto nel capitolo precedente, l'aggiunta della quarta sottostazione non permette di garantire una tensione sufficiente nel caso di problemi alla SSE di Ponte Brolla; anche in questo caso il software riporta un errore di convergenza della simulazione a causa delle cadute di tensione troppo elevate.

Lo scenario in cui le sezioni della linea vengono alimentate a sbalzo da una singola SSE mostra che le tensioni minime vengono garantite sulla maggior parte della linea. Unica eccezione viene fatta per due punti a monte delle SSE di Ponte Brolla ed Intragna. Come si osserva dalla Figura 67, alla progressiva 5,4 km la tensione vale 875 V mentre alla progressiva 10,7 km raggiunge il limite di 900 V. L'alimentazione a sbalzo imposta da questo tipo di configurazione comporta cadute di tensione massime nei pressi dell'estremità non alimentata. Inoltre, si può notare come i punti critici siano prossimi alle fermate di Ponte Brolla ed Intragna, luoghi in cui i treni in partenza dalla stazione accelerano causando un assorbimento di corrente elevato.

Bisogna però ricordare che i risultati esposti rappresentano la situazione peggiore, ovvero dove tutti i conduttori raggiungono una temperatura di 80°C ed il consumo dei sistemi ausiliari è massimo. Le cadute di tensione nella realtà sarebbero certamente inferiori e raggiungerebbero i limiti consentiti anche nei punti più critici.



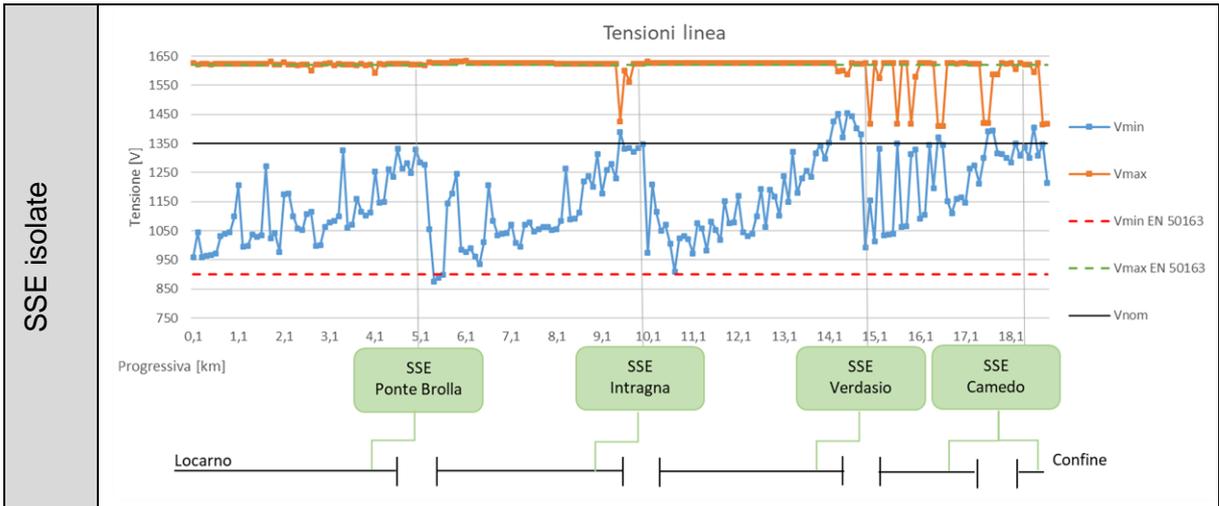


Figura 67 Tensioni in linea per differenti scenari di esercizio

### 9.1.2. Carichi sui raddrizzatori

Per verificare i raddrizzatori sono state considerate le correnti di picco così come le correnti ammissibili durante 1 minuto e 2 ore di esercizio. Per quanto riguarda le correnti di picco, i dati di targa non riportano nessun valore. Per questo motivo la corrente di picco ottenuta dalle simulazioni viene confrontata con la corrente massima ammissibile su 1 minuto definita nei dati di targa del componente. Le correnti massime valutate su 1 minuto e 2 ore di esercizio vengono invece confrontate con i rispettivi valori ammissibili definiti dalla targa del raddrizzatore.

I risultati riportati nella Tabella 49 mostrano che le correnti rientrano nei parametri definiti dal costruttore. Eccezione viene fatta per la corrente di picco della SSE di Ponte Brolla. Come si può osservare dai valori ottenuti per i differenti scenari, la corrente di picco supera (nel caso peggiore) di 211 A il valore ammissibile. Ciò avviene nello scenario in cui la SSE Intragna si guasti; la sottocentrale di Ponte Brolla si ritroverebbe ad approvvigionare da sola la tratta più trafficata e quindi quella con più assorbimenti. Il risultato ottenuto è analogo a quanto trattato nel cap. 8.2.: l'aggiunta di una quarta SSE lontano da Ponte Brolla non permette di diminuire i carichi sui raddrizzatori più sollecitati.

Carichi raddrizzatori - SSE in parallelo						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1121	2500	580	1875	2523	2500
SSE Intragna	866	2500	344	1875	1963	2500
SSE Verdasio	734	3750	365	1875	1436	3750
SSE Camedo	441	2500	126	1875	1552	2500

Carichi raddrizzatori - SSE Intragna fuori esercizio						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1494	2500	722	1875	2711	2500
SSE Intragna	0	2500	0	1875	0	2500
SSE Verdasio	940	2500	501	1875	1710	3750
SSE Camedo	449	2500	134	1875	1569	2500

Carichi raddrizzatori - SSE Verdasio fuori esercizio						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1148	2500	600	1875	2546	2500
SSE Intragna	1047	2500	470	1875	2351	2500
SSE Verdasio	0	2500	0	1875	0	3750
SSE Camedo	623	2500	289	1875	1995	2500

Carichi raddrizzatori - SSE isolate						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Ponte Brolla	1049	2500	552	1875	2553	2500
SSE Intragna	1088	2500	528	1875	2045	2500
SSE Verdasio	1218	2500	464	1875	1886	3750
SSE Camedo	706	2500	311	1875	2411	2500

Tabella 49 Carichi sui raddrizzatori per differenti scenari di esercizio

### 9.1.3. Taratura extrarapidi

La Tabella 50 mostra il confronto tra le correnti minime di corto circuito misurate dagli interruttori extrarapidi e i carichi massimi rilevati durante il normale funzionamento.

Taratura extrarapidi - SSE in parallelo		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Ponte Brolla	1121	2523
IER Intragna	1515	1963
IER Verdasio	1256	1436
IER Camedo	955	1552
Taratura extrarapidi - SSE Intragna fuori esercizio		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Ponte Brolla	1121	2711
IER Intragna	1515	0
IER Verdasio	1256	1710
IER Camedo	955	1569
Taratura extrarapidi - SSE Verdasio fuori esercizio		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Ponte Brolla	1121	2546
IER Intragna	1515	2351
IER Verdasio	1256	0
IER Camedo	955	1995
Taratura extrarapidi - SSE isolate		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Ponte Brolla	3373	2553
IER Intragna	2908	2045
IER Verdasio	2972	1886
IER Camedo	3403	2411

Tabella 50 Taratura degli interruttori extrarapidi

Come si può osservare, nella configurazione in parallelo le correnti minime di cortocircuito sono inferiori ai carichi di punta sugli interruttori extrarapidi. Ciò significa che il valore di taratura deve essere superiore ai carichi di punta onde evitare l'apertura del dispositivo in seguito ad un picco di assorbimento di corrente della LC. La presenza di una quarta SSE a Camedo non comporta una modifica della taratura degli extrarapidi; per gli interruttori di Ponte Brolla, Intragna e Verdasio si ottengono infatti le stesse correnti minime di cortocircuito esposte nel cap. 8.3. I valori di taratura proposti sono di 2750 A per IER Ponte Brolla, 2400 A per IER Intragna, 1750 A per IER Verdasio e 2000 A per IER Camedo.

A Camedo la corrente minima di cortocircuito assume un valore molto basso (955 A) a causa della posizione della nuova SSE vicino ad uno degli estremi della tratta.

Osservando invece i risultati ottenuti per lo scenario SSE isolate, ovvero in cui le SSE alimentano indipendentemente una sola sezione della LC, si nota che la corrente minima di cortocircuito misurata dagli extrarapidi assume valori più elevati. In base a questa configurazione la lunghezza delle sezioni su cui operano gli interruttori diminuisce, così come l'impedenza chilometrica. Il rischio di confondere un picco di assorbimento per un cortocircuito non è più presente, in quanto il valore di taratura è superiore ai picchi di corrente rilevati dall'extrarapido durante il normale esercizio.

In questo caso i valori di taratura sono di 3300 A per IER Ponte Brolla, 2900 A per IER Intragna e Verdasio e 3400 A per IER Camedo.

La Figura 68 mostra il confronto delle correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori per i due schemi di alimentazione della LC.

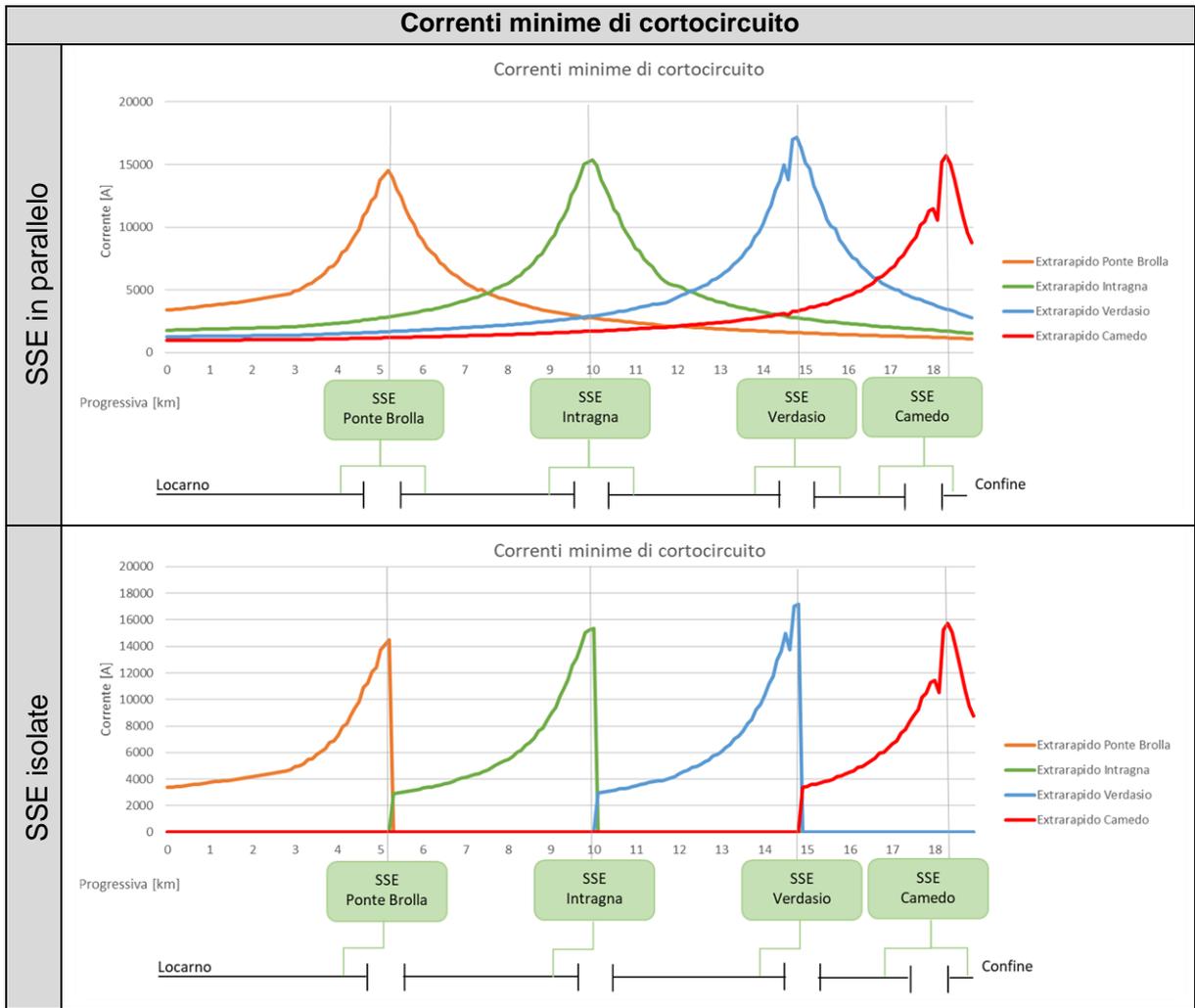


Figura 68 Correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori extrarapidi

### 9.1.4. Potenziale delle rotaie

Come si osserva dai risultati riportati nella Figura 69, il potenziale delle rotaie non supera in nessuno scenario il valore limite di 120 definito dalle normative. Aggiungendo la quarta SSE è possibile diminuire il potenziale nel corrispettivo punto, in quanto è presente la barra negativa della nuova SSE.

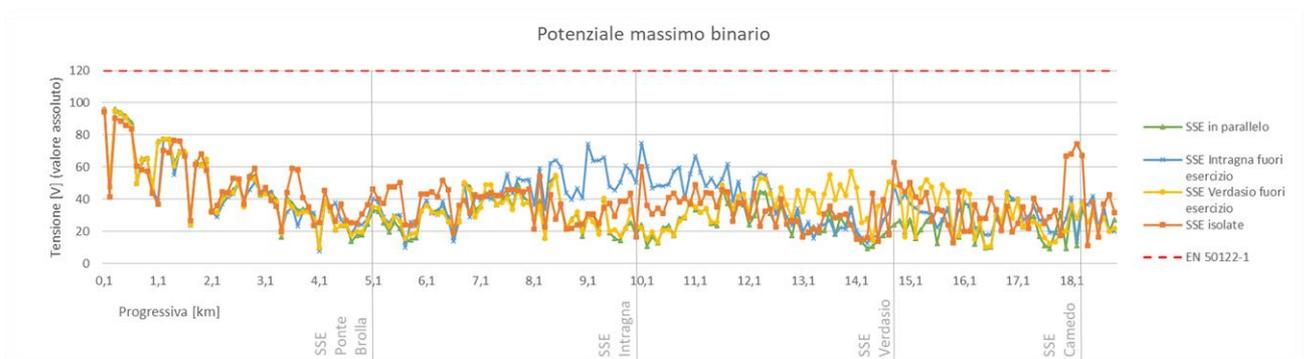


Figura 69 Potenziale massimo binario per differenti scenari di esercizio

## 9.2. Costruzione di una nuova SSE Locarno e revisione del nuovo concetto orario

Come descritto nel cap. 8.1., il nuovo concetto orario prevede la presenza concomitante di tre convogli presso la fermata di Camedo. La tensione minima rilevata nel caso peggiore (SSE di Intragna fuori esercizio) è pari a 791 V, a fronte di un minimo di 900 V imposto dalle normative. Questa differenza non troppo eccessiva può essere risolta con una modifica del concetto orario. Ritardando la partenza del treno di supporto si consentirebbe l'avvicinamento del convoglio internazionale alla SSE di Verdasio, riducendo quindi la resistenza chilometrica del circuito TE. Le cadute di tensione sulla sezione alimentata verrebbero così ridotte.

Durante il periodo di attesa prolungato, il treno di supporto risulta comunque un assorbitore di corrente, ma l'approvvigionamento energetico sarebbe minore in quanto finalizzato unicamente ai sistemi ausiliari (e quindi non all'accelerazione del convoglio).

Le modifiche proposte per la modifica del concetto orario sono:

Nr. treno	Partenza prevista	Partenza modificata
724	16:42:30	16:47:30
726	17:42:30	17:47:30

Tabella 51 Confronto orario previsto ed orario

In caso di attuazione di questa misura, la modifica dell'orario dovrà essere discussa e coordinata con l'Ufficio Federale dei Trasporti (UFT), il Dipartimento del Territorio (DT) e SSIF SpA.

Inoltre, si propone la costruzione di una nuova SSE a Locarno. In questo punto della linea le tensioni minime si avvicinano al limite di 900 V, indipendentemente dallo scenario simulato. La posizione sull'estremo a sbalzo non alimentato e la presenza di più convogli causano delle cadute di tensione elevate. La nuova SSE consentirebbe eventuali potenziamenti futuri del traffico e garantirebbe una maggiore versatilità per quanto riguarda la gestione dell'alimentazione della LC.

Il modello dell'impianto TE viene aggiornato aggiungendo la SSE di Locarno. Si ipotizza che le caratteristiche elettriche siano le stesse della SSE di Ponte Brolla ed Intragna. A causa della posizione sull'estremo della linea, la SSE viene posizionata a monte della stazione di Locarno, alla progressiva 0,25 km. Il sezionamento avviene in questo modo:

- Interruttore principale nr. 10: alimenta la barra comune degli interruttori posti all'esterno della SSE
- Interruttore nr. 1: alimenta la sezione di LC a valle della SSE
- Interruttore nr. 2: alimenta la sezione di LC a monte della SSE, ovvero la stazione di Locarno

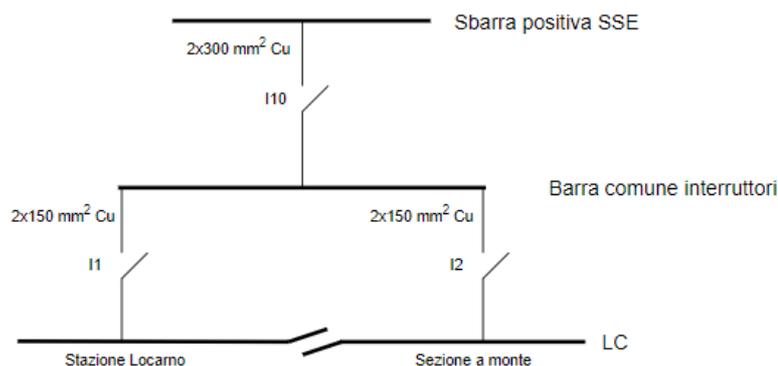


Figura 70 Schema elettrico di collegamento SSE-LC Locarno

La lunghezza dei cavi che collegano la SSE alla LC viene ipotizzata riprendendo i valori delle SSE attuali:

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-posto interruttori	2x300 Cu	20
Interruttore 1-LC	2x150 Cu	25
Interruttore 2-LC	2x150 Cu	25

Tabella 52 Caratteristiche principali cavi di collegamento SSE-LC Locarno

Analogamente al circuito positivo, anche il circuito negativo viene ipotizzato basandosi sulle SSE attuali:

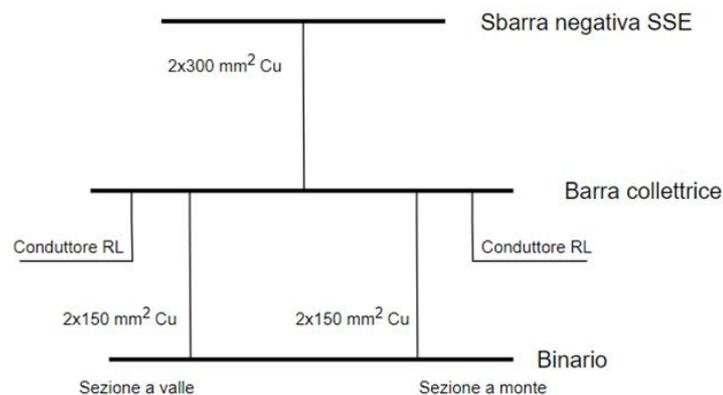


Figura 71 Schematizzazione circuito di ritorno SSE Locarno

Collegamento	Sezione cavi [mm <sup>2</sup> ]	Lunghezza cavi [m]
SSE-barra colletttrice	2x300 Cu	20
Barra colletttrice-rotaia (lato Locarno)	2x240 Cu	25
Barra colletttrice-rotaia (lato Ponte Brolla)	2x240 Cu	25

Tabella 53 Caratteristiche principali cavi di collegamento binario-SSE Locarno

Considerando l'aggiunta di questa nuova SSE, lo scenario proposto da FART SA di alimentare ogni sezione a sbalzo deve essere modificato. Per offrire una maggior efficienza l'approvvigionamento della LC deve essere gestito secondo il nuovo schema:

- SSE Locarno:  
alimenta a sbalzo la stazione di Locarno e la sezione Locarno-Ponte Brolla
- SSE Ponte Brolla:  
alimenta a sbalzo la sezione da Ponte Brolla a Intragna
- SSE Intragna:  
alimenta a sbalzo la sezione da Intragna a Verdasio
- SSE Verdasio:  
alimenta a sbalzo la sezione da Verdasio al confine

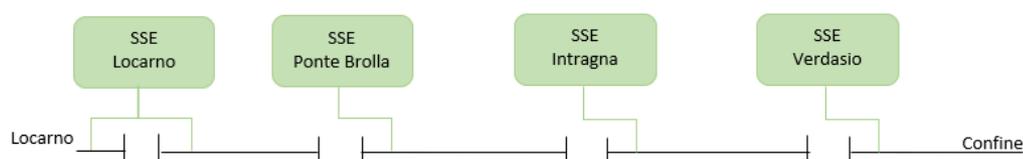


Figura 72 Schema di alimentazione con SSE isolate

### 9.2.1. Cadute di tensione

La Figura 73 mostra le tensioni sulla linea per differenti scenari di esercizio. Partendo dalla configurazione dove le quattro SSE lavorano in parallelo, si osserva che l'aggiunta della quarta SSE permette di evitare cadute di tensione eccessive nei pressi di Locarno. Infatti, presso la fermata si ottiene una tensione sulla linea pari al valore nominale di 1350 V. La modifica dell'orario consente di limitare le cadute di tensione nei pressi di Camedo. Spostando di 5 minuti la partenza del treno di supporto è possibile rientrare nei limiti di operabilità senza dover ricorrere a misure più costose (come ad esempio la costruzione di una nuova SSE).

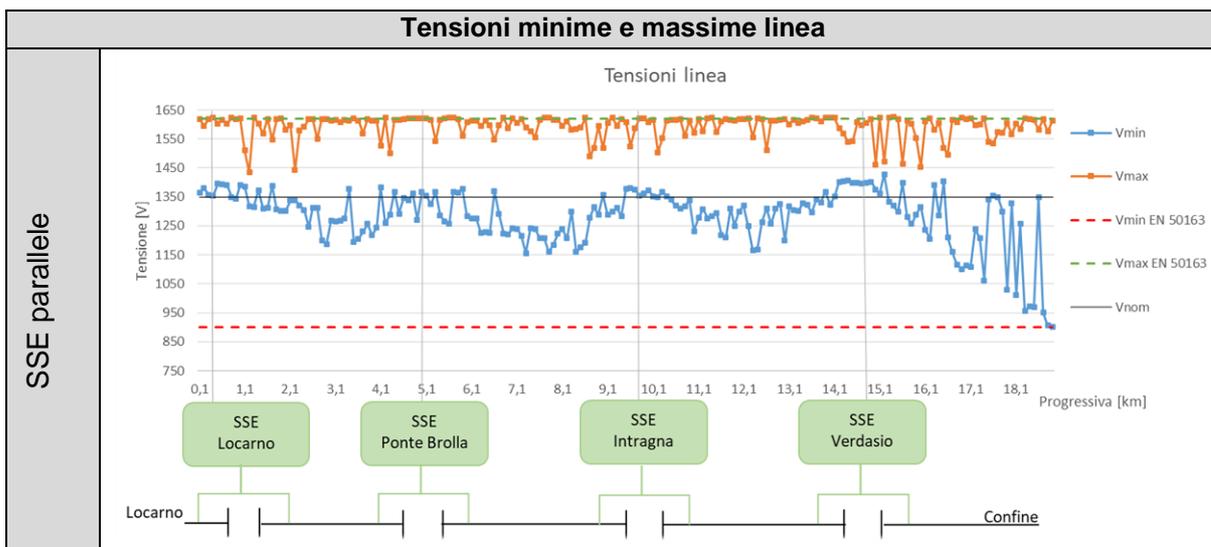
Mediante questa configurazione le sezioni della LC vengono alimentate bilateralmente, ad eccezione di Verdasio-confine che viene approvvigionata a sbalzo. La tensione minima registrata è di 901 V, al limite delle normative. Bisogna però ricordare che il valore è riferito allo scenario peggiore, ovvero dove le temperature dei conduttori sono massime, così come il consumo da parte dei sistemi ausiliari.

L'aggiunta della quarta SSE a Locarno consente inoltre la continuità dell'esercizio nel caso di guasto o manutenzione di SSE Ponte Brolla, scenario che attualmente non è possibile. In questo caso la tensione raggiunta sul confine è di 903 V.

L'esercizio viene garantito anche in caso di disservizio della SSE Intragna. La tensione minima raggiunta vale 902 V.

Nel caso in cui la SSE di Verdasio fosse fuori esercizio, la sezione Intragna-confine subirebbe cadute di tensione elevate a causa dell'eccessiva lunghezza della sezione da alimentare (9 km). L'approvvigionamento potrebbe però essere gestito da SSIF (previo consenso) attraverso il sezionatore posto sul confine.

Lo scenario in cui le sezioni della linea vengono alimentate a sbalzo da una singola SSE mostra che le tensioni minime vengono garantite sulla maggior parte della linea. Unica eccezione viene fatta per un punto della linea nei pressi di SSE Intragna. Come si osserva dalla Figura 73, alla progressiva 9,3 km la tensione raggiunge gli 878 V. L'alimentazione a sbalzo imposta da questo tipo di configurazione comporta cadute di tensione massime nei pressi dell'estremità non alimentata. Inoltre, si può notare come i punti critici siano prossimi alla fermata, luogo in cui i treni in partenza dalla stazione accelerano causando un assorbimento di corrente elevato.



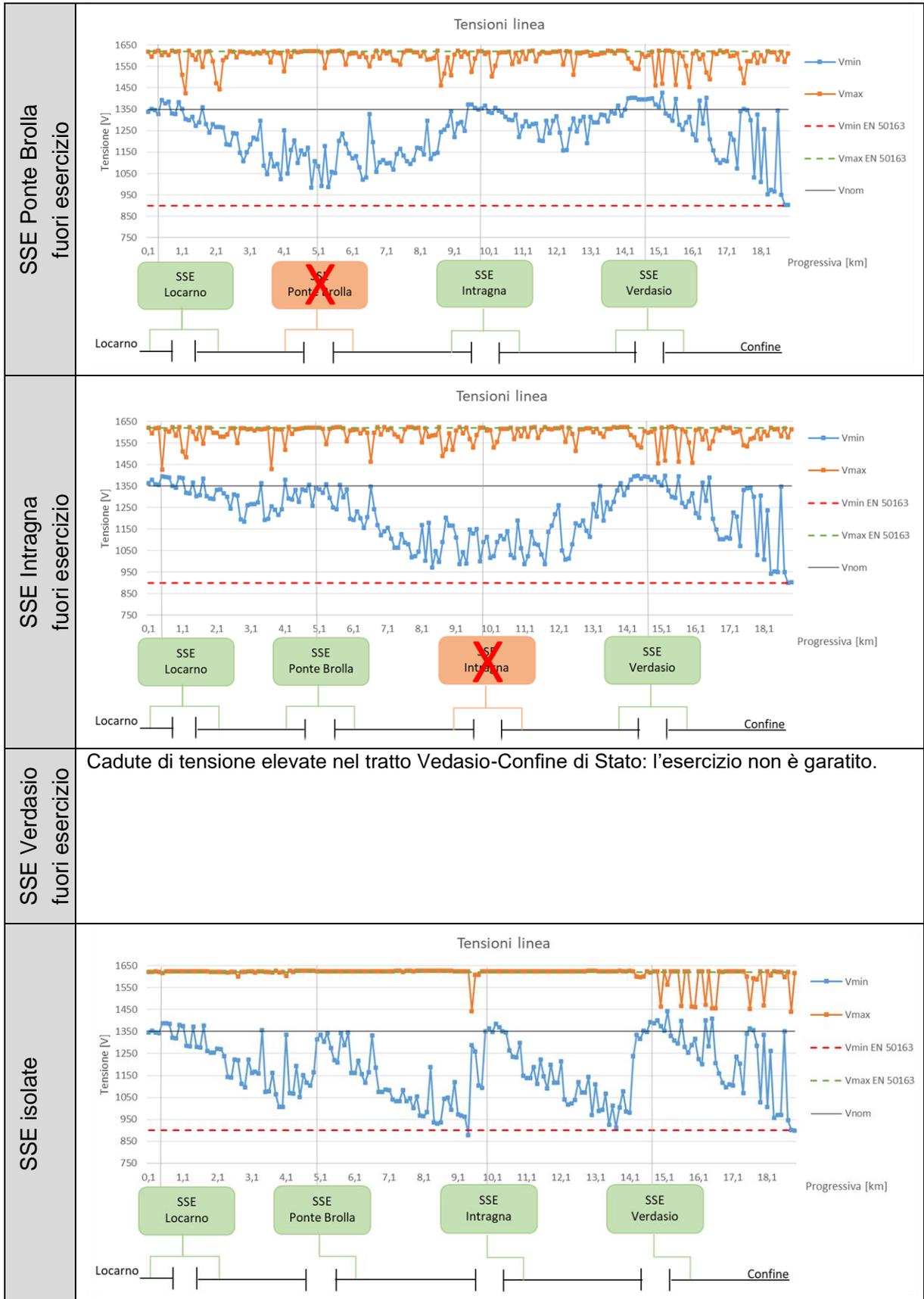


Figura 73 Tensioni in linea per differenti scenari di esercizio

## 9.2.2. Carichi sui raddrizzatori

Per verificare i raddrizzatori sono state considerate le correnti di picco così come le correnti ammissibili durante 1 minuto e 2 ore di esercizio. Per quanto riguarda le correnti di picco, i dati di targa non riportano nessun valore. Per questo motivo la corrente di picco ottenuta dalle simulazioni viene confrontata con la corrente massima ammissibile su 1 minuto definita nei dati di targa del componente. Le correnti massime valutate su 1 minuto e 2 ore di esercizio vengono invece confrontate con i rispettivi valori ammissibili definiti dalla targa del raddrizzatore.

I risultati mostrano che le correnti rientrano nei parametri definiti dal costruttore per tutti gli scenari simulati. A differenza della misura di ottimizzazione precedente, questa soluzione non comporta dei carichi di punta pericolosi per i raddrizzatori; le correnti di picco sono inferiori ai limiti stabiliti. Aggiungendo una seconda SSE sulla tratta più trafficata, è possibile diminuire i carichi sui raddrizzatori di Ponte Brolla.

Carichi raddrizzatori - SSE in parallelo						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Locarno	716	2500	318	1875	1374	2500
SSE Ponte Brolla	664	2500	332	1875	1960	2500
SSE Intragna	802	2500	320	1875	1939	2500
SSE Verdasio	874	3750	430	1875	1624	3750
Carichi raddrizzatori - SSE Ponte Brolla fuori esercizio						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Locarno	921	2500	479	1875	1842	2500
SSE Ponte Brolla	0	2500	0	1875	0	2500
SSE Intragna	1009	2500	427	1875	2167	2500
SSE Verdasio	889	3750	445	1875	1667	3750
Carichi raddrizzatori - SSE Intragna fuori esercizio						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Locarno	719	2500	336	1875	1411	2500
SSE Ponte Brolla	872	2500	443	1875	2144	2500
SSE Intragna	0	2500	0	1875	0	2500
SSE Verdasio	981	3750	559	1875	2108	3750
Carichi raddrizzatori - SSE Verdasio fuori esercizio						
	Max RMS 60 s [A]	Ammissibile 60 s [A]	Max RMS 7200 [A]	Ammissibile 7200 s [A]	Max Abs [A]	Ammissibile 60 s [A]
SSE Locarno	1010	2500	499	1875	2028	2500
SSE Ponte Brolla	1132	2500	533	1875	2264	2500
SSE Intragna	1062	2500	457	1875	2006	2500
SSE Verdasio	767	3750	321	1875	1736	3750

Tabella 54 Carichi sui raddrizzatori, scenario con il nuovo concetto orario modificato

### 9.2.3. Taratura extrarapidi

La Tabella 55 mostra il confronto tra le correnti minime di corto circuito misurate dagli interruttori extrarapidi e i carichi massimi rilevati durante il normale funzionamento:

Taratura extrarapidi - SSE in parallelo		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Locarno	925	1374
IER Ponte Brolla	1121	1960
IER Intragna	1595	1939
IER Verdasio	1256	1624
Taratura extrarapidi - SSE Ponte Brolla fuori esercizio		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Locarno	925	1842
IER Ponte Brolla	1121	0
IER Intragna	1595	2167
IER Verdasio	1256	1667
Taratura extrarapidi - SSE Intragna fuori esercizio		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Locarno	925	1411
IER Ponte Brolla	1121	2144
IER Intragna	1595	0
IER Verdasio	1256	2108
Taratura extrarapidi - SSE isolate		
	Corrente min cc [A]	Max IER [A]
IER Locarno	3796	2028
IER Ponte Brolla	2896	2234
IER Intragna	2849	2006
IER Verdasio	3067	1736

Tabella 55 Taratura degli interruttori extrarapidi

Come si può osservare, nella configurazione in parallelo le correnti minime di cortocircuito sono inferiori ai carichi di punta sugli interruttori extrarapidi. Ciò significa che il valore di taratura deve essere superiore ai carichi di punta onde evitare l'apertura del dispositivo in seguito ad un picco di assorbimento di corrente della LC. La presenza di una quarta SSE a Camedo non comporta una modifica della taratura degli extrarapidi; per gli interruttori di Ponte Brolla, Intragna e Verdasio si ottengono infatti le stesse correnti minime di cortocircuito esposte nel cap. 8.3. e 9.1. I valori di taratura proposti sono di 2200 A per IER Ponte Brolla e Intragna, 2150 A per IER Verdasio e 1900 A per IER Locarno.

A Locarno la corrente minima di cortocircuito assume un valore molto basso (925 A) a causa della posizione della nuova SSE vicino ad uno degli estremi della tratta.

Osservando invece i risultati ottenuti per lo scenario SSE isolate, ovvero in cui le SSE alimentano indipendentemente una sola sezione della LC, si nota che la corrente minima di cortocircuito misurata dagli extrarapidi assume valori più elevati. In base a questa configurazione la lunghezza delle sezioni su cui operano gli interruttori diminuisce, così come l'impedenza chilometrica. Il rischio di confondere un picco di assorbimento per un cortocircuito non è più presente in quanto il valore di taratura è superiore ai picchi di corrente rilevati dall'extrarapido durante il normale esercizio. In questo caso i valori di taratura sono di 2850 A per IER Ponte Brolla, 2800 A per IER Intragna, 3000 A per IER Verdasio e 3750 A per IER Locarno.

La Figura 74 mostra il confronto delle correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori per i due schemi di alimentazione della LC.

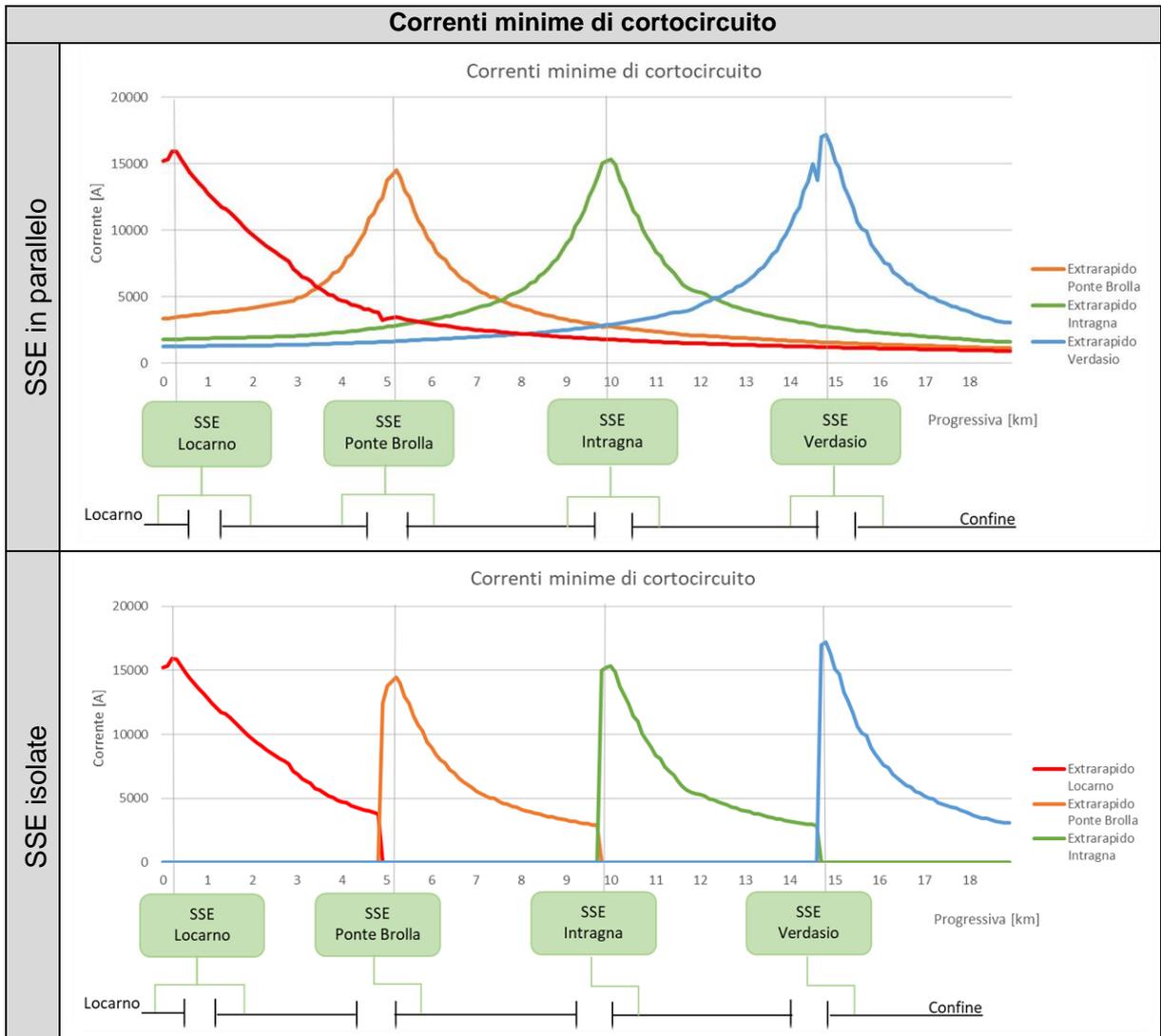


Figura 74 Correnti minime di cortocircuito misurate dagli interruttori extrarapidi

### 9.2.4. Potenziale delle rotaie

Il potenziale massimo registrato è di 101 V; la tensione massima raggiunta è inferiore ai limiti consentiti dalla normativa EN 50122-1. Aggiungendo la quarta SSE è possibile diminuire il potenziale nel corrispettivo punto, in quanto è presente la barra negativa della nuova SSE.

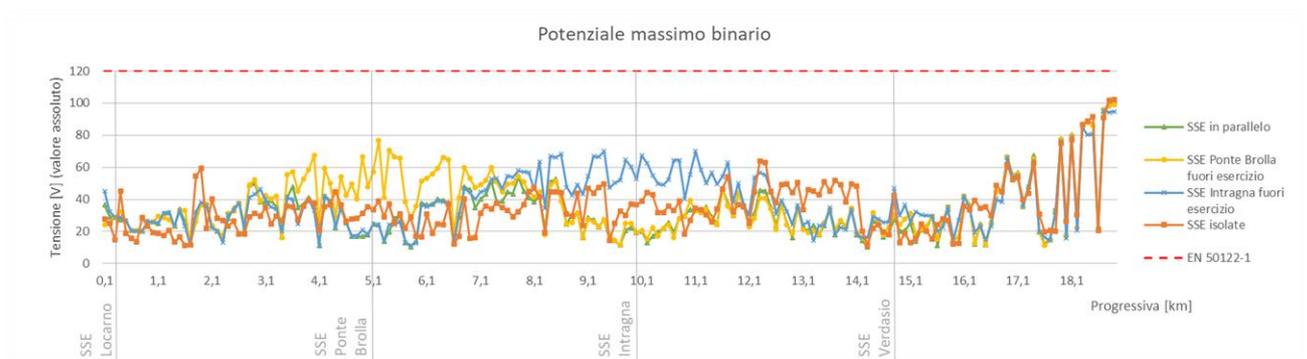


Figura 75 Potenziale massimo binario per differenti scenari di esercizio

### 9.3. Limitazione dei consumi ausiliari

Un'ulteriore misura di ottimizzazione che può essere integrata nelle due soluzioni proposte precedentemente, è la limitazione dell'assorbimento dei sistemi ausiliari. Agendo su questo aspetto si potrebbero limitare le cadute di tensione. Il miglioramento risulterebbe essere di qualche Volt, in quanto il consumo da parte degli ausiliari corrisponde al 7-9% rispetto alla potenza necessaria ai fini della trazione.

Dai risultati esposti nei cap. 8. e 9.1. è emerso che presso la stazione di Locarno le tensioni minime raggiungono valori prossimi al limite imposto dalla EN 50163. Limitando in questo luogo l'utilizzo dei sistemi di riscaldamento o raffreddamento, sarebbe possibile limitare anche le cadute di tensione. I sistemi ausiliari funzionerebbero parzialmente solo nei primi minuti di tragitto, per poi attivarsi di nuovo al 100% di operabilità.

## 10. Influenza della temperatura

Le situazioni rappresentate fanno riferimento ad una temperatura limite di 80°C definita dalla norma 50119. Questi valori elevati sono difficilmente raggiungibili durante il normale esercizio ferroviario, anche durante le giornate più calde della stagione estiva. La linea raggiunge i 500 m di altitudine e percorre zone boschive per la maggior parte del suo percorso. Di conseguenza è molto improbabile che i conduttori, così come le rotaie, possano raggiungere (anche in estate) una temperatura massima di esercizio di 80°C.

La Figura 76 mostra il confronto delle tensioni minime ottenute considerando la temperatura dei conduttori a 45°C e 80°C. La differenza maggiore riscontrata è di 50 V negli estremi alimentati a sbalzo (Locarno e Verdasio). I risultati ottenuti dalle simulazioni precedenti mostrano che in alcuni punti della linea la tensione minima è prossima al limite di 900 V. Considerando quindi una temperatura dei conduttori più realistica (45°C) si può affermare con certezza che l'esercizio, considerate le proposte di ottimizzazione, può essere garantito entro i limiti stabiliti dalle normative.

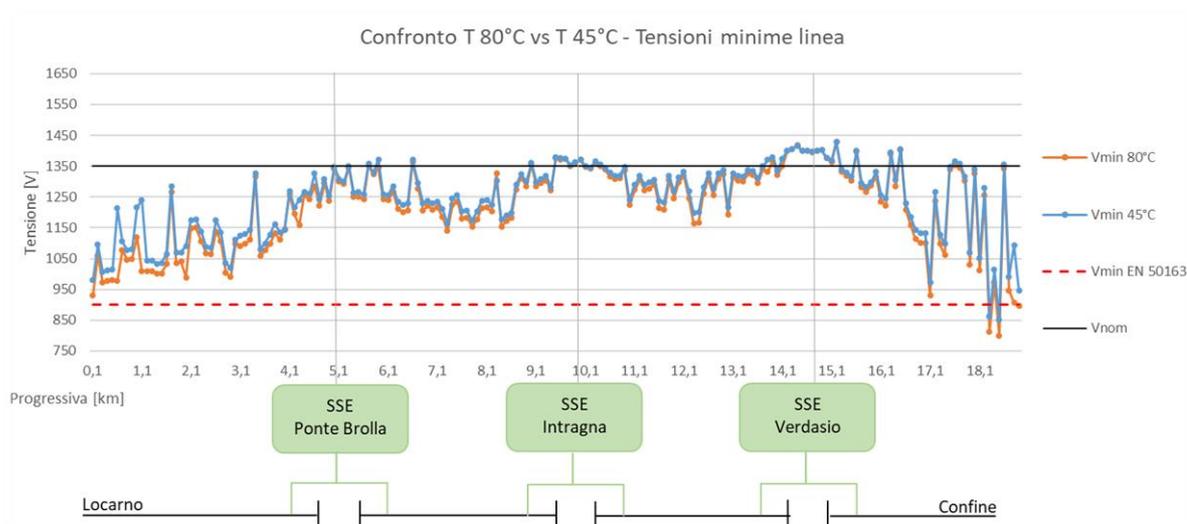


Figura 76 Confronto tensioni minime linea, temperatura conduttori 80°C vs 45°C

# 11. Miglioramenti futuri

Attraverso misurazioni in loco sarebbe possibile stabilire la conduttanza reale dei binari verso il terreno. Il valore è fortemente dipendente dai materiali, dalla geologia del suolo e dall'ambiente. Attraverso specifiche misure sarebbe possibile integrare la conduttanza reale della linea nel modello TrainsRunner aumentando così il livello di dettaglio.

Nel seguente lavoro sono state considerate delle temperature di esercizio massime di 80°C (secondo EN 50119). Normalmente questo valore viene raggiunto raramente, in quanto rappresenterebbe una situazione di continuo sovraccarico dei conduttori.

Uno studio approfondito sulla variazione delle temperature di esercizio dei conduttori della ferrovia in analisi consentirebbe di calcolare le impedenze chilometriche basandosi sulle condizioni reali di esercizio.

Un ulteriore punto di verifica dell'impianto TE consiste di valutare la portata dei conduttori per verificare che essi non superino le temperature massime consentite (80°C). Ciò significa valutare ogni conduttore presente sulla linea e determinarne la portata attraverso un modello termico costruito sulla base delle condizioni in cui esso opera.

Una volta terminati i lavori di ammodernamento dell'impianto TE e modellando il materiale rotabile attuale (FART e SSIF) sarebbe possibile effettuare una validazione concreta del modello. Comparando le grandezze elettriche misurate sulla linea con i valori ottenuti dalla simulazione, si otterrebbe un confronto diretto per quantificare la bontà del modello creato.

## 12. Conclusioni

Il software TrainsRunner ha permesso di modellare l'impianto TE considerando le modifiche di ammodernamento della LC così come l'implementazione del nuovo servizio a cadenza semi-oraria Locarno-Intragna prodotto con il nuovo materiale rotabile di Stadler Rail AG.

Le simulazioni sono state eseguite considerando l'usura della LC e del binario, una temperatura di esercizio di 80°C (secondo EN 50119) ed un consumo massimo da parte dei sistemi ausiliari; la situazione descritta è quindi la più sfavorevole dal punto di vista delle cadute di tensione.

Dalle simulazioni condotte si evince che le tensioni sulla LC rientrano per la maggior parte dello sviluppo della linea entro i limiti definiti dalla EN 50163. Vi sono però dei punti critici presso la fermata di Camedo dove le tensioni minime calcolate sono pari a 791 V. Presso la stazione di Locarno si raggiungono invece dei valori prossimi al limite di 900 V.

Le misure proposte per ottimizzare l'approvvigionamento della LC sono:

- costruzione di una nuova SSE a Camedo
- costruzione di una nuova SSE a Locarno e revisione del nuovo concetto orario

La costruzione di una quarta SSE a Camedo consente di garantire le tensioni di esercizio su tutta la tratta (valore minimo pari a 921 V). Questa misura permette un miglioramento della disponibilità degli impianti ferroviari in caso di fuori esercizio o manutenzione di una SSE. Infatti, è possibile effettuare delle manutenzioni sulla SSE Intragna o SSE Verdasio senza interrompere il normale esercizio ferroviario. Tuttavia, essa non consente di alimentare la LC secondo la nuova configurazione proposta da FART SA, ovvero dove ogni SSE alimenta una sola sezione a sbalzo. Secondo questo scenario si raggiunge infatti una tensione di 875 V presso Ponte Brolla.

La costruzione di una nuova SSE a Locarno e la revisione del nuovo concetto orario consente di mantenere delle tensioni minime maggiori a 900 V lungo tutta la linea. La soluzione proposta si rivela la più versatile per quanto riguarda l'approvvigionamento della LC: l'esercizio può essere svolto anche in caso di disservizio da parte di una delle SSE. Nel caso di alimentazione a sbalzo, invece, la tensione raggiunge 878 V presso Intragna.

I risultati ottenuti si riferiscono alle condizioni peggiori di esercizio, le quali sono difficilmente raggiungibili. Ulteriori analisi rivelano che la tensione minima può aumentare fino a 50 V nel caso in cui venga considerata una temperatura dei conduttori di 45°C, più vicina alle condizioni di esercizio reali. In base a queste considerazioni si può concludere che nella realtà le tensioni della LC prossime al limite inferiore (ottenute con gli scenari ottimizzati) superino il valore minimo di 900 V (ammisibile).

Un'ulteriore misura complementare alle proposte precedenti consiste nel diminuire l'utilizzo dei consumi ausiliari nei punti più sollecitati della linea.

Per ogni scenario simulato sono stati verificati i carichi sui raddrizzatori: attualmente, e con la costruzione della quarta SSE a Camedo, la corrente di picco misurata sul raddrizzatore di Ponte Brolla supera, nel peggiore dei casi, di 216 A il limite definito dai dati di targa degli apparecchi. La costruzione di una quarta SSE a Locarno e la revisione del concetto orario permette invece di rimanere entro i limiti di operabilità di 2500 e 3750 A (su 1 min) e di 1875 A (su 2 h), così come nel caso delle correnti di picco. Il potenziale di binario massimo calcolato è di 111 V, inferiore al limite di 120 V secondo EN 50122-1.

Le simulazioni hanno inoltre permesso di stabilire le basi per stabilire i valori di taratura degli extrarapidi per ogni scenario simulato.

L'alimentazione in parallelo necessita di valori di taratura più alti rispetto alle correnti minime di cortocircuito. In questo modo è possibile evitare che gli interruttori si aprano in seguito ad un picco di corrente dovuto ad una richiesta simultanea di potenza da parte di più treni. L'alimentazione con SSE isolate permette invece di tarare correttamente gli interruttori sulla base delle correnti minime di cortocircuito. I valori calcolati sono superiori alle correnti massime misurate durante il normale esercizio e non è più presente il rischio di confondere l'assorbimento di corrente con un cortocircuito.

## 13. Bibliografia e sitografia

- [1] <https://www.setteidea.com/Product/Trainsrunner>, 08.06.2021
- [2] [http://tesi.cab.unipd.it/62489/1/Mattana\\_Daniele\\_1137631.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/62489/1/Mattana_Daniele_1137631.pdf), 15.06.2021
- [3] Ricci, S. et al., Ingegneria dei sistemi ferroviari, Tecnologie metodi ed applicazioni, EGAF EDIZIONI srl, 2013
- [4] [http://www-3.unipv.it/electric/cad/slide\\_TE/TE\\_Lezione\\_5.pdf](http://www-3.unipv.it/electric/cad/slide_TE/TE_Lezione_5.pdf), 22.06.2021
- [5] [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/102748/1/2014\\_12\\_Lezzi\\_Rossetti.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/102748/1/2014_12_Lezzi_Rossetti.pdf), 22.06.2021
- [6] Montini, M., Corso di tecnica ferroviaria 1-2, SUPSI, SA 2020
- [7] <http://users.fini.net/~bersano/italien-italian/Treni%20-%201%20-%20Meccanica%20Della%20Locomozione.pdf>, 29.06.2021
- [8] [http://www.dic.unipi.it/marino.lupi/meccanica\\_prima\\_16-17\\_250217.pdf](http://www.dic.unipi.it/marino.lupi/meccanica_prima_16-17_250217.pdf), 07.07.2021
- [9] [http://tesi.cab.unipd.it/62221/1/Michelon\\_Matteo\\_1108695.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/62221/1/Michelon_Matteo_1108695.pdf), 09.07.2021
- [10] Poretti, S., Corso di elettrotecnica 1, SUPSI, SP 2020
- [11] <http://www.polier.ch/page/archiv/vari/h-o/Hardmeier/FART/FART-03.htm>, 03.08.2021
- [12] [https://www.sguggiari.ch/1\\_archivio\\_news\\_2011\\_1.php?id=FART-ABe-4-8-Centovalli-Express](https://www.sguggiari.ch/1_archivio_news_2011_1.php?id=FART-ABe-4-8-Centovalli-Express), 03.08.2021
- [13] <http://www.polier.ch/page/bahnen/tessin/fart/201/61/003.htm>, 03.08.2021
- [14] <https://www.flickr.com/photos/33934821@N03/5897792224>, 03.08.2021
- [15] <https://www.rail-pictures.com/bild/switzerland~private-companies~fart-ssif-centovalli/28922/the-ssif-ferrovia-vigezzina-abe-88.html>, 03.08.2021
- [16] <https://www.laregione.ch/cantone/locarnese/1485029/treni-fart-stadler-locarno-ferrovie>, 03.08.2021
- [17] [http://www.dic.unipi.it/marino.lupi/meccanica\\_seconda\\_16-17\\_040317.pdf](http://www.dic.unipi.it/marino.lupi/meccanica_seconda_16-17_040317.pdf), 12.07.2021
- [18] <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/550359>, 12.07.2021

## 14. Iconografia

- Figura 4: Estratto da Ingegneria dei sistemi ferroviari, Tecnologie metodi ed applicazioni, p. 207, Stefano Ricci/ Franco Accettatis/ Marco Anotgnoli/ Alessandro Baldassarra/ Massimiliano Bruner/ Agostino Cappelli/ Elmilio Cosciotti/ Gino D'Ovidio/ Alessandra Libardo/ Gabriele Malavasi/ Antonio Tieri, EGAF EDIZIONI srl, 2013
- Figura 5: Estratto dal corso di Tecnica Ferroviaria 2 - TF2-07, Prof. M. Montini, p. 46
- Figura 6: Estratto dal corso di Tecnica Ferroviaria 2 - TF2-07, Prof. M. Montini, p. 49 e 54
- Figura 17: Estratto da Google Maps
- Figura 18: Estratto da Google Maps
- Figura 20: Wikipedia – Markus Giger, 24.07.2008
- Figura 21: [sguggiari.ch](http://sguggiari.ch) – Marco M., 27.06.2011
- Figura 22: [poiler.ch](http://poiler.ch) – Werner Hardmeier
- Figura 23: [flickr.com](http://flickr.com) – Maurizio Zanella, 02.07.2011
- Figura 24: [rail-pictures.com](http://rail-pictures.com) – Stefan Wohlfahrt, 05.09.2016
- Figura 25: [laregione.ch](http://laregione.ch) – Stadler
- Figura 29: estratto da “Circuito di ritorno”, FART SA
- Figura 31: estratto da “Circuito di ritorno”, FART SA
- Figura 33: estratto da “Circuito di ritorno”, FART SA
- Figura 42: [laregione.ch](http://laregione.ch) – Stadler
- Figura 45: estratto da “Caratteristiche materiale rotabile.xls”, Stadler
- Figura 46: estratto da “Caratteristiche materiale rotabile.xls”, Stadler