



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



M2 C2 Investimento 4.2 "Sviluppo trasporto rapido di massa"

RTI Progettisti:

**SYSTRA**

**SOTECNI**  
SYSTRA GROUP



**STUDIO MATTIOLI**  
Ambiente · Ingegneria · Energia



# PROGETTO DEFINITIVO DELLA SECONDA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (TRATTO NORD LINEA VERDE)

## INGEGNERIA DI SISTEMA ELABORATI GENERALI Simulazione elettrica del sistema di trazione

COMUNE DI BOLOGNA  
SETTORE MOBILITA' SOSTENIBILE E INFRASTRUTTURE

IL DIRETTORE DEL SETTORE  
ING. CLETO CARLINI

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO  
ING. GIANCARLO SGUBBI

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO  
ING. MIRKA RIVOLA

SEGRETERIA TECNICA

ing. Barbara Baraldi  
arch. Virginia Borrello  
ing. Giulio Cimbali  
geom. Agnese Fero  
ing. Stefania Guadagnini  
geom. Luciano Notte  
ing. Lisa Ombra  
ing. Marco Pesare

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

RESPONSABILE DI COMMESSA  
ING. PAOLO MARCHETTI

COORDINATORE TECNICO  
ING. ALESSANDRO PIAZZA

SISTEMA TRANVIARIO  
ING. SANTI CAMINITI

ARCHITETTURA E INSERIMENTO URBANISTICO  
ARCH. SEBASTIANO FULCI DE SARNO

OPERE A VERDE  
ARCH. NICOLA CANTARELLI

OPERE STRUTTURALI  
ING. STEFANO TORTELLA  
SEGNALAMENTO E TELECOMUNICAZIONI  
ING. ANGELA TORTORELLA

AMBIENTE  
PROF. MATTEO MATTIOLI  
SICUREZZA  
ARCH. SERGIO MOSCHEO  
ARCHEOLOGIA  
DOTT. CRISTINA BIGAZZI  
BIM MANAGER  
GEOM. MIRKO CASAROLI

RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE  
ING. SANTI CAMINITI

IMPIANTI TECNOLOGICI  
ING. SIMONE VILLA

STUDI TRASPORTISTICI  
ING. ANDREA SPINOSA

VIABILITA' INTERFERENTE E SOTTOSERVIZI  
ING. PIETRO CAMINITI

IDRAULICA E IDROLOGIA  
ING. ANDREA BENVENUTI

DEPOSITO  
ING. GIORGIO COLETTI

ARMAMENTO  
ING. MAURIZIO FALZEA  
GEOLOGIA E GEOTECNICA  
DOTT. GEOL. ANTONIO PAONE

TRAZIONE ELETTRICA  
ING. DOMENICO D'APOLLONIO  
IMPIANTI MECCANICI  
ING. SALVATORE GIUA

COMMESSA		FASE	LOTTO		WBS	DISCIPLINA		TIPO	NUMERO	REV.	SCALA	NOME FILE			
B	3	8	1	C	D	X	0	0	STM	XXX	RT	04	A	-	B381C-D-X00-STM-XXX-RT-04-A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	Ago. 2023	PRIMA EMISSIONE	G. IASEVOLI	A. TORTORELLA	S. CAMINITI
B					
C					
D					

## Indice

1. INTRODUZIONE .....	3
2. NORME E STANDARD .....	4
2.1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	4
2.2. ACRONIMI.....	4
3. DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO DI SIMULAZIONE .....	4
4. DATI DEL TRACCIATO.....	6
4.1. LINEA ROSSA .....	6
4.2. LINEA VERDE .....	11
5. DATI DEL MATERIALE ROTABILE.....	19
6. DATI ESERCIZIO .....	21
7. DATI DEL SISTELETTICO DI ALIMENTAZIONE .....	21
7.1. DATI CAVI E CONDUTTORI.....	24
7.2. SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE E GRUPPI DI CONVERSIONE.....	24
7.3. CIRCUITO POSITIVO .....	25
7.4. CIRCUITO NEGATIVO .....	26
7.5. CONDIZIONI DI DEGRADO .....	26
7.6. MODIFICHE DA APPORTARE ALLA LINEA ROSSA.....	27
8. CRITERI DI VERIFICA DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI .....	28
8.1. TENSIONE AL PANTOGRAFO .....	28
8.2. PROTEZIONE CONTRO LE SCOSSE ELETTRICHE .....	28
8.3. CORRENTE NELLA LINEA DI CONTATTO .....	29
8.4. CORRENTE NEI CAVI .....	29
8.5. CARICO DEI CONVERTITORI.....	29
9. RISULTATI SIMULAZIONI.....	29

---

9.1.	ORARIO SIMULATO E DIAGRAMMI DI MARCIA.....	29
9.2.	TENSIONI DI LINEA E POTENZIALI DI BINARIO .....	37
9.3.	CORRENTI NELLA LINEA DI CONTATTO .....	44
9.4.	CORRENTI NEI CAVI DI RINFORZO.....	45
9.5.	CARICHI DEI CONVERTITORI.....	45
10.	CONCLUSIONI .....	47

## 1. INTRODUZIONE

Il presente documento riassume i dati di input e i risultati dello studio di trazione della Linea Verde della rete tranviaria di Bologna, alimentata a 750 [V] in corrente continua, nell'ambito del progetto definitivo del sistema.

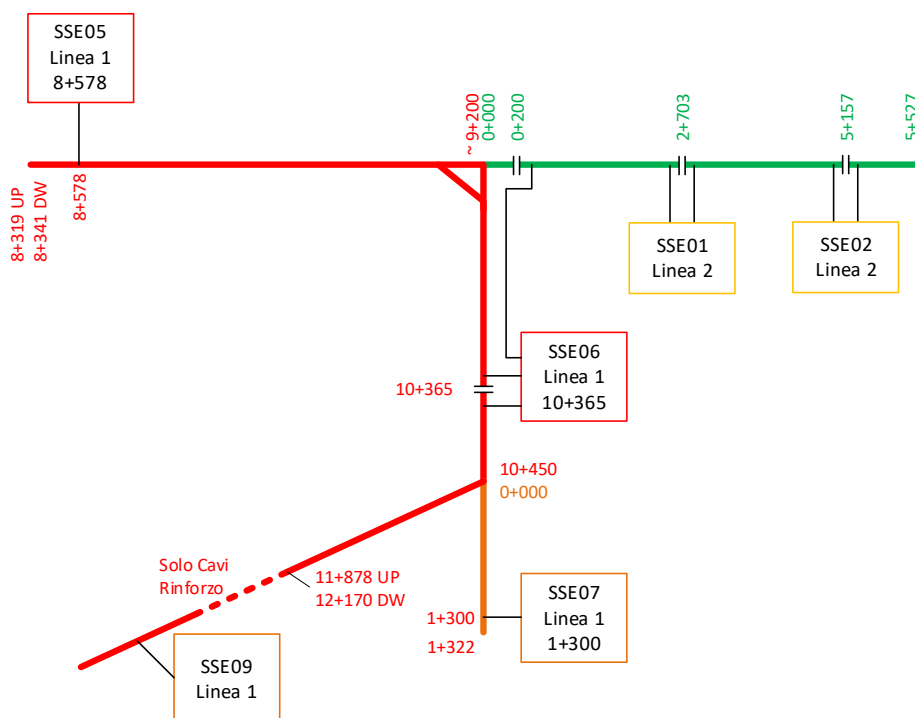


Figura 1: Schema semplificato della Linea Verde con innesto sulla Linea Rossa

La Figura 1 mostra lo schema semplificato del sistema di alimentazione della linea Verde con il suo innesto sulla Linea Rossa ad essa elettricamente connessa; è trascurato il proseguimento della Linea Rossa in direzione Facoltà Agraria.

Il modello della Linea Rossa è funzionale a tenere in conto lo scambio di potenza con la Linea Verde.

## 2. NORME E STANDARD

Riferimento	Codice	Titolo	Data
Std. 1	CEI EN 50122-1	Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Impianti fissi - Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno Parte 1: Provvedimenti di protezione contro lo shock elettrico	2012-08
Std. 2	CEI EN 50163	Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane -Tensioni di alimentazione dei sistemi di trazione	2006-10
Std. 3	CEI EN 50388	Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane -Alimentazione elettrica e materiale rotabile - Criteri tecnici per il coordinamento tra alimentazione elettrica (sottostazione) e materiale rotabile per ottenere l'interoperabilità	2012-08
Std. 4	CEI EN 50119	Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Impianti fissi - Linee aeree di contatto per trazione elettrica	2010-05

### 2.1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- Rif. 1 Bologna Red Line Tramway - Traction Electrical Sizing Simulations Report - 20230403 - revisione A4  
Rif. 2 Tracciato di Progetto Definitivo della Linea Verde  
Rif. 3 Elenco impianti semaforici con relative progressive di Progetto Definitivo della Linea Verde

### 2.2. ACRONIMI

SSE	Sottostazione Elettrica
Vcc	Tensione di cortocircuito

## 3. DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO DI SIMULAZIONE

Le simulazioni sono state eseguite utilizzando il software TrainsRunner-Studio sviluppato da Setteidea S.r.l in Genova ([www.trainsrunner.com](http://www.trainsrunner.com)).

Il software TrainsRunner-Studio è certificato in base alla norma EN50641:2020 Applicazioni ferroviarie - Installazioni fisse - Requisiti per la convalida degli strumenti di simulazione utilizzati per la progettazione dello standard del sistema di alimentazione della trazione elettrica.

- Numero di certificato: 1370/5/PRD/2022/ENE/EN/1224/V01 rilasciato da Bureau Veritas Italia.

TrainsRunner-Studio è un simulatore integrato elettromeccanico per la simulazione di sistemi ferroviari, metropolitani e tranviari ad alimentazione elettrica. Il simulatore è composto da un modulo meccanico e da due moduli elettrici, uno per sistemi in DC e uno per sistemi in AC.

Il simulatore consente di modellare e studiare una rete ferroviaria complessa, simulando il movimento di treni con differenti orari, differenti profili di velocità e differenti caratteristiche elettromeccaniche.

Il simulatore consente di modellare sistemi con differenti tensioni di alimentazione, ad esempio 3 kV DC, 1.5 kV DC, 750 V DC, 600 V DC, 1x25 kV 50 Hz, 2x25 kV 50 Hz, 15 kW 16,7 Hz.

Il software TrainsRunner fornisce in uscita tutte le informazioni necessarie a:

- progettare il sistema di alimentazione;
- studiare e verificare l'esercizio dei treni in funzione delle caratteristiche e delle prestazioni del sistema di alimentazione elettrico;
- verificare il corretto dimensionamento dei componenti, linea di contatto, cavi, sottostazioni, trasformatori, ...;
- calcolare i consumi energetici del sistema, dei singoli treni e le perdite nei singoli componenti;
- calcolare le correnti di cortocircuito in condizioni di regime permanente, per la taratura degli interruttori e la verifica dei componenti;
- valutare il potenziale del binario verso terra sia in condizioni di esercizio che in presenza di cortocircuiti.

Gli studi precedentemente elencati possono essere eseguiti sia in condizioni di normale funzionamento del sistema di alimentazione, che in condizioni degradate, come ad esempio la perdita di una sottostazione elettrica.

Il modulo meccanico può essere utilizzato per calcolare la velocità commerciale e i tempi di percorrenza dei treni, consentendo di progettare l'orario.

L'integrazione del modulo meccanico con i moduli elettrici permette di valutare le prestazioni del sistema nelle condizioni più gravose:

- considerando la massima frequenza dei treni nelle ore di punta
- verificando la capacità del sistema a mantenere il servizio dei treni, in caso di perdita di una o più sottostazioni elettriche.

L'uso integrato del modulo meccanico ed elettrico consente inoltre di analizzare il sistema in condizioni reali, tenendo in conto la mutua interazione tra le grandezze elettromeccaniche che caratterizzano i treni e le variabili che caratterizzano il sistema di alimentazione: questo approccio consente, ad esempio, di simulare la riduzione dello

sforzo di trazione al cerchione in funzione della caratteristica corrente/tensione dell'azionamento dei treni e del valore di tensione effettivamente disponibile al pantografo, con conseguente degrado del profilo di marcia del treno.

## 4. DATI DEL TRACCIATO

### 4.1. LINEA ROSSA

I dati della Linea Rossa sono stati ricavati dal documento Rif. 1 e sono relativi alle sole tratte indicate in Figura 1.

Le interferenze con gli incroci stradali della linea rossa non sono stati presi in considerazione: si assume che i profili di velocità riportati in Tabella 4 tengano conto di eventuali riduzioni di velocità in corrispondenza degli incroci stessi.

Linea	Binario 1 Up			Binario 2 Down		
	Da [m]	A [m]	Pendenza [%]	Da [m]	A [m]	Pendenza [%]
Principale	8319	8397	-0,1	8341	8404	-0,67
Principale	8397	8432	1,92	8404	8459	-0,24
Principale	8432	8523	3,34	8459	8582	-0,1
Principale	8523	8629	-4,5	8582	8617	1,92
Principale	8629	8720	-0,99	8617	8707	3,34
Principale	8720	8788	-0,78	8707	8814	-4,5
Principale	8788	8852	-0,43	8814	8904	-0,99
Principale	8852	8926	-0,13	8904	8973	-0,78
Principale	8926	9021	-0,45	8973	9037	-0,43
Principale	9021	9125	-0,98	9037	9116	-0,13
Principale	9125	9203	-0,55	9116	9196	-0,43
Principale	9203	9326	0,42	9196	9285	0,03
Principale	9326	9362	-0,83	9285	9365	-1,82
Principale	9362	9418	-0,24	9365	9408	-0,55
Principale	9418	9506	-0,4	9408	9462	0,08
Principale	9506	9629	0,13	9462	9495	0,55
Principale	9629	9766	0,25	9495	9521	0,2
Principale	9766	9838	0,35	9521	9609	0,43
Principale	9838	9918	-0,12	9609	9647	-0,82
Principale	9918	9951	0,58	9647	9703	-0,24
Principale	9951	10010	-0,32	9703	9790	-0,4
Principale	10010	10104	0,01	9790	9913	0,13
Principale	10104	10178	0,15	9913	10050	0,25
Principale	10178	10332	-0,15	10050	10122	0,35
Principale	10332	10382	1,95	10122	10202	-0,12
Principale	10382	10412	1,52	10202	10234	0,59
Principale	10412	10454	1,16	10234	10295	-0,31
Principale	10454	10485	-0,1	10295	10390	0,01
Principale	10485	10520	1,28	10390	10466	0,15

Linea	Binario 1 Up			Binario 2 Down		
	Da [m]	A [m]	Pendenza [%]	Da [m]	A [m]	Pendenza [%]
Principale	10520	10560	-2,64	10466	10633	-0,15
Principale	10560	10611	3,03	10633	10684	1,95
Principale	10611	10800	0,15	10684	10714	1,51
Principale	10800	10914	0,26	10714	10757	1,14
Principale	10914	11007	0,46	10757	10788	-0,1
Principale	11007	11042	1	10788	10821	1,4
Principale	11042	11098	0,95	10821	10861	-2,63
Principale	11098	11184	1,13	10861	10912	3,03
Principale	11184	11256	-0,93	10912	11099	0,15
Principale	11256	11311	0,2	11099	11211	0,25
Principale	11311	11357	0,33	11211	11304	0,47
Principale	11357	11393	-0,31	11304	11339	0,99
Principale	11393	11449	0,99	11339	11397	0,93
Principale	11449	11532	0,48	11397	11478	1,2
Principale	11532	11571	-0,71	11478	11548	-0,96
Principale	11571	11653	-0,2	11548	11604	0,2
Principale	11653	11685	0,07	11604	11651	0,33
Principale	11685	11736	-0,56	11651	11687	-0,31
Principale	11736	11976	-0,19	11687	11743	0,98
Principale				11743	11825	0,5
Principale				11825	11862	-0,71
Principale				11862	11945	-0,21
Principale				11945	11977	0,08
Principale				11977	12028	-0,57
Principale				12028	12170	-0,19
Ramo Michelino	0	44	-0,15	0	45	-0,14
Ramo Michelino	44	163	0,79	45	163	0,79
Ramo Michelino	163	196	0,43	163	197	0,44
Ramo Michelino	196	231	0,56	197	232	0,58
Ramo Michelino	231	284	0,93	232	284	0,91
Ramo Michelino	284	322	0,44	284	322	0,46
Ramo Michelino	322	384	0,79	322	382	0,79
Ramo Michelino	384	418	-0,29	382	415	-0,29
Ramo Michelino	418	446	0,08	415	442	0,06
Ramo Michelino	446	496	-0,15	442	493	-0,13
Ramo Michelino	496	652	-0,37	493	647	-0,37
Ramo Michelino	652	737	-0,2	647	731	-0,22
Ramo Michelino	737	891	-0,39	731	885	-0,4
Ramo Michelino	891	922	-0,67	885	916	-0,6
Ramo Michelino	922	952	-0,29	916	946	-0,32
Ramo Michelino	952	1011	-1,24	946	1005	-1,23
Ramo Michelino	1011	1062	-1,41	1005	1056	-1,42
Ramo Michelino	1062	1101	-0,87	1056	1096	-0,89
Ramo Michelino	1101	1150	0,6	1096	1141	0,71
Ramo Michelino	1150	1187	2,27	1141	1176	2,33
Ramo Michelino	1187	1323	0	1176	1310	0

Tabella 1: Linea Rossa, Profilo Verticale



Linea	Binario 1 Up			Binario 2 Down		
	Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Da [m]	A [m]	Raggio [m]
Principale	8275	8368	∞	8341	8444	∞
Principale	8368	8374	160	8444	8455	235
Principale	8374	8396	∞	8455	8477	∞
Principale	8396	8403	160	8477	8488	235
Principale	8403	8617	∞	8488	8802	∞
Principale	8617	8628	120	8802	8813	120
Principale	8628	8638	∞	8813	8823	∞
Principale	8638	8649	120	8823	8834	120
Principale	8649	8729	∞	8834	8914	∞
Principale	8729	8740	600	8914	8924	600
Principale	8740	8762	∞	8924	8946	∞
Principale	8762	8772	600	8946	8957	600
Principale	8772	8895	∞	8957	9072	∞
Principale	8895	8914	100	9072	9085	500
Principale	8914	8958	∞	9085	9107	∞
Principale	8958	8968	100	9107	9120	500
Principale	8968	8988	∞	9120	9366	∞
Principale	8988	8998	100	9366	9394	25
Principale	8998	9077	∞	9394	9462	∞
Principale	9077	9089	350	9462	9474	50
Principale	9089	9109	∞	9474	9496	∞
Principale	9109	9121	350	9496	9508	50
Principale	9121	9193	∞	9508	9597	∞
Principale	9193	9208	21	9597	9605	80
Principale	9208	9313	∞	9605	9627	∞
Principale	9313	9321	80	9627	9635	80
Principale	9321	9343	∞	9635	10120	∞
Principale	9343	9352	80	10120	10127	100
Principale	9352	9837	∞	10127	10137	∞
Principale	9837	9844	100	10137	10144	300
Principale	9844	9854	∞	10144	10211	∞
Principale	9854	9862	300	10211	10228	100
Principale	9862	9927	∞	10228	10250	∞
Principale	9927	9940	140	10250	10268	100
Principale	9940	9962	∞	10268	10362	∞
Principale	9962	9975	140	10362	10490	292
Principale	9975	10076	∞	10490	10530	∞
Principale	10076	10201	285	10530	10546	228
Principale	10201	10241	∞	10546	10596	∞
Principale	10241	10256	220	10596	10631	25
Principale	10256	10303	∞	10631	10719	∞
Principale	10303	10311	25	10719	10730	650
Principale	10311	10322	∞	10730	10775	∞
Principale	10322	10337	22	10775	10780	36
Principale	10337	10417	∞	10780	10790	∞
Principale	10417	10428	650	10790	10797	36
Principale	10428	10472	∞	10797	10855	∞
Principale	10472	10477	36	10855	10891	30

Linea	Binario 1 Up			Binario 2 Down		
	Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Da [m]	A [m]	Raggio [m]
Principale	10477	10487	∞	10891	11318	∞
Principale	10487	10494	36	11318	11328	420
Principale	10494	10553	∞	11328	11348	∞
Principale	10553	10593	33	11348	11359	420
Principale	10593	10752	∞	11359	11457	∞
Principale	10752	10765	275	11457	11486	25
Principale	10765	10787	∞	11486	11557	∞
Principale	10787	10800	275	11557	11673	143
Principale	10800	10864	∞	11673	11762	∞
Principale	10864	10877	260	11762	11778	85
Principale	10877	10899	∞	11778	11820	∞
Principale	10899	10911	260	11820	11853	80
Principale	10911	11021	∞	11853	12075	∞
Principale	11021	11031	420	12075	12083	650
Principale	11031	11051	∞	12083	12105	∞
Principale	11051	11062	420	12105	12115	650
Principale	11062	11160	∞	12115	12170	∞
Principale	11160	11194	28			
Principale	11194	11266	∞			
Principale	11266	11379	140			
Principale	11379	11468	∞			
Principale	11468	11484	85			
Principale	11484	11528	∞			
Principale	11528	11561	80			
Principale	11561	11783	∞			
Principale	11783	11793	380			
Principale	11793	11815	∞			
Principale	11815	11824	380			
Principale	11824	11878	∞			
Ramo Michelino	0	6	∞	0	6	∞
Ramo Michelino	6	14	35	6	16	28
Ramo Michelino	14	43	∞	16	44	∞
Ramo Michelino	43	54	75	44	54	45
Ramo Michelino	54	349	∞	54	349	∞
Ramo Michelino	349	406	63	349	403	60
Ramo Michelino	406	513	∞	403	514	∞
Ramo Michelino	513	524	250	514	561	250
Ramo Michelino	524	564	∞	561	647	∞
Ramo Michelino	564	575	120	647	662	150
Ramo Michelino	575	639	∞	662	692	∞
Ramo Michelino	639	652	110	692	770	400
Ramo Michelino	652	698	∞	770	1028	∞
Ramo Michelino	698	776	400	1028	1038	600
Ramo Michelino	776	1035	∞	1038	1066	∞
Ramo Michelino	1035	1044	580	1066	1076	500
Ramo Michelino	1044	1073	∞	1076	1120	∞
Ramo Michelino	1073	1082	720	1120	1177	55
Ramo Michelino	1082	1126	∞	1177	1310	∞

Linea	Binario 1 Up			Binario 2 Down		
	Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Da [m]	A [m]	Raggio [m]
Ramo Michelino	1126	1187	59			
Ramo Michelino	1187	1323	∞			

Tabella 2: Linea Rossa, Profilo Orizzontale

Linea	Binario 1 Up		Binario 2 Down	
Linea	Nome	Posizione [m]	Nome	Posizione [m]
Principale	Porta Galliera	8353	Porta Galliera	8505
Principale	Matteotti AV	8685	Matteotti AV	8837
Principale	Zucca	9168	Piazza del Unità	9311
Principale	Liberazione	9907	Liberazione	10070
Principale	Fiera / Aldo Moro	10300	Junction Ramo Fiera	10450
Principale	Junction Ramo Fiera	10450	Fiera / Aldo Moro	10558
Principale	Repubblica	10848	Repubblica	11113
Principale	Centro Zanardi	11437	Centro Zanardi	11700
Principale	S. Donato	11876	S. Donato	12136
Ramo Michelino	Junction Ramo Fiera	0	Junction Ramo Fiera	0
Ramo Michelino	Viale Fiera	623	Viale Fiera	586
Ramo Michelino	Capolinea Michelino	1317	Capolinea Michelino	1272

Tabella 3: Linea Rossa, posizione delle Fermate

Linea	Binario 1 UP			Binario 2 Down		
	Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]	Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]
Principale	8319	8351	50	8341	8499	28
Principale	8351	8980	30	8499	9308	30
Principale	8980	9048	29	9308	9390	15
Principale	9048	9168	30	9390	9492	21
Principale	9168	9243	15	9492	9648	27
Principale	9243	9387	27	9648	10070	50
Principale	9387	9830	50	10070	10109	34
Principale	9830	9994	30	10109	10270	30
Principale	9994	10007	34	10270	10450	40
Principale	10007	10215	50	10450	10552	30
Principale	10215	10297	46	10552	10636	15
Principale	10297	10379	15	10636	10819	17
Principale	10379	10556	17	10819	10887	16
Principale	10556	10625	16	10887	11109	38
Principale	10625	10672	30	11109	11331	35
Principale	10672	10848	34	11331	11413	30
Principale	10848	10910	30	11413	11486	16
Principale	10910	11037	34	11486	11696	30
Principale	11037	11157	30	11696	11850	27
Principale	11157	11230	16	11850	12132	48
Principale	11230	11438	30	12132	12170	30
Principale	11438	11595	27			
Principale	11595	11877	48			
Principale	11877	11878	30			
Ramo Michelino	0	38	30	0	36	23
Ramo Michelino	38	76	32	36	299	47

Linea	Binario 1 UP			Binario 2 Down		
	Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]	Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]
Ramo Michelino	76	340	48	299	394	23
Ramo Michelino	340	435	23	394	409	31
Ramo Michelino	435	678	30	409	585	36
Ramo Michelino	678	901	45	585	647	35
Ramo Michelino	901	935	30	647	887	50
Ramo Michelino	935	1116	38	887	1072	32
Ramo Michelino	1116	1323	23	1072	1310	22

Tabella 4: Linea Rossa, profili di Velocità Massima

#### 4.2. LINEA VERDE

I dati del profilo orizzontale e verticale della Linea Verde sono stati ricavati dai documenti Rif. 2 e Rif. 3. I dati del profilo verticale di binario sinistro sono stati assunti uguali a quelli del binario destro applicando una traslazione media di 88 metri. La posizione degli incroci stradali del binario destro, in cui applicare una riduzione di velocità, è stata ricavata da quella del binario sinistro, applicando una traslazione media di 88 metri.

In prima approssimazione si assume che la progressiva 0 [m] della linea verde sia in corrispondenza della progressiva 9218 [m] della Linea Rossa in direzione Up e della progressiva 9361 [m] della Linea Rossa in direzione Down.

I limiti di velocità della linea sono stati calcolati:

- assumendo una velocità massima di 50 [km/h],
- imponendo una riduzione di velocità in curva pari  $3,6x\sqrt{0,8xR}$ , ove 0,8 è l'accelerazione non compensate ritenuta ammissibile in [m/s<sup>2</sup>] e R il raggio di curva in [m],
- imponendo una riduzione di velocità a 30 [km/h] in corrispondenza degli incroci stradali, da quando la testa del veicolo arriva a 30 [m] dall'inizio dell'incrocio a quando la testa del veicolo raggiunge la posizione finale dell'incrocio.

Binario Destro		
Da [m]	A [m]	Pendenza [%]
0,0	31,7	-0,61
31,7	61,0	-0,83
61,0	93,4	-0,18
93,4	172,7	0,55
172,7	204,8	-0,64
204,8	397,2	-0,48
397,2	504,0	-0,54
504,0	739,1	-0,29
739,1	902,4	-0,13
902,4	1103,6	-0,5
1103,6	1175,7	-0,1

Binario Destro		
Da [m]	A [m]	Pendenza [%]
1175,7	1327,0	-0,47
1327,0	1386,8	-0,76
1386,8	1558,6	0,18
1558,6	1708,5	-0,27
1708,5	1851,1	-6
1851,1	2168,6	-0,04
2168,6	2301,0	6
2301,0	2991,4	-0,44
2991,4	3246,0	-0,35
3246,0	3508,5	-0,4
3508,5	3958,5	0,02
3958,5	4439,2	-0,42
4439,2	4550,4	0,73
4550,4	5155,6	-0,04
5155,6	5288,2	-1,19
5288,2	5421,7	1,01
5421,7	5506,4	0,32

Tabella 5: Linea Verde, Profilo Verticale

Binario Sinistro				Binario Destro			
Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Curva	Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Curva
0,0	17,4	∞		0,0	3,6	∞	
17,4	58,3	25	SX1	3,6	15,4	25	DX1
58,3	68,9	∞		15,4	25,4	∞	
68,9	109,2	25	SX2	25,4	52,2	25	DX2
109,2	174,7	∞		52,2	57,5	∞	
174,7	206,9	200	SX3	57,5	67,3	25	DX3
206,9	239,2	200	SX4	67,3	151,0	∞	
239,2	285,5	∞		151,0	201,0	25	DX4
285,5	305,7	205	SX5	201,0	262,8	∞	
305,7	325,8	200	SX6	262,8	295,1	670	DX5
325,8	332,9	∞		295,1	327,3	660	DX6
332,9	373,1	506,2	SX7	327,3	373,5	∞	
373,1	383,7	∞		373,5	393,5	280	DX7
383,7	500,4	353,8	SX8	393,5	413,6	287	DX8
500,4	574,8	∞		413,6	420,7	∞	
574,8	623,9	350	SX9	420,7	460,7	503	DX9
623,9	658,0	∞		460,7	471,5	∞	
658,0	691,5	400	SX10	471,5	589,0	357	DX10
691,5	753,2	∞		589,0	649,2	∞	
753,2	785,5	520	SX11	649,2	751,7	500	DX11
785,5	817,7	530	SX12	751,7	841,3	∞	
817,7	978,0	∞		841,3	873,4	630	DX12
978,0	1053,5	250	SX13	873,4	906,0	630	DX13
1053,5	1118,3	∞		906,0	1066,4	∞	
1118,3	1151,9	300	SX14	1066,4	1141,9	250	DX14
1151,9	1226,1	∞		1141,9	1168,4	∞	
1226,1	1288,0	100	SX15	1168,4	1202,0	300	DX15

Binario Sinistro				Binario Destro			
Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Curva	Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Curva
1288,0	1297,6	∞		1202,0	1313,4	∞	
1297,6	1327,6	250	SX16	1313,4	1375,3	100	DX16
1327,6	1358,1	200	SX17	1375,3	1392,9	∞	
1358,1	1447,2	∞		1392,9	1426,4	1000	DX17
1447,2	1479,3	1180	SX18	1426,4	1543,7	∞	
1479,3	1511,4	200	SX19	1543,7	1569,7	138	DX18
1511,4	1546,4	∞		1569,7	1595,8	83	DX19
1546,4	1579,3	170	SX20	1595,8	1633,1	∞	
1579,3	1611,5	150	SX21	1633,1	1665,6	540	dx20
1611,5	1724,5	∞		1665,6	1698,3	420	DX21
1724,5	1763,0	250	SX22	1698,3	1811,0	∞	
1763,0	1831,8	∞		1811,0	1849,4	250	DX22
1831,8	1865,6	500	SX23	1849,4	1918,0	∞	
1865,6	1890,6	∞		1918,0	1951,8	500	DX23
1890,6	1946,6	3000	SX24	1951,8	1976,7	∞	
1946,6	2016,8	∞		1976,7	2032,6	3000	DX24
2016,8	2060,6	7000	SX25	2032,6	2102,8	∞	
2060,6	2122,9	∞		2102,8	2146,6	7000	DX25
2122,9	2156,0	10000	SX26	2146,6	2208,9	∞	
2156,0	2176,0	∞		2208,9	2242,1	10000	DX26
2176,0	2268,9	450	SX27	2242,1	2261,7	∞	
2268,9	2277,6	∞		2261,7	2354,7	450	DX27
2277,6	2302,0	130	SX28	2354,7	2363,6	∞	
2302,0	2329,0	165	SX29	2363,6	2386,8	2000	DX28
2329,0	2384,7	∞		2386,8	2456,1	∞	
2384,7	2436,9	250	SX30	2456,1	2494,4	200	DX29
2436,9	2445,2	∞		2494,4	2536,3	∞	
2445,2	2486,2	75	SX31	2536,3	2568,5	53	DX30
2486,2	2493,5	∞		2568,5	2580,6	∞	
2493,5	2527,6	100	SX32	2580,6	2614,6	100	DX31
2527,6	2557,5	∞		2614,6	2642,6	∞	
2557,5	2616,1	205	SX33	2642,6	2701,3	215	DX32
2616,1	2648,3	300	SX34	2701,3	2778,2	∞	
2648,3	2692,6	∞		2778,2	2895,7	270	DX33
2692,6	2725,6	140	SX35	2895,7	3029,4	∞	
2725,6	2737,1	∞		3029,4	3117,5	400	DX34
2737,1	2805,6	250	SX36	3117,5	3149,9	240	DX35
2805,6	2943,3	∞		3149,9	3182,9	240	DX36
2943,3	3031,4	400	SX37	3182,9	3217,7	∞	
3031,4	3137,1	∞		3217,7	3251,3	60	DX37
3137,1	3172,0	60	SX38	3251,3	3289,0	∞	
3172,0	3200,8	∞		3289,0	3321,0	2000	DX38
3200,8	3232,8	2000	SX39	3321,0	3523,5	∞	
3232,8	3304,0	∞		3523,5	3558,3	3000	DX39
3304,0	3336,5	240	SX40	3558,3	3817,7	∞	
3336,5	3368,6	235	SX41	3817,7	3871,0	180	DX40
3368,6	3403,9	∞		3871,0	3978,6	∞	
3403,9	3436,0	230	SX42	3978,6	4005,6	500	DX41

Binario Sinistro				Binario Destro			
Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Curva	Da [m]	A [m]	Raggio [m]	Curva
3436,0	3468,1	250	SX43	4005,6	4065,7	∞	
3468,1	3543,4	∞		4065,7	4099,9	300	DX42
3543,4	3576,2	250	SX44	4099,9	4135,1	480	DX43
3576,2	3609,3	250	SX45	4135,1	4171,0	∞	
3609,3	3648,9	∞		4171,0	4206,2	300	DX44
3648,9	3681,9	250	SX46	4206,2	4241,4	300	DX45
3681,9	3714,9	250	SX47	4241,4	4273,8	∞	
3714,9	3730,2	∞		4273,8	4322,4	22	DX46
3730,2	3783,6	180	SX48	4322,4	4387,5	∞	
3783,6	3891,5	∞		4387,5	4420,1	23	DX47
3891,5	3918,5	500	SX49	4420,1	4460,2	∞	
3918,5	4022,5	∞		4460,2	4528,9	79,3	DX48
4022,5	4054,8	800	SX50	4528,9	4557,5	∞	
4054,8	4190,2	∞		4557,5	4590,2	1200	DX49
4190,2	4238,8	22	SX51	4590,2	4623,0	1200	DX50
4238,8	4304,0	∞		4623,0	4673,6	∞	
4304,0	4339,3	26	SX52	4673,6	4715,1	23	DX51
4339,3	4376,1	∞		4715,1	4845,7	∞	
4376,1	4448,3	82,8	SX53	4845,7	4894,3	25	DX52
4448,3	4474,0	∞		4894,3	5134,6	∞	
4474,0	4506,2	1200	SX54	5134,6	5180,6	103,2	DX53
4506,2	4538,3	1200	SX55	5180,6	5268,6	∞	
4538,3	4587,7	∞		5268,6	5324,0	50	DX54
4587,7	4633,2	26	SX56	5324,0	5398,0	∞	
4633,2	4754,5	∞		5398,0	5445,4	80	DX55
4754,5	4803,2	25	SX57	5445,4	5524,9	∞	
4803,2	5036,2	∞					
5036,2	5081,2	100	SX58				
5081,2	5173,3	∞					
5173,3	5228,7	50	SX59				
5228,7	5304,5	∞					
5304,5	5351,9	80	SX60				
5351,9	5431,2	∞					

Tabella 6: Linea Verde, Profilo Orizzontale

Binario Sinistro			Binario Destro		
Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]	Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]
0,0	17,4	50,0	0,0	3,6	50,0
17,4	45,0	16,1	3,6	15,4	16,1
45,0	58,3	16,1	15,4	25,4	50,0
58,3	68,9	30,0	25,4	52,2	16,1
68,9	109,2	16,1	52,2	57,5	50,0
109,2	128,0	30,0	57,5	67,3	16,1
128,0	174,7	30,0	67,3	120,0	50,0
174,7	204,0	30,0	120,0	151,0	30,0
204,0	209,0	45,5	151,0	173,0	16,1
209,0	239,2	30,0	173,0	201,0	16,1
239,2	285,5	30,0	201,0	245,0	30,0

Binario Sinistro			Binario Destro		
Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]	Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]
285,5	305,7	30,0	245,0	297,0	50,0
305,7	325,8	30,0	297,0	396,0	30,0
325,8	355,0	30,0	396,0	420,0	50,0
355,0	430,0	30,0	420,0	471,0	30,0
430,0	470,0	50,0	471,0	558,0	50,0
470,0	590,0	30,0	558,0	631,0	30,0
590,0	635,0	30,0	631,0	632,0	50,0
635,0	638,0	50,0	632,0	676,0	30,0
638,0	794,0	30,0	676,0	726,0	50,0
794,0	1023,0	50,0	726,0	835,0	30,0
1023,0	1148,0	30,0	835,0	1111,0	50,0
1148,0	1226,1	30,0	1111,0	1189,0	30,0
1226,1	1230,0	30,0	1189,0	1209,0	50,0
1230,0	1288,0	32,2	1209,0	1271,0	30,0
1288,0	1327,6	50,0	1271,0	1313,4	50,0
1327,6	1358,1	45,5	1313,4	1375,3	32,2
1358,1	1479,3	50,0	1375,3	1543,7	50,0
1479,3	1481,0	45,5	1543,7	1569,0	37,8
1481,0	1511,4	30,0	1569,0	1569,7	30,0
1511,4	1546,4	30,0	1569,7	1595,8	29,3
1546,4	1579,3	30,0	1595,8	1671,0	30,0
1579,3	1611,5	30,0	1671,0	2159,0	50,0
1611,5	1630,0	30,0	2159,0	2221,0	30,0
1630,0	2071,0	50,0	2221,0	2312,0	50,0
2071,0	2180,0	30,0	2312,0	2400,0	30,0
2180,0	2224,0	50,0	2400,0	2456,1	50,0
2224,0	2277,6	30,0	2456,1	2494,4	45,5
2277,6	2302,0	30,0	2494,4	2503,0	50,0
2302,0	2329,0	30,0	2503,0	2536,3	30,0
2329,0	2359,0	30,0	2536,3	2557,0	23,4
2359,0	2415,0	50,0	2557,0	2568,5	23,4
2415,0	2445,2	30,0	2568,5	2580,6	50,0
2445,2	2486,2	27,9	2580,6	2614,6	32,2
2486,2	2493,5	30,0	2614,6	2642,6	50,0
2493,5	2516,0	30,0	2642,6	2701,3	47,2
2516,0	2527,6	32,2	2701,3	2703,0	50,0
2527,6	2557,5	50,0	2703,0	2771,0	30,0
2557,5	2615,0	46,1	2771,0	2958,0	50,0
2615,0	2616,1	30,0	2958,0	3014,0	30,0
2616,1	2692,6	30,0	3014,0	3117,5	50,0
2692,6	2725,6	30,0	3117,5	3158,0	49,9
2725,6	2730,0	30,0	3158,0	3182,9	30,0
2730,0	2870,0	50,0	3182,9	3217,7	30,0
2870,0	2973,0	30,0	3217,7	3231,0	24,9
2973,0	3070,0	50,0	3231,0	3251,3	24,9
3070,0	3137,1	30,0	3251,3	3304,0	30,0
3137,1	3172,0	24,9	3304,0	3406,0	50,0
3172,0	3190,0	30,0	3406,0	3496,0	30,0



Binario Sinistro			Binario Destro		
Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]	Da [m]	A [m]	Velocità [km/h]
3190,0	3263,0	30,0	3496,0	3528,0	50,0
3263,0	3304,0	50,0	3528,0	3614,0	30,0
3304,0	3318,0	49,9	3614,0	3731,0	30,0
3318,0	3336,5	30,0	3731,0	3817,7	50,0
3336,5	3368,6	30,0	3817,7	3842,0	43,2
3368,6	3403,9	30,0	3842,0	3871,0	30,0
3403,9	3436,0	30,0	3871,0	3871,0	43,2
3436,0	3455,0	30,0	3871,0	4080,0	50,0
3455,0	3573,0	30,0	4080,0	4171,0	30,0
3573,0	3690,0	30,0	4171,0	4248,0	50,0
3690,0	3730,2	50,0	4248,0	4273,8	30,0
3730,2	3754,0	43,2	4273,8	4310,0	15,1
3754,0	3783,6	30,0	4310,0	4322,4	15,1
3783,6	3830,0	30,0	4322,4	4362,0	50,0
3830,0	3992,0	50,0	4362,0	4387,5	30,0
3992,0	4130,0	30,0	4387,5	4410,0	15,4
4130,0	4160,0	50,0	4410,0	4420,1	15,4
4160,0	4190,2	30,0	4420,1	4460,2	50,0
4190,2	4238,8	15,1	4460,2	4494,0	28,7
4238,8	4269,0	30,0	4494,0	4528,9	28,7
4269,0	4274,0	50,0	4528,9	4556,0	30,0
4274,0	4304,0	30,0	4556,0	4575,0	50,0
4304,0	4339,3	16,4	4575,0	4673,6	30,0
4339,3	4369,0	30,0	4673,6	4693,0	15,4
4369,0	4376,1	50,0	4693,0	4715,1	15,4
4376,1	4406,0	29,3	4715,1	4823,0	50,0
4406,0	4448,3	29,3	4823,0	4845,7	30,0
4448,3	4515,0	30,0	4845,7	4874,0	16,1
4515,0	4587,7	30,0	4874,0	4894,3	16,1
4587,7	4633,2	16,4	4894,3	5008,0	50,0
4633,2	4652,0	30,0	5008,0	5081,0	30,0
4652,0	4735,0	50,0	5081,0	5094,0	50,0
4735,0	4754,5	30,0	5094,0	5134,6	30,0
4754,5	4803,2	16,1	5134,6	5180,6	30,0
4803,2	4833,0	30,0	5180,6	5243,0	30,0
4833,0	4920,0	50,0	5243,0	5268,6	50,0
4920,0	5036,2	30,0	5268,6	5324,0	22,8
5036,2	5040,0	30,0	5324,0	5398,0	50,0
5040,0	5081,2	30,0	5398,0	5445,4	28,8
5081,2	5173,3	30,0	5445,4	5524,9	50,0
5173,3	5202,0	22,8			
5202,0	5228,7	22,8			
5228,7	5304,5	50,0			
5304,5	5351,9	28,8			
5351,9	5431,2	50,0			

Tabella 7: Linea Verde, Limiti di Velocità

Binario Sinistro		Binario Destro	
Posizione	Codice	Posizione	Codice
268,0	Fermata 1	356,0	Fermata 1
735,2	Fermata 2	823,3	Fermata 2
1174,5	Fermata 3	1262,9	Fermata 3
1528,9	Fermata 4	1615,6	Fermata 4
2346,9	Fermata 5	2432,2	Fermata 5
2673,4	Fermata 6	2760,7	Fermata 6
3113,6	Fermata 7	3199,9	Fermata 7
3386,4	Fermata 8	3474,5	Fermata 8
3627,0	Fermata 9	3714,9	Fermata 9
4066,4	Fermata 10	4153,5	Fermata 10
4560,8	Fermata 11	4655,4	Fermata 11
4982,2	Fermata 12	5076,7	Fermata 12
5410,7	Fermata 13	5504,4	Fermata 13

**Tabella 8: Linea Verde, Posizione delle fermate**

Binario Sinistro			Binario Destro		
Da [m]	A [m]	Descrizione	Da [m]	A [m]	Descrizione
1620	2212	Autostrada Adriatica	1708	2300	Autostrada Adriatica

**Tabella 9: Linea Verde, Tratti in Sottopasso**

Binario Sinistro		
Da [m]	A [m]	Descrizione
28	98	Piazza Unità - Via Mazza (mod. impianto linea Rossa)
109	174	via Corticella - via Torreggiani
239	325	via Corticella - via Magenta - Fermata Poliziano
362	400	via Corticella - via Cignani
500	560	via Corticella - via Calvart - via Mitelli
574	605	via Corticella - via Barbieri - via Lombardi
668	764	via Corticella - via Passarotti - Fermata Ippodromo
1053	1118	via Corticella - via Bassanelli
1151	1200	via Corticella - fermata Bassanelli
1511	1600	via Corticella - via Giuriolo - via di Saliceto - Fermata Saliceto
2101	2150	via Corticella - Attr. Pedonale via Giusti
2254	2329	via Corticella - via Marziale - via della Croce Coperta
2445	2486	via Corticella - via Stendhal
2645	2700	Fermata Pinardi
2900	2943	via Corticella - via Roncaglio
3100	3160	Fermata Fiammella - Centro Commerciale
3172	3233	via Corticella - via Fiammelli
3348	3425	Fermata Corticella
3470	3543	via Bentini - via Corticella - via Lipparini
3554	3660	Fermata Bentini - via Corticella
3784	3800	via Bentini - via Marescalchi - via Colombarola
4022	4100	Fermata Gorki
4190	4239	via S. Anna - via Bentini
4304	4339	via S. Anna - via London
4436	4485	via S. Anna - via Goethe
4517	4622	via Byron - via S. Anna - Fermata S. Anna/Byron

Binario Sinistro		
Da [m]	A [m]	Descrizione
4765	4803	via Shakspeare - via Byron
4950	5010	Fermata Shakspeare
5036	5172	via Bentini - Attr. Pedonale

Tabella 10: Linea Verde, Incroci Stradali

## 5. DATI DEL MATERIALE ROTABILE

La Tabella 11 riporta i dati del veicolo, ricavati da Rif. 1. I dati in giallo sono stati ipotizzati.

Descrizione	Valore
Massa a vuoto [kg]	43000
Massa trasportata [kg]	21000
Lunghezza [m]	33,3
Velocità massima [km/h]	75
Masse rotanti [% della massa a vuoto]	6
Efficienza complessiva	0,856
Potenza media servizi ausiliari [kW]	90 +125 (caricabatterie)
Tipo di frenatura	Rigenerativa
Velocità minima per frenatura a recupero [km/h]	5
Accelerazione di servizio massima [m/s <sup>2</sup> ]	1,2
Decelerazione di servizio massima [m/s <sup>2</sup> ]	1,3
Tensione nominale [V]	750
Tensione minima di funzionamento [V]	500
Tensione massima di funzionamento [V]	1000

Tabella 11: Dati del Tram

La forza resistente al moto in piano e rettilineo è definita tramite la seguente formula:

$$R = A + B \times V + C \times V^2$$

ove:

- R è la forza resistente al moto in [N]
- V è la velocità in [m/s]
- A, B e C sono i coefficienti che caratterizzano ciascun veicolo e i cui valori sono riportati in Tabella 12. Nelle sezioni in tunnel il coefficiente quadratico C è moltiplicato per due.

Parametro	Valore
A [N]	1189,6
B [N / (m/s)]	32,3
C [N / (m/s) <sup>2</sup> ]	4,71

Tabella 12: Dati del Tram, coefficienti per il calcolo della resistenza al moto

La Figura 2 e la Figura 3 mostrano la forza di trazione e le forze di frenatura del veicolo al cerchione.

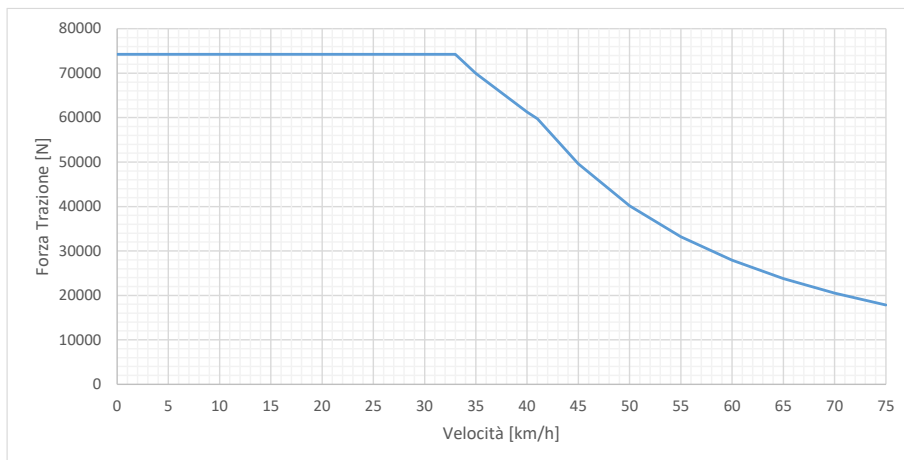


Figura 2: Forza di trazione al cerchione e forza resistente al moto in piano e rettilineo

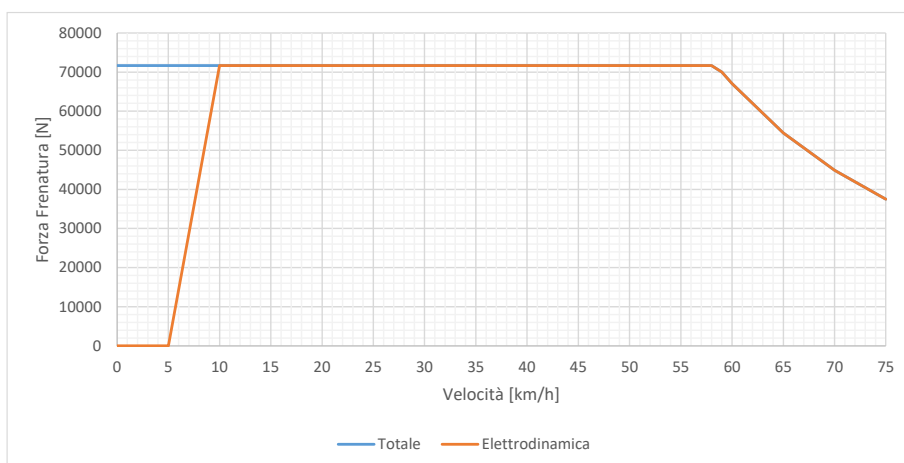


Figura 3: Forza di frenatura totale ed elettrodinamica al cerchione

La corrente massima di trazione è pari a 1060 [A] per livelli di tensione maggiori di 600 [V]. Il valore massimo della corrente di trazione decresce linearmente da 1060 [A] @ 600 [V] a 0 [A] @ 500 [V]. I carichi dei servizi ausiliari non hanno alcuna limitazione in funzione della tensione di linea.

La corrente massima rigenerata dai treni, al netto dei servizi ausiliari, è pari a 1116 [A] @ 900 [V]. Si assume che il valore massimo della corrente rigenerabile scenda linearmente da 1116 [A] @ 900 [V] a 0 [A] @ 950 [V].

Per i treni si assume una potenza aggiuntiva dei servizi ausiliari pari a 125 [kW] per tenere conto del carico dei caricabatteria del sistema di accumulo di energia a bordo treno (da Rif. 1 la potenza massima del sistema di accumulo di bordo in carica e scarica è pari a 250 [kW]).

Al capolinea della Linea Verde (Fermata 13) si assume che per un periodo di 180 [s] il tram effettui il carico delle batterie alla massima potenza di 250 [kW].

## 6. DATI ESERCIZIO

La velocità massima di esercizio della linea è di 50 [km/h].

Linea / Direzione	Origine/destinazione	Cadenzamento
Rossa Up	Porta Galliera / San Donato	8 minuti (480 secondi)
Rossa Down	San donato / Porta Galliera	8 minuti (480 secondi)
Rossa Up	Porta Galliera / Capolinea Michelino	8 minuti (480 secondi)
Rossa Down	Capolinea Michelino / Ponte Galliera	8 minuti (480 secondi)
Verde / Up	Porta Galliera / Capolinea Nord	5 minuti (300 secondi)
Verde /Down	Capolinea Nord / Porta Galliera	5 minuti (300 secondi)

Tabella 13: Linee Commerciali

Si assume che i veicoli della Linea Verde percorrano la Linea Rossa dalla fermata di Porta Galliera alla fermata di Zucca in direzione Up (binario destro) e dalla fermata di Piazza dell'Unità a Ponte Galliera in direzione Down (binario sinistro).

Il tempo medio di sosta alle fermate è assunto pari a 20 [s].

Il tempo minimo di inversione ai capolinea è assunto pari a 180 [s].

Per ciascuna configurazione della rete elettrica di alimentazione è stato scelto di eseguire 10 simulazioni al variare del tempo di immissione in linea dei veicoli sul Binario Dx Up, con un incremento di 48 [s] ad ogni simulazione.

## 7. DATI DEL SISTEMA ELETTRICO DI ALIMENTAZIONE

La Figura 4 mostra lo schema semplificato del circuito positivo. Sulla linea verde è presente una zona senza Linea di Contatto dalla progressiva 4+154 alla progressiva 5+076 del binario destro, ovvero dalla Fermata 10 alla Fermata 12.

La SSE 9 della Linea Rossa è collegata alla zona oggetto di simulazione tramite i soli feeder di rinforzo. In corrispondenza della SSE 9 è stato introdotto un carico costante di 1600 [kW] per tenere in conto la circolazione dei treni nei pressi della SSE stessa.

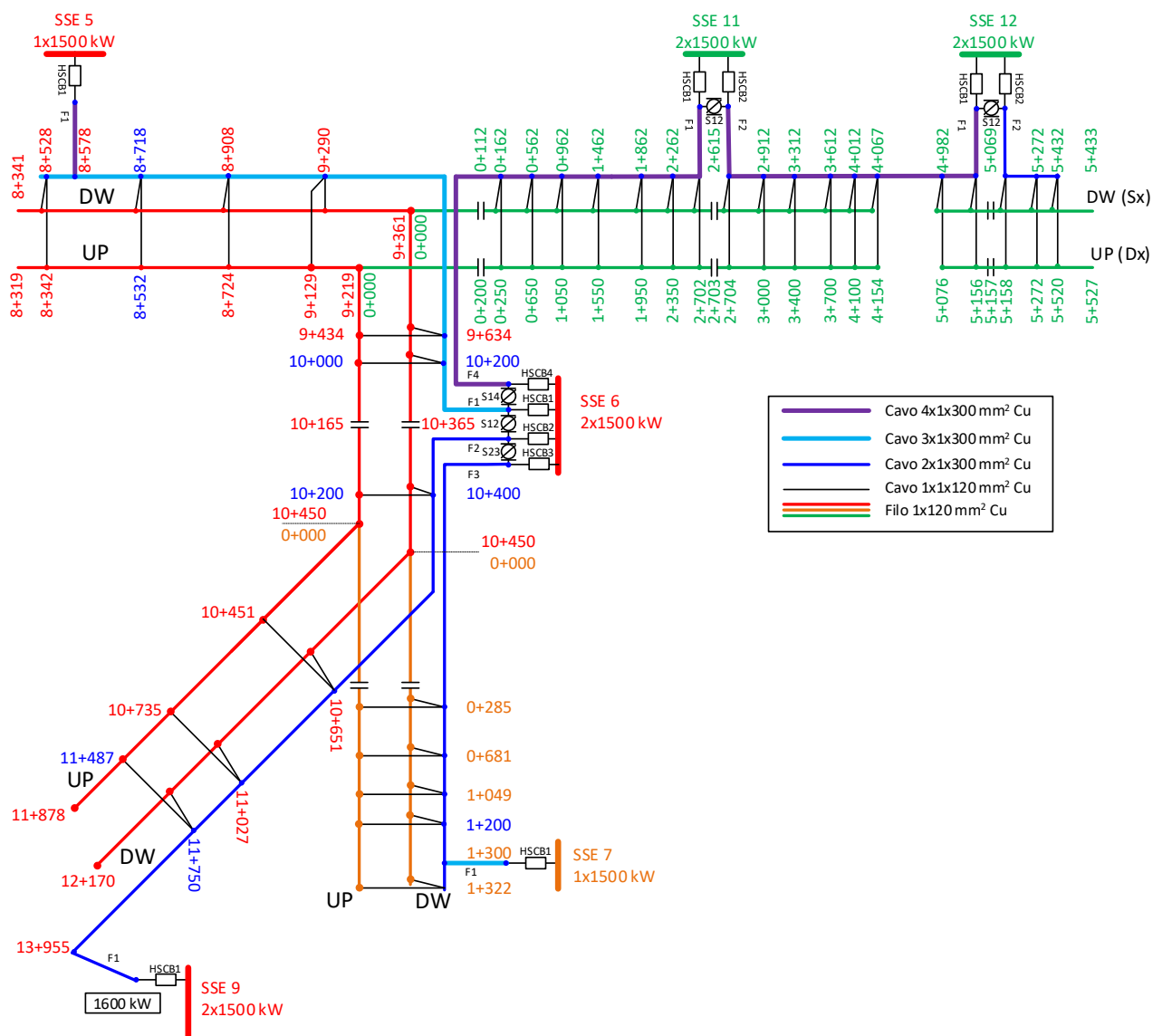


Figura 4: Schema semplificato del circuito positivo

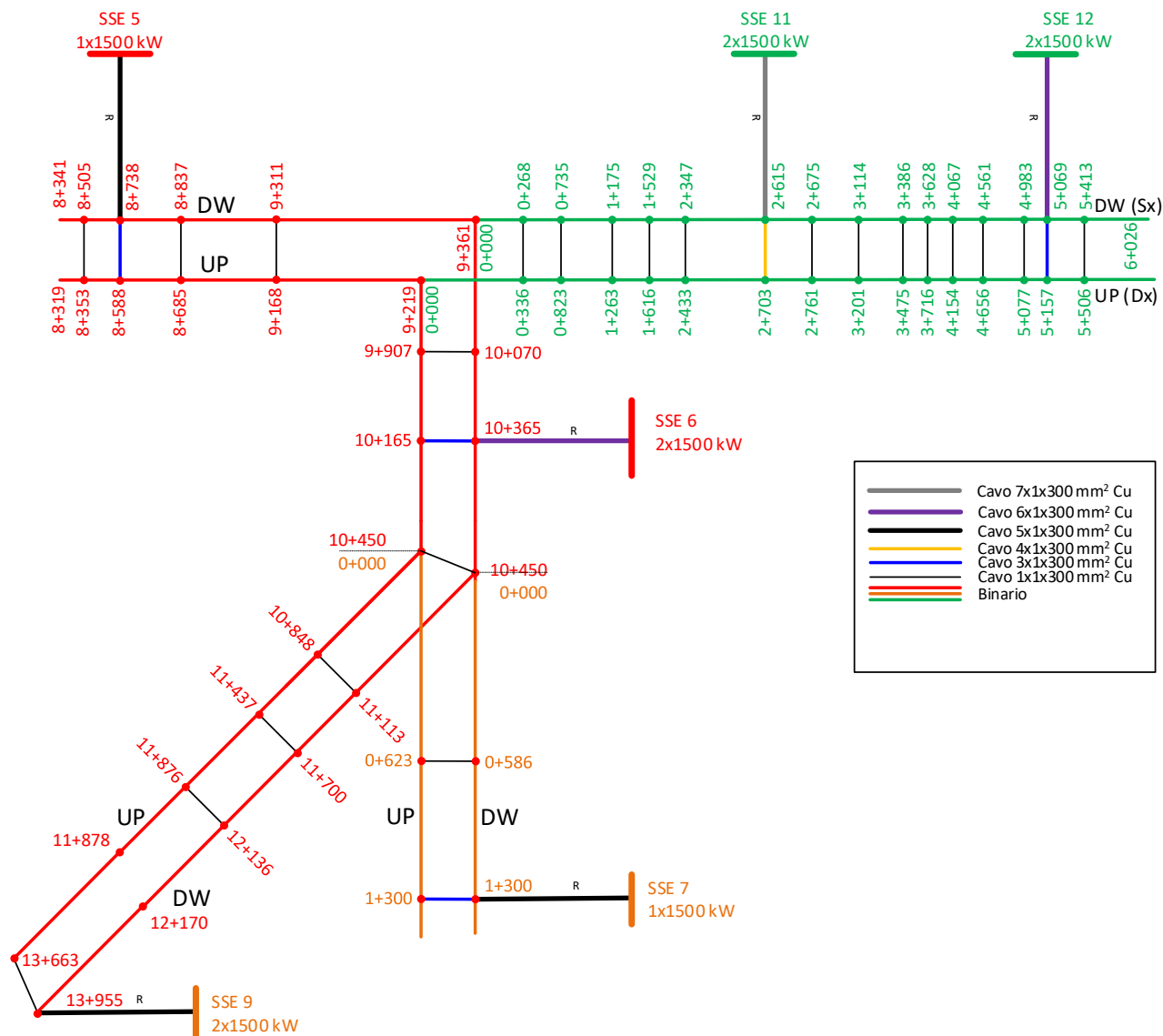


Figura 5: Schema semplificato del circuito negativo



## 7.1. DATI CAVI E CONDUTTORI

La Tabella 14 riporta i valori della resistenza per unità di lunghezza dei conduttori utilizzati nel sistema di alimentazione.

Tipo	Sezione nominale [mm <sup>2</sup> ]	Resistenza a 20°C [Ω/km]	Usura media [%]	Temperatura di esercizio [°C]	Resistenza alla temperatura di esercizio con usura [Ω/km]	Portata in condizioni di regime [A]
Filo di contatto Cu ETP AC	1x120 Cu	0,153	20	60	0,2206	320 (in aria)
Cavo per Alimentatore Negativo 0,6/1 kV	1x300 Cu	0,0610	-	80	0,0754	429 (in tubo interrato)
Cavo per Feeder di rinforzo e alimentatori positivi 1,8/3 kV,	1x300 Cu	0,0610	-	80	0,0754	429 (in tubo interrato)
Cavo per Collegamenti feeder – filo	1x120 Cu	0,1525	-	80	0,1885	487 (in aria)

Tabella 14: conduttori del sistema di alimentazione

## 7.2. SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE E GRUPPI DI CONVERSIONE

La Tabella 15 riporta i dati caratteristici dei gruppi trasformatore-raddrizzatori presenti lungo linea (vedi Figura 4).

Descrizione	Valore
<b>Trasformatore</b>	
Potenza nominale [kVA]	1900/965/965
Tensione primaria [kV]	15
Tensione secondaria [V]	590
Vcc tra primario e un secondario (su base metà potenza primaria) [%]	10
Vcc tra i due secondari (su metà base primario) [%]	1
K rapporto di reattanza	maggiore di 0,9
Perdite a vuoto [kW]	< 4,2
Perdite a carico (75°C) [kW]	< 15,5
<b>Raddrizzatore</b>	
Tipo	Dodecafase Parallelo
Potenza nominale [kW]	1500
Tensione a vuoto raddrizzata [V]	796
Tensione nominale [V]	750
Corrente nominale [A]	2000
Classe di servizio	VI CEI EN60146

Tabella 15: Dati caratteristici dei gruppi di conversione

La tensione a vuoto è pari a 796 [V] e la resistenza equivalente nella prima zona di lavoro è assunta pari a 0,0223 [Ω].

La distanza delle SSE dalla Linea è assunta pari a 100 metri.

La Tabella 16 riporta la consistenza degli alimentatori positivi e negativi delle SSE. In corrispondenza del punto di connessione dell'alimentatore negativo al binario, è previsto un collegamento in cavo tra i due binari costituito da  $3 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$  con una lunghezza di 5 metri, tranne in corrispondenza della SSE11 della Linea Verde ove il collegamento in cavo è costituito da  $4 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ .

Linea	SSE	Alimentatore	Tipo
Rossa	SSE5	F1	$4 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		R	$5 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
Rossa	SSE6	F1	$3 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		F2	$2 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		F3	$2 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		F4	$4 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		R	$6 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
Rossa	SSE7	F1	$3 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		R	$5 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
Verde	SSE11	F1	$4 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		F2	$4 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		R	$7 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
Verde	SSE12	F1	$4 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		F2	$2 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$
		R	$6 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$

Tabella 16: Alimentatori delle SSE

### 7.3. CIRCUITO POSITIVO

La linea di contatto di ciascun binario è costituita da un singolo filo di tipo Cu-ETP-AC di sezione nominale di  $120 [\text{mm}^2]$  (vedi Tabella 14).

La corrente massima ammissibile nella linea di contatto è assunta pari a  $320 [\text{A}]$ , assumendo una temperatura ambiente di  $40 [^\circ\text{C}]$ , una sovra temperatura di  $35 [^\circ\text{C}]$  e un'usura del  $30 [\%]$ .

È previsto un feeder di rinforzo positivo in parallelo alla linea, costituito da cavi di tipo FG16M16 in parallelo a tutte le sezioni di linea di contatto (vedi Tabella 17). I punti di collegamento del feeder di rinforzo alla linea di contatto sono mostrati in Figura 4.

Linea	Da [m]	A [m]	Tipo	Commento
Rossa	8528	10365	3x1x300	
Rossa/verde	9361	10365	4x1x300	F3 verso la linea Verde
Rossa	10366	13935	2x1x300	
Rossa Michelino	0	1400	2x1x300	
Verde	0	5117	4x1x300	
Verde	5117	5520	2x1x300	

Tabella 17: Feeder di Rinforzo in parallelo alla linea

#### 7.4. CIRCUITO NEGATIVO

Il circuito di ritorno Rif. 1 è costituito dal parallelo delle due rotaie, la cui resistenza è assunta pari a 0.019 [ $\Omega$ /km]. La conduttanza verso terra del binario è assunta pari a 0,05 [S/km]

Si assume (Figura 5) che i due binari siano collegati tra loro in corrispondenza delle SSE e di tutte le fermate presenti sul percorso.

#### 7.5. CONDIZIONI DI DEGRADO

La Tabella 18 elenca le condizioni di degrado che sono prese in considerazione nello studio di trazione, che ha lo scopo di verificare il corretto dimensionamento della Linea Verde:

- in caso di Normale Funzionamento (NF) del sistema, la Linea Rossa e la Linea Verde sono alimentate in parallelo tramite l'alimentatore F3 della SSE 6 Rossa;
- nel caso di fuori servizio della SSE 6 Rossa (configurazione D1) la Linea Verde fornisce alimentazione alla sezione delle Linea Rossa compresa tra la SSE 5 e la SSE 6;
- non sono prese in considerazione le condizioni di fuori servizio della SSE 5 Rossa e della SSE 7 Rossa, che richiedono l'implementazione di un modello più esteso della Linea Rossa.

SSE	Configurazione			
	NF	D1 (SSE6-OUT)	D2 (SSE11-OUT)	D3 (SSE12-OUT)
SSE 5 Rossa	1x1500 kW	1x1500 kW	1x1500 kW	1x1500 kW
SSE 6 Rossa	1x1500 kW	OUT	2x1500 kW	1x1500 kW

SSE	Configurazione			
	NF	D1 (SSE6-OUT)	D2 (SSE11-OUT)	D3 (SSE12-OUT)
SSE 7 Rossa	1x1500 kW	1x1500 kW	1x1500 kW	1x1500 kW
SSE 9 Rossa	1x1500 kW	1x1500 kW	1x1500 kW	1x1500 kW
SSE 11 Verde	1x1500 kW	1x1500 kW	OUT	2x1500 kW
SSE 12 Verde	1x1500 kW	1x1500 kW	2x1500 kW	OUT
Stato Interruttori	-	Rossa.SSE6.HSCB1 Aperto Rossa.SSE6.HSCB2 Aperto Rossa.SSE6.HSCB3 Aperto Rossa.SSE6.HSCB4 Aperto	Verde.SSE11.HSCB1 Aperto Verde.SSE11.HSCB2 Aperto	Verde.SSE12.HSCB1 Aperto Verde.SSE12.HSCB2 Aperto
Stato Sezionatori	-	Rossa.SSE6.S23 Chiuso Rossa.SSE6.S14 Chiuso	Verde.SSE11.S12 Chiuso	Verde.SSE12.S12 Chiuso

Tabella 18: Condizioni di Degrado

## 7.6. MODIFICHE DA APPORTARE ALLA LINEA ROSSA

A seguito della costruzione della Linea Verde è previsto un aumento di traffico sulla Linea Rossa nella sezione da Porta Galliera a Piazza dell'Unità in cui circolano in entrambe le direzione di marcia i veicoli della Linea Rossa ed i veicoli della Linea Verde.

È inoltre da precisare che il modello della Linea Rossa, ricavato dal documento Rif. 1, è funzionale alla verifica del corretto dimensionamento della Linea Verde:

1. le sole sezioni modellate della Linea Rossa sono mostrate in Figura 4 e Figura 5;
2. la SSE 9 Rossa è inserita nel modello e collegata al resto del sistema tramite il solo feeder di rinforzo. Un carico costante da 1800 [kW] è inserito in corrispondenza della SSE9 Rossa per tenere conto della circolazione nelle sezioni di linea afferenti;
3. non sono presi in considerazione i fuori servizio della SSE 5 Rossa, della SSE7 Rossa e della SSE9 Rossa;
4. non è modellata la SSE 10 Rossa, elettricamente lontana dalla Linea Verde.

A seguito dell'analisi dei risultati preliminari delle simulazioni sono state apportate alcune modifiche rispetto a quanto descritto in Rif. 1:

- la taglia dei raddrizzatori nelle SSE della linea Rossa è da 1500 [kW]:
  - SSE 5 Rossa con due gruppi da 1500 [kW] (uno solo in servizio in normale funzionamento),
  - SSE 6 Rossa con due gruppi da 1500 [kW] (uno solo in servizio in normale funzionamento),

- SSE 7 Rossa con due gruppi da 1500 [kW] (uno solo in servizio in normale funzionamento),
  - SSE 9 Rossa con due gruppi da 1500 [kW]. (uno solo in servizio in tutte le configurazioni analizzate)
- il feeder di rinforzo in parallelo alla linea di contatto dalla *SSE 5 Rossa* alla *SSE 6 Rossa* è stato previsto di sezione pari a  $3 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ , invece che  $2 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$
- sono stati previsti i seguenti collegamenti aggiuntivi tra il feeder di rinforzo e i fili di contatto:
  - da 8+532 UP a 8+718 DW sulla Linea Rossa
  - da 10+000 UP a 10+200 DW sulla Linea Rossa
  - da 10+200 UP a 10+400 DW sulla Linea Rossa
  - da 11+487 UP a 11+750 DW sulla Linea Rossa
  - da 1+200 UP a 1+200 DW sulla diramazione della Linea Rossa
- la sezione dell'alimentatore F1 di *SSE 5 Rossa* è stata aumentata da  $2 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$  a  $4 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ ,
- la sezione dell'alimentatore F1 di *SSE 6 Rossa* è stata aumentata da  $2 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$  a  $3 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ ,
- la sezione dell'alimentatore F1 di *SSE 7 Rossa* è stata aumentata da  $2 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$  a  $3 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ ,
- la sezione dell'alimentatore negativo della *SSE 6 Rossa* è stata aumentata da  $5 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$  a  $6 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ .

Nella successiva fase di progettazione esecutiva sarà sviluppato un modello di maggior dettaglio della Linea Rossa e della Linea Verde.

## 8. CRITERI DI VERIFICA DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Il presente Capitolo riporta i criteri che saranno adottati per verificare i risultati delle simulazioni.

### 8.1. TENSIONE AL PANTOGRAFO

In base alla norma CEI EN 50163 (vedi Std. 2) sarà verificato che:

- la tensione al pantografo sia maggiore di 500 [V]
- la tensione al pantografo sia inferiore a 1000 [V] in fase di frenatura dei veicoli.

### 8.2. PROTEZIONE CONTRO LE SCOSSE ELETTRICHE

Sarà calcolato il potenziale tra binario e terra di riferimento in corrispondenza della posizione dei treni lungo linea e in corrispondenza della posizione del centro banchina delle fermate; il potenziale dovrà essere inferiore al valore di 120 [V], pari al valore

massimo della tensione di contatto ammissibile per intervalli di lunga durata, come specificato in CEI EN 50122-1 (vedi Std. 1) o 150 [V] per un intervallo fino a 300 [s]

### 8.3. CORRENTE NELLA LINEA DI CONTATTO

Il valore RMS della corrente nella linea di contatto, calcolato in un intervallo temporale pari al cadenzamento dei veicoli, deve essere inferiore alla portata in corrente definita al capitolo 7.

### 8.4. CORRENTE NEI CAVI

Il valore RMS della corrente nei cavi, calcolato in un intervallo temporale pari al cadenzamento dei veicoli, deve essere inferiore alla portata in corrente definita al capitolo 7.

### 8.5. CARICO DEI CONVERTITORI

Il valore RMS della corrente erogata da ciascun gruppo di conversione dovrà:

- essere inferiore al valore nominale in condizioni di normale funzionamento del sistema (tutte le SSE in servizio);
- essere inferiore alla corrente di sovraccarico di lunga durata, definita in base alla classe di servizio del convertitore, nelle condizioni di degrado, con il fuori servizio ciclico di una SSE alla volta.

Il valore di picco della corrente erogata da ciascun gruppo deve essere inferiore al valore di sovraccarico di breve durata previsto dalla classe di servizio del convertitore.

## 9. RISULTATI SIMULAZIONI

### 9.1. ORARIO SIMULATO E DIAGRAMMI DI MARCIA

Le seguenti figure mostrano l'orario simulato al variare del sincronismo dei treni Up e Down.

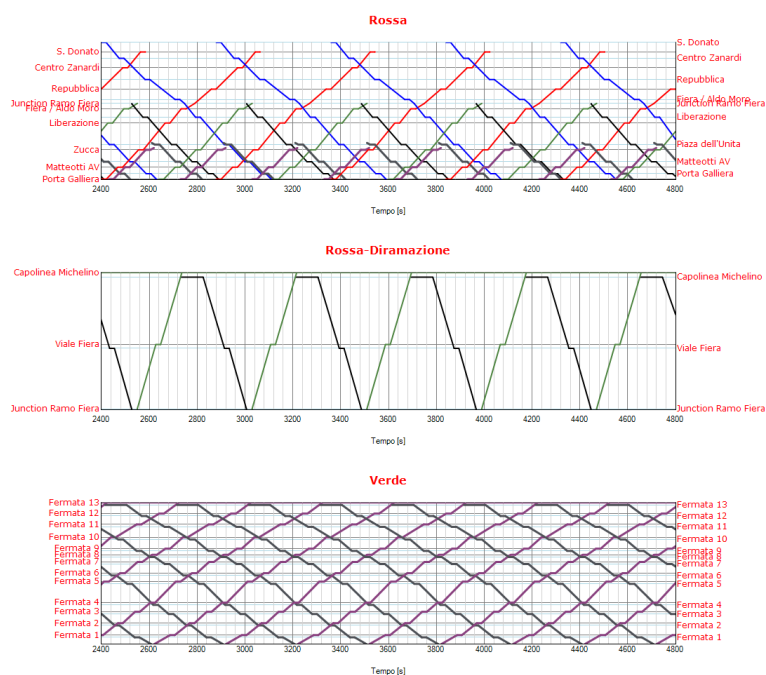


Figura 6: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 0s

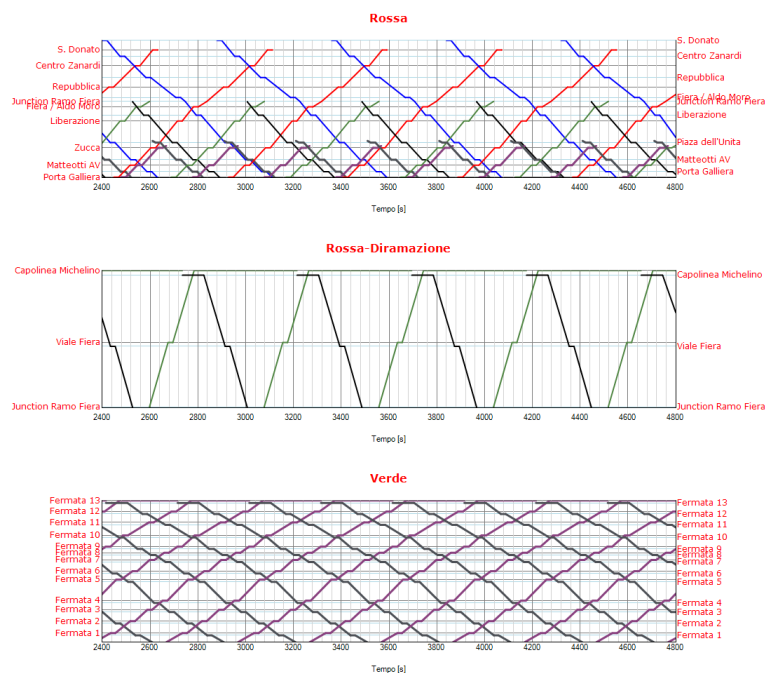


Figura 7: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 48s

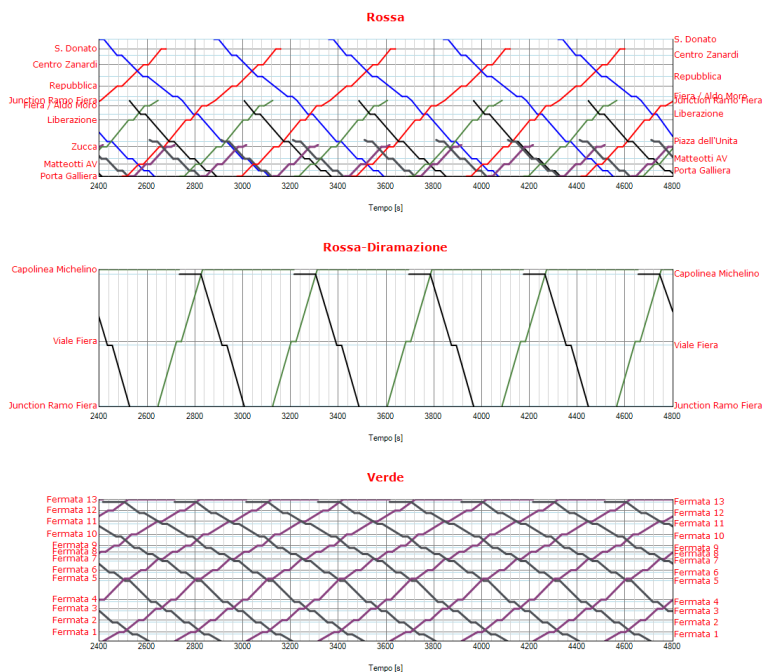


Figura 8: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 96s

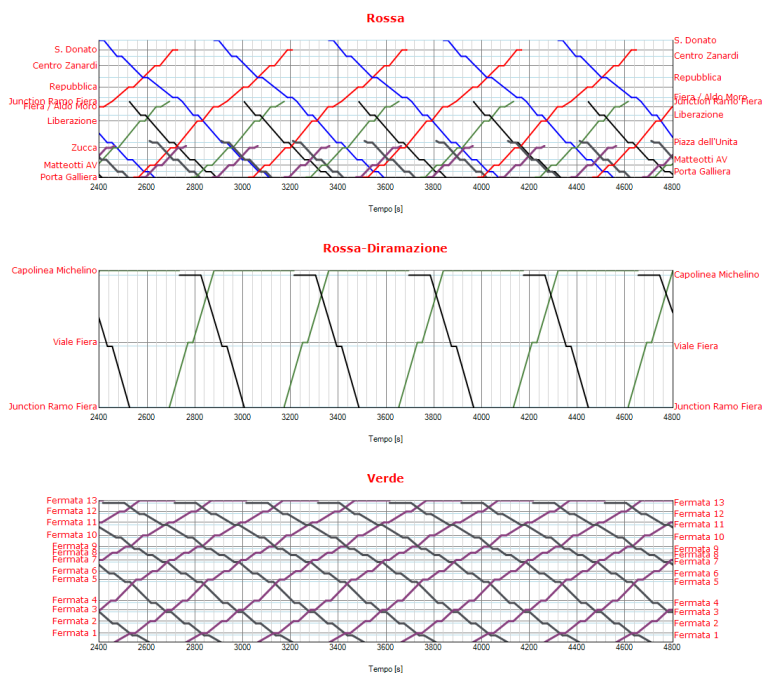


Figura 9: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 144s



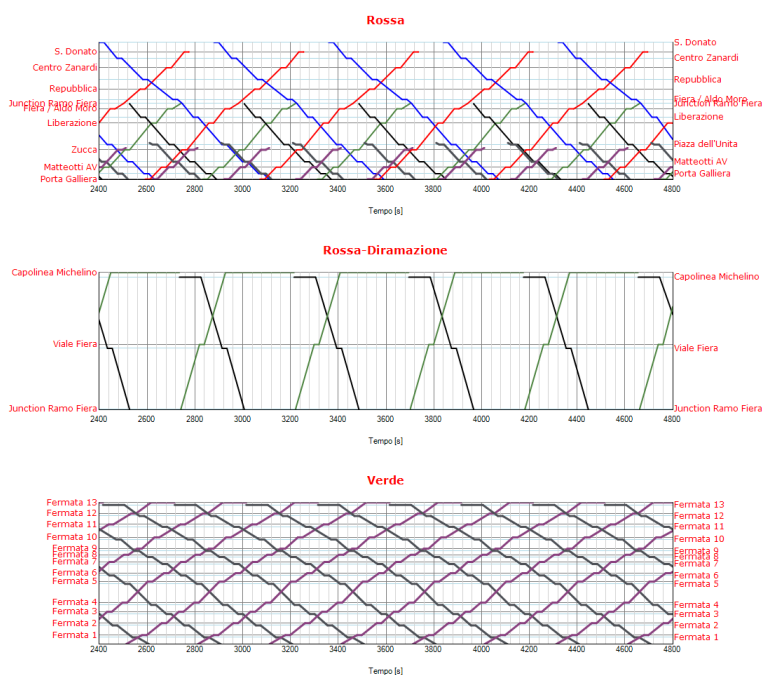


Figura 10: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 192s

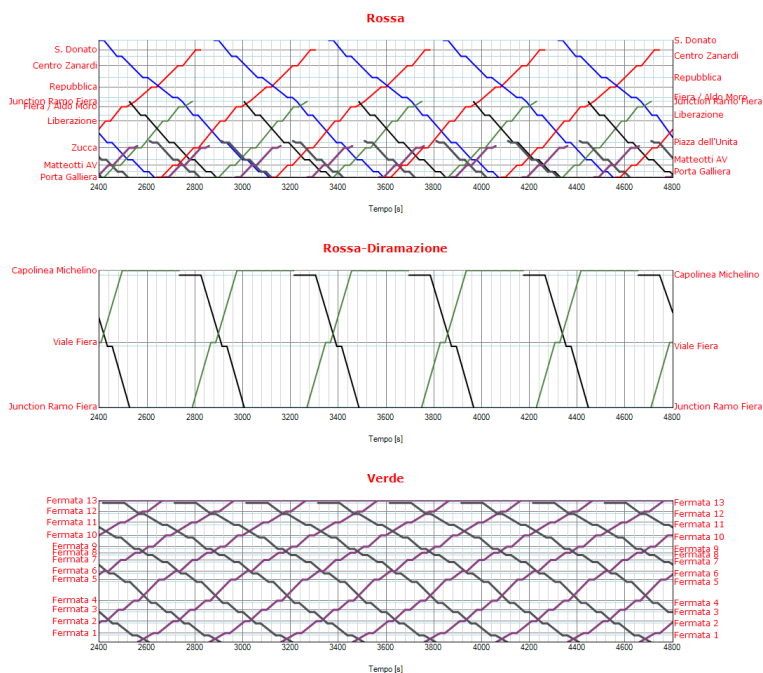


Figura 11: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 240s

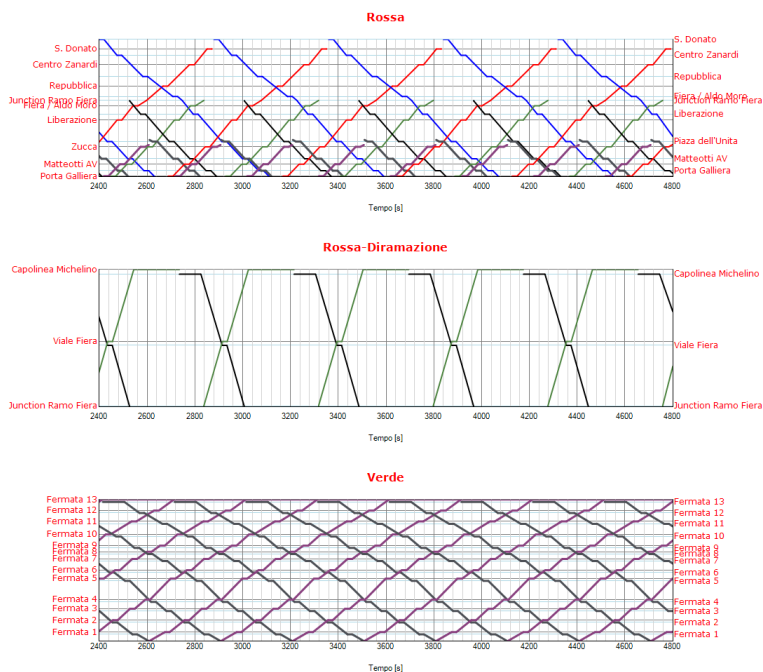


Figura 12: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 288s

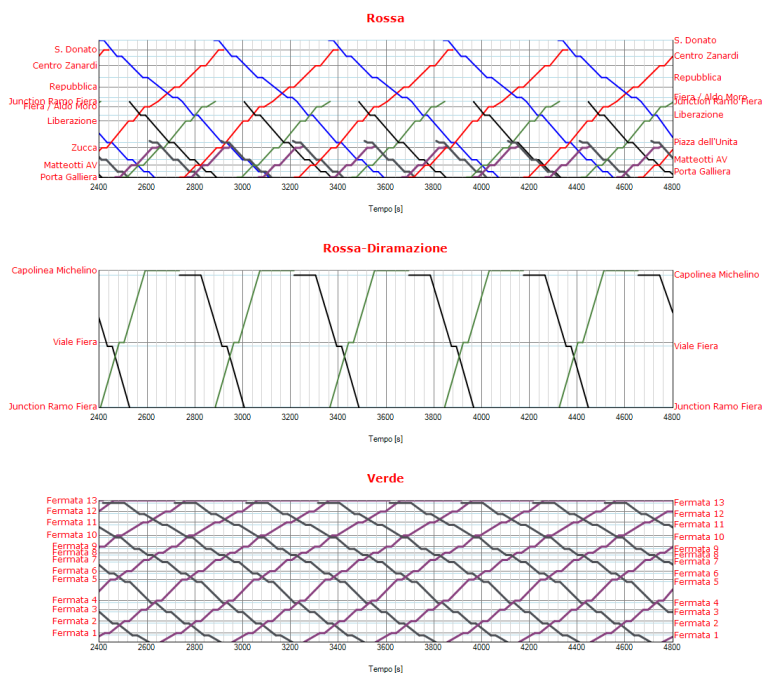


Figura 13: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 336s

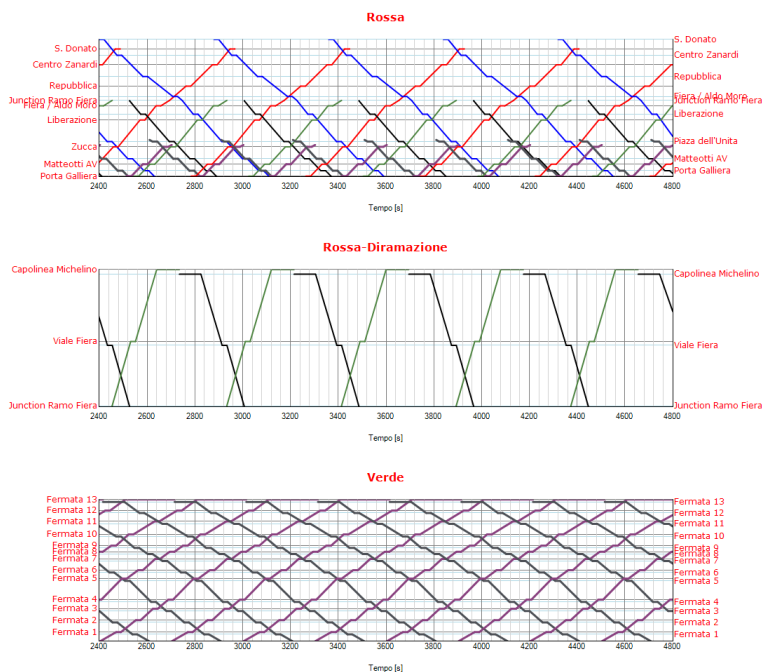


Figura 14: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 384s

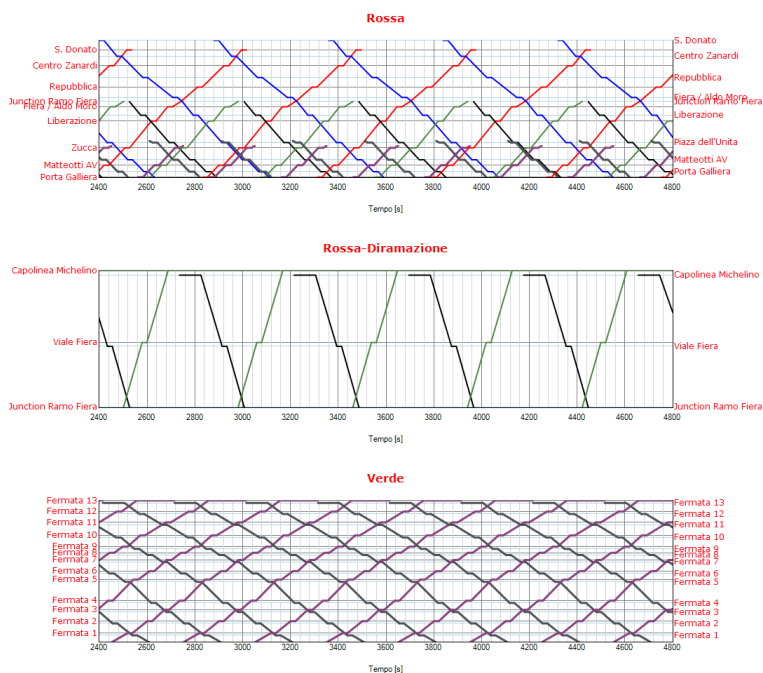


Figura 15: Orario Simulato, Normale funzionamento, Sincronismo 432s

Le seguenti Figure mostrano i diagrammi di marcia di un treno UP e di un treno DOWN che circolano sulla linea verde in condizioni di normale funzionamento.

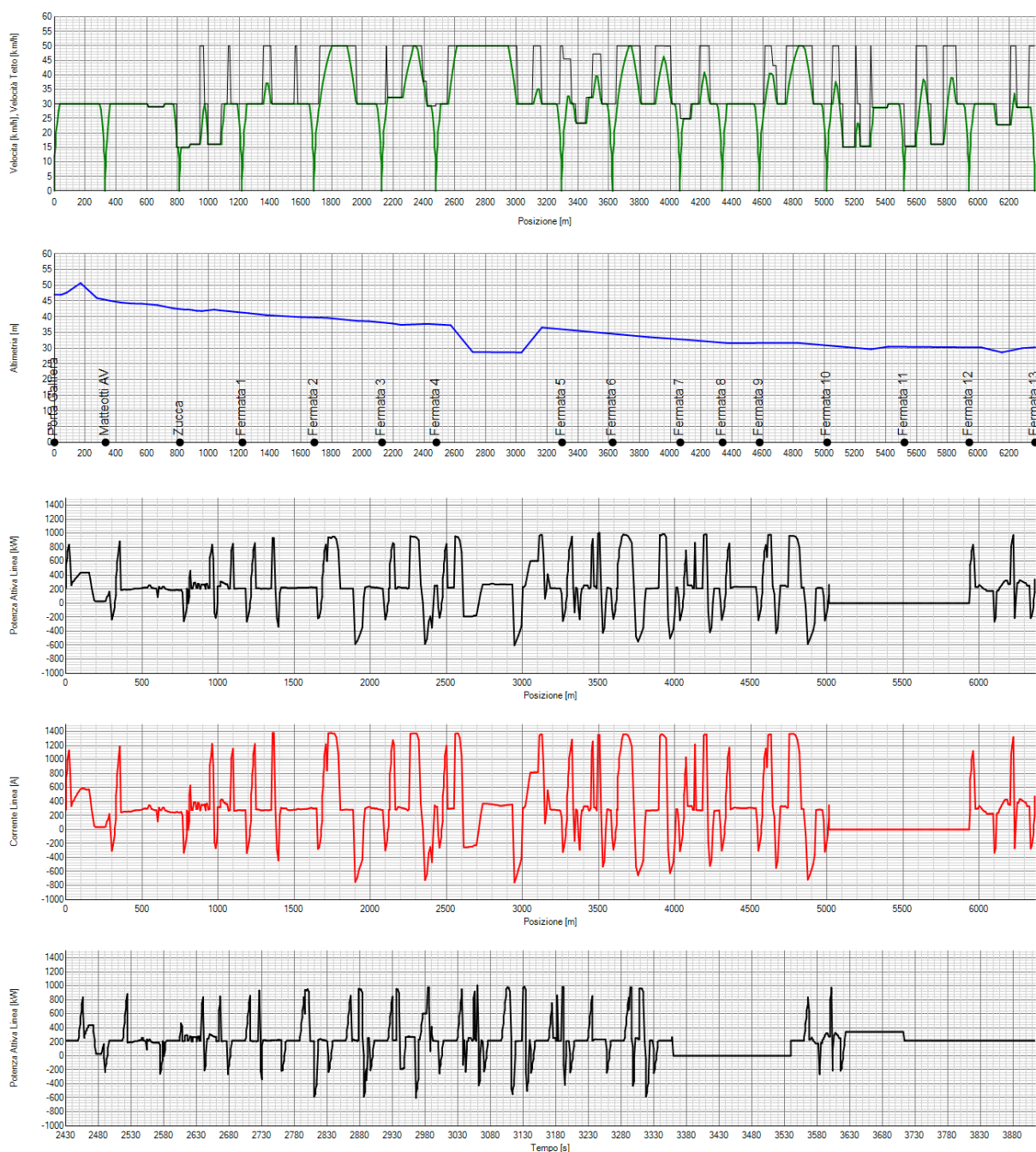


Figura 16: Normale Funzionamento, Treno UP, Diagrammi di Marcia

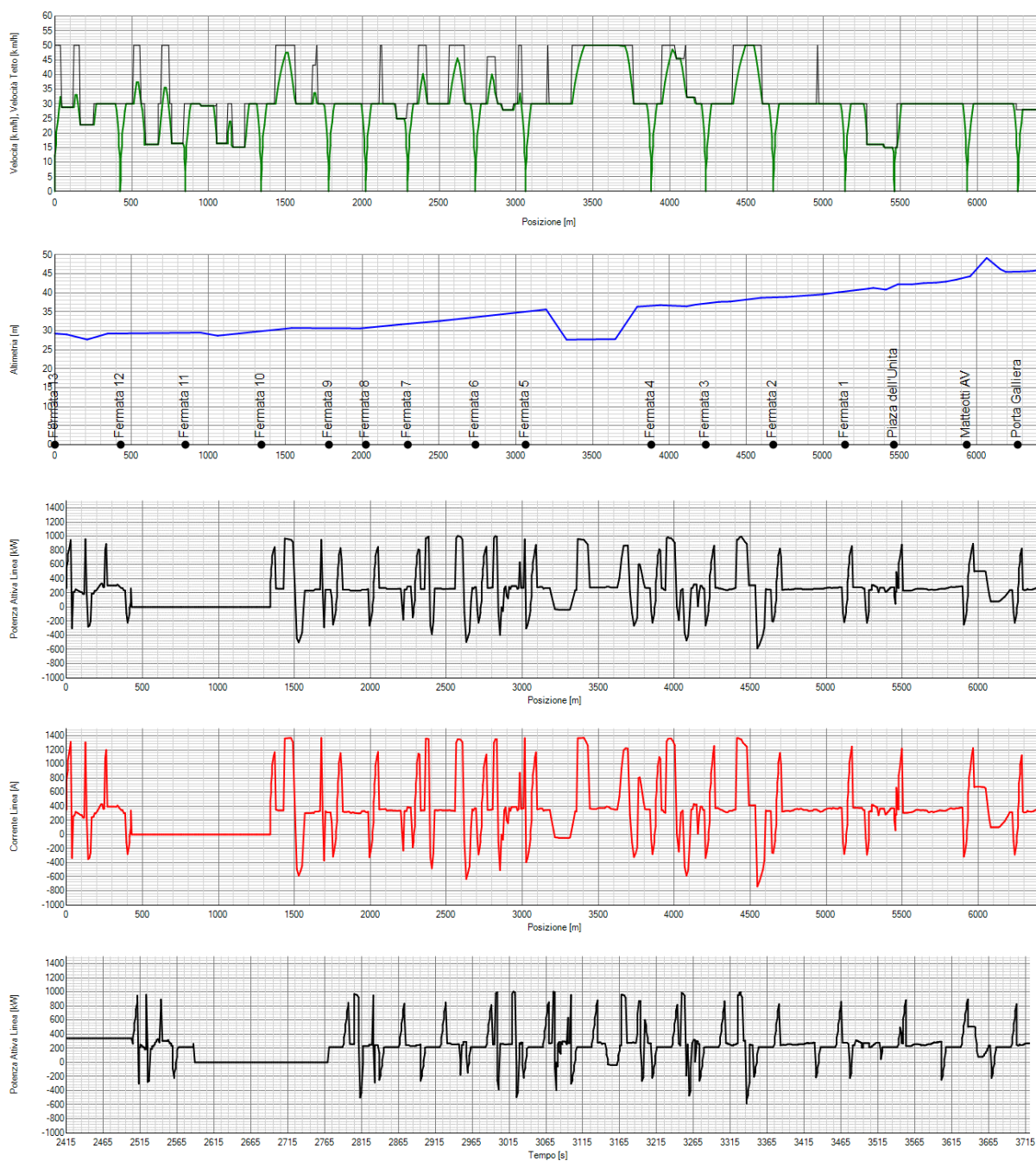


Figura 17: Normale Funzionamento, Treno DOWN, Diagrammi di Marcia



## 9.2. TENSIONI DI LINEA E POTENZIALI DI BINARIO

Le seguenti tabelle riportano i valori minimi e massimi della tensione di linea e massimi del potenziale di binario, riscontrati durante le simulazioni, in corrispondenza della posizione dei treni. Sia la tensione al pantografo che il potenziale di binario rispettano i limiti previsti dalla normativa.

Si fa presente che la tensione massima al pantografo è influenzata dal modello del treno che riduce la corrente rigenerata a zero alla tensione di 950 [V].

Sincronismo [s]	Simulazione	Linea	Tensione Minima		Tensione Massima		Massimo Valore Assoluto Potenziale Binario [V]	
			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
0	NF	Verde	900	660	3900	911	3900	20
48	NF	Verde	500	679	2900	831	900	20
96	NF	Verde	3900	664	4000	871	5400	19
144	NF	Verde	1400	660	2900	906	900	21
192	NF	Verde	1400	669	5400	854	900	17
240	NF	Verde	400	664	4000	900	900	18
288	NF	Verde	1400	647	2900	826	1400	19
336	NF	Verde	900	679	2900	824	1300	16
384	NF	Verde	1300	656	2900	889	1300	21
432	NF	Verde	2000	674	2700	840	900	17
0	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	100	595	3900	928	5000	26
48	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	100	611	2900	819	5200	25
96	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	400	610	2900	919	5000	29
144	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	900	599	2900	921	5400	32
192	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	400	618	5500	843	5200	27
240	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	400	597	4000	905	5300	25
288	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	1400	605	2100	822	5500	26
336	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	200	618	2900	833	5000	29
384	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	100	599	2900	911	5500	30
432	ROSSA_SSE06-OUT	Verde	400	612	2700	853	5200	27
0	VERDE-SSE11-OUT	Verde	2000	599	3900	867	2000	35
48	VERDE-SSE11-OUT	Verde	2200	610	2900	836	2200	34
96	VERDE-SSE11-OUT	Verde	1700	594	5400	870	1700	36
144	VERDE-SSE11-OUT	Verde	1700	594	2900	908	2300	35
192	VERDE-SSE11-OUT	Verde	1500	588	5500	863	2600	39
240	VERDE-SSE11-OUT	Verde	2000	590	4000	899	2000	37
288	VERDE-SSE11-OUT	Verde	2000	571	2900	832	2000	41
336	VERDE-SSE11-OUT	Verde	2300	601	900	830	2300	36
384	VERDE-SSE11-OUT	Verde	1700	591	2900	894	2800	39
432	VERDE-SSE11-OUT	Verde	2000	588	2700	846	2000	37
0	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	548	3900	883	5400	45
48	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	541	2900	848	5400	45
96	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	534	4000	888	5400	47
144	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	544	2900	906	5400	46
192	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	583	5400	868	5400	37

Sincronismo [s]	Simulazione	Linea	Tensione Minima		Tensione Massima		Massimo Valore Assoluto Potenziale Binario [V]	
			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
240	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	562	4000	901	5400	42
288	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	566	4000	816	5400	40
336	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5400	558	4000	822	5400	43
384	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5500	546	2900	911	5400	46
432	VERDE-SSE12-OUT	Verde	5100	557	2700	839	5400	41

Tabella 19: Linea Verde, Tensioni di Linea e Potenziale di binario

Sincronismo [s]	Simulazione	Linea	Tensione Minima		Tensione Massima		Massimo Valore Assoluto Potenziale Binario [V]	
			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
0	NF	Rossa	12100	583	11800	829	11400	28
48	NF	Rossa	12100	587	11800	826	11700	20
96	NF	Rossa	12100	590	11800	833	11600	25
144	NF	Rossa	12100	589	11800	836	11500	25
192	NF	Rossa	12100	593	11800	835	12100	24
240	NF	Rossa	12100	590	11800	841	11600	28
288	NF	Rossa	12100	591	11800	840	11600	20
336	NF	Rossa	12100	584	11900	829	12100	22
384	NF	Rossa	12100	583	11800	827	12100	23
432	NF	Rossa	12100	586	11800	821	11600	22
0	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	12100	566	8900	843	11300	34
48	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	12100	576	10900	835	11300	33
96	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	10900	562	9700	872	11300	37
144	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	11400	572	10200	858	11300	45
192	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	11700	570	11900	828	11300	32
240	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	12100	569	11800	837	11300	30
288	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	11300	579	11800	836	11300	31
336	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	12100	544	10200	860	11300	34
384	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	12100	562	10200	876	11100	36
432	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa	11700	541	10900	866	11300	32
0	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	587	11800	835	11600	24
48	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	590	11800	834	11700	18
96	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	593	11800	836	11600	24
144	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	592	11800	840	11500	25
192	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	595	11800	839	11600	24
240	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	593	11800	843	11700	24
288	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	594	11800	845	11900	17
336	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	587	11900	830	12100	21
384	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	586	11800	832	12100	20
432	VERDE-SSE11-OUT	Rossa	12100	589	11800	824	11700	20
0	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	583	11800	828	10500	26
48	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	587	11800	825	10900	27
96	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	590	11800	833	10200	31
144	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	590	11800	836	10300	29
192	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	593	11800	835	11600	23
240	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	591	11800	841	11600	28

Sincronismo [s]	Simulazione	Linea	Tensione Minima		Tensione Massima		Massimo Valore Assoluto Potenziale Binario [V]	
			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
288	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	591	11800	840	10300	23
336	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	584	11900	829	10200	27
384	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	583	11800	827	11200	28
432	VERDE-SSE12-OUT	Rossa	12100	586	11800	821	10300	26

**Tabella 20: Linea Rossa, Tensioni di Linea e Potenziale di binario**

Sincronismo [s]	Simulazione	Linea	Tensione Minima		Tensione Massima		Massimo Valore Assoluto Potenziale Binario [V]	
			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
0	NF	Rossa-Diramazione	300	616	300	833	200	17
48	NF	Rossa-Diramazione	300	618	300	842	300	13
96	NF	Rossa-Diramazione	300	611	300	825	300	14
144	NF	Rossa-Diramazione	300	611	300	825	200	17
192	NF	Rossa-Diramazione	300	627	300	828	300	11
240	NF	Rossa-Diramazione	300	629	700	824	400	13
288	NF	Rossa-Diramazione	300	625	300	822	300	12
336	NF	Rossa-Diramazione	300	628	100	811	1100	12
384	NF	Rossa-Diramazione	300	631	300	828	200	14
432	NF	Rossa-Diramazione	300	621	900	816	300	12
0	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	557	300	853	500	26
48	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	565	300	874	1200	25
96	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	550	300	829	1200	30
144	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	546	1300	836	900	27
192	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	561	300	841	600	24
240	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	562	300	841	500	25
288	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	569	300	821	1300	22
336	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	200	568	1200	837	1300	26



Sincronismo [s]	Simulazione	Linea	Tensione Minima		Tensione Massima		Massimo Valore Assoluto Potenziale Binario [V]	
			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
384	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	200	567	900	900	1100	26
432	ROSSA_SSE06-OUT	Rossa-Diramazione	300	555	900	888	600	23
0	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	629	300	832	300	18
48	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	631	300	840	300	17
96	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	624	300	829	1100	19
144	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	626	300	829	1300	19
192	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	639	300	830	1300	22
240	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	639	300	826	1300	18
288	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	636	300	827	1300	19
336	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	640	800	814	1100	18
384	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	639	300	830	1300	21
432	VERDE-SSE11-OUT	Rossa-Diramazione	300	634	900	815	1300	18
0	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	617	300	833	1300	28
48	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	616	300	842	1300	31
96	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	611	300	825	1300	31
144	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	611	300	826	1300	31
192	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	628	300	829	1300	27
240	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	629	700	824	1300	28
288	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	626	300	822	1300	27
336	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	628	100	811	1300	28
384	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	629	300	828	1300	30
432	VERDE-SSE12-OUT	Rossa-Diramazione	300	619	900	816	1300	29

Tabella 21: Linea Rossa Diramazione, Tensioni di Linea e Potenziale di binario

Le seguenti figure mostrano l'andamento delle tensioni e del potenziale lungo la Linea Verde, nelle condizioni peggiori riportate in Tabella 12. Le figure sono state costruite utilizzando i valori delle tensioni e dei potenziali in corrispondenza della posizione di tutti i treni durante la simulazione; i campioni sono stati raggruppati per tratte di linea elementari della lunghezza di 100 [m]. La tensione di linea e il potenziale di binario in una determinata posizione possono essere differenti negli istanti temporali in cui non è presente alcun treno.

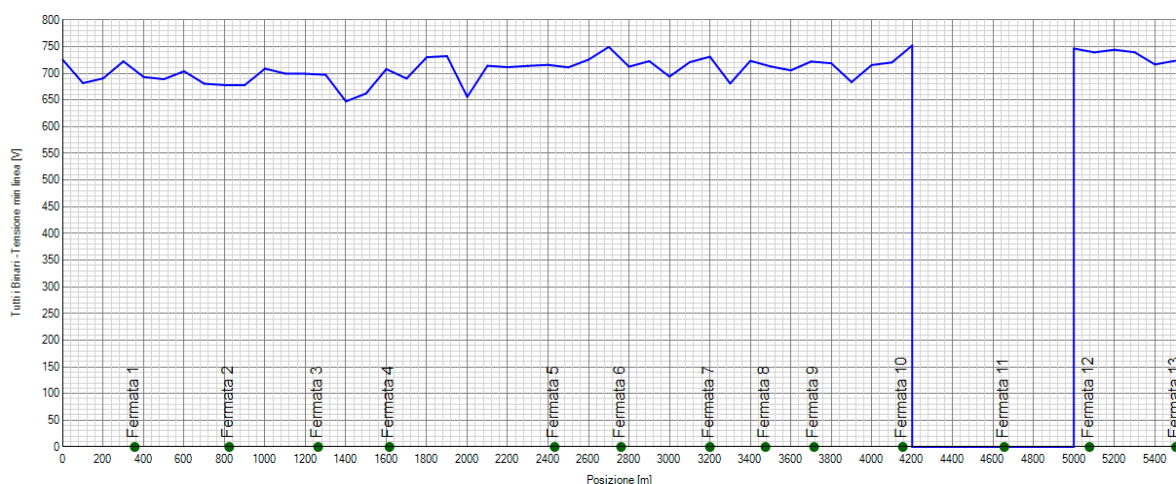


Figura 18: NF, Linea Verde, Sincronismo 288 [s], Tensione minima di linea

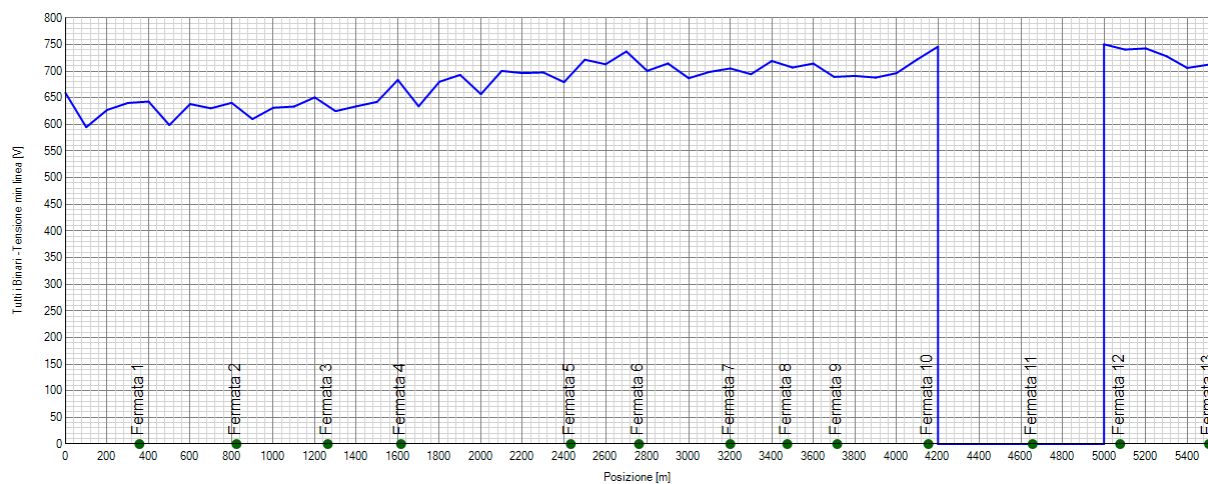


Figura 19: ROSSA\_SSE06-OUT, Linea Verde, Sincronismo 0 [s], Tensione minima di linea

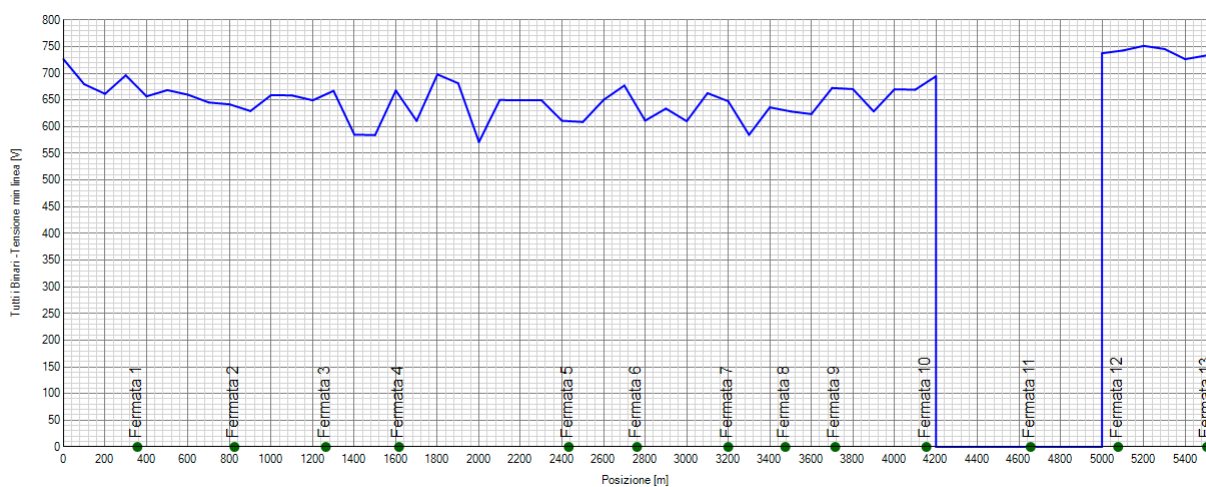


Figura 20: VERDE\_SSE11-OUT, Linea Verde, Sincronismo 288 [s], Tensione minima di linea

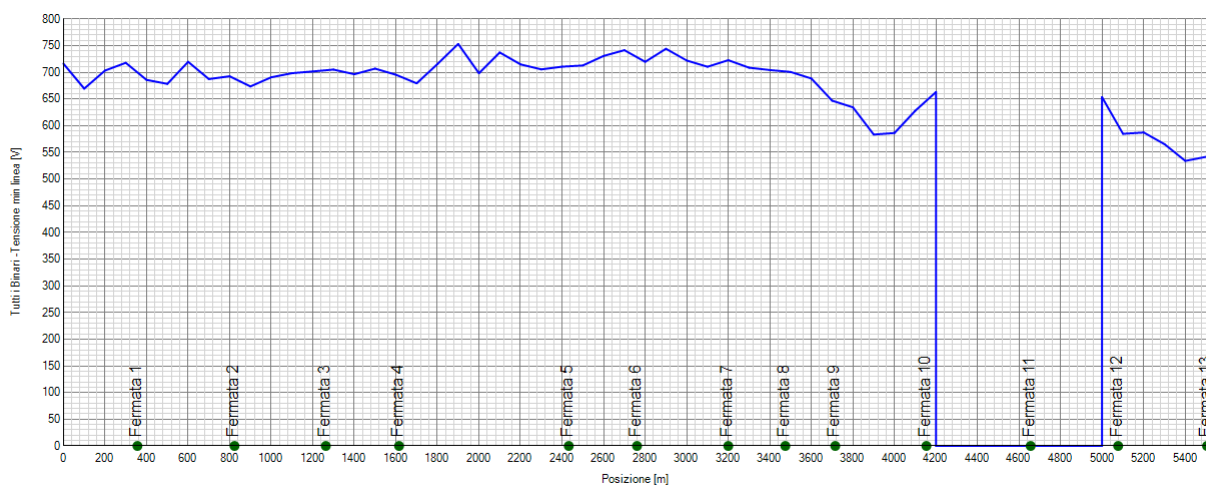


Figura 21: VERDE\_SSE12-OUT, Linea Verde, Sincronismo 96 [s], Tensione minima di linea

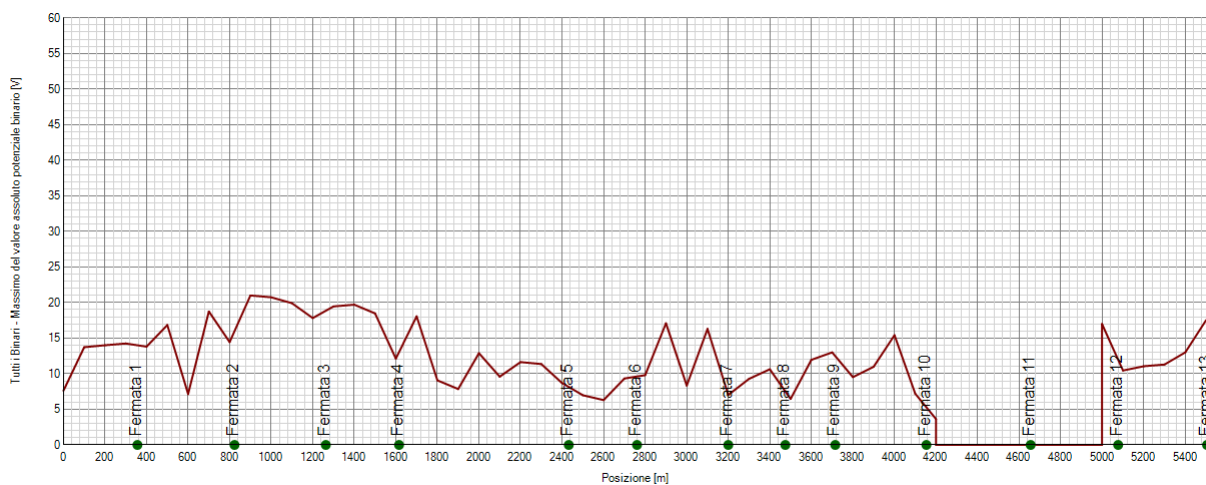


Figura 22: NF, Linea Verde, Sincronismo 144 [s], Valore Assoluto Potenziale Binario

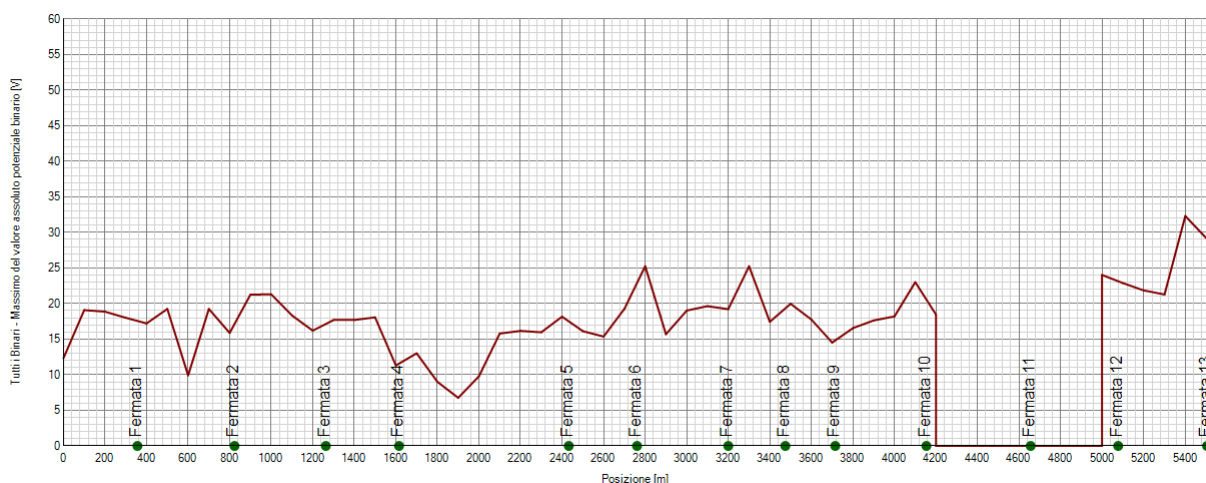


Figura 23: ROSSA\_SSE06-OUT, Linea Verde, Sincronismo 144 [s], Valore Assoluto Potenziale Binario

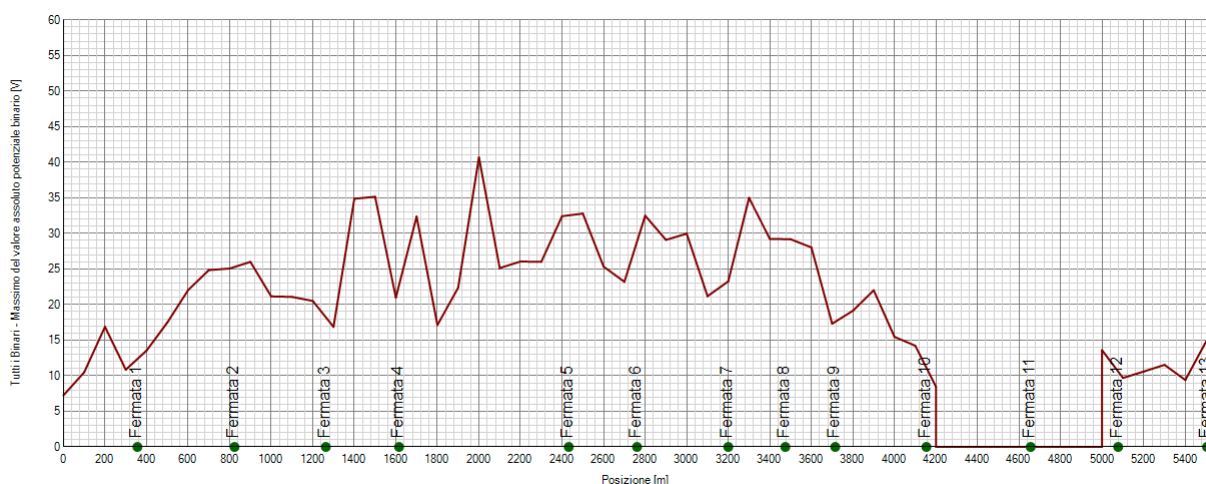


Figura 24: VERDE\_SSE11-OUT, Linea Verde, Sincronismo 288 [s], Valore Assoluto Potenziale Binario

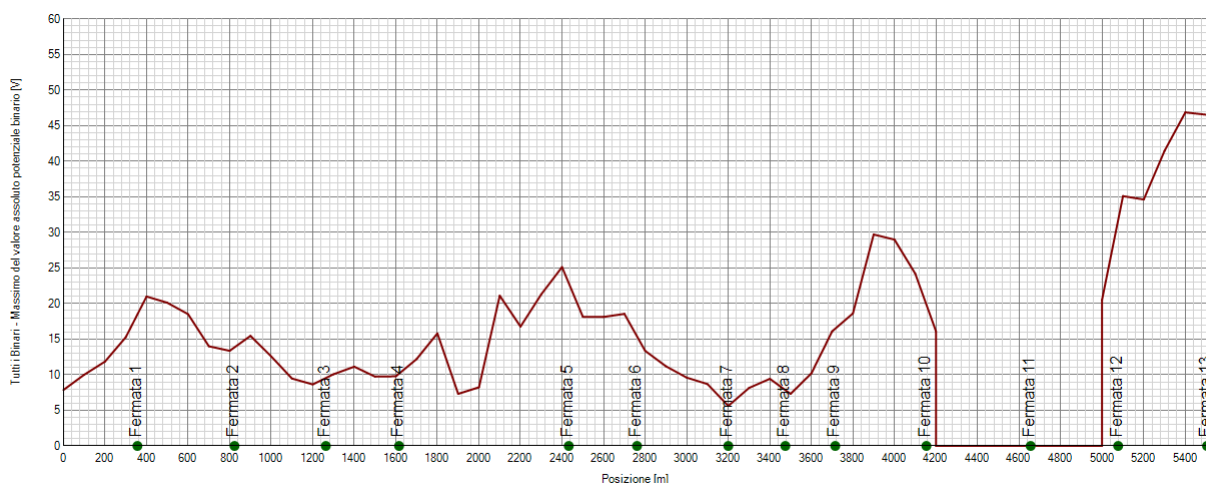


Figura 25: VERDE\_SSE12-OUT, Linea Verde, Sincronismo 96 [s], Valore Assoluto Potenziale Binario

### 9.3. CORRENTI NELLA LINEA DI CONTATTO

La Tabella 22 riporta i massimi valori RMS calcolati su un intervallo di 300 [s] della corrente nella linea di contatto. I valori riportati in tabella sono i peggiori tra tutte le simulazioni al variare del sincronismo dei treni.

I valori della corrente nella linea di contatto sono inferiori al valore massimo di 320 [A] previsto al Paragrafo 7.3, tranne che nel caso del fuori servizio della SSE 12 in cui la corrente supera tale valore in corrispondenza della zona di ricarica al capolinea (Fermata 13), in cui si suggerisce di rinforzare la sezione della linea di contatto.

Simulazione	Massimo valore RMS della corrente nel filo di contatto [A]
NF	308
ROSSA_SSE06-OUT	308
VERDE-SSE11-OUT	306
VERDE-SSE12-OUT	342

Tabella 22: Linea Verde, Corrente massima nella linea di contatto

#### 9.4. CORRENTI NEI CAVI DI RINFORZO

La Tabella 23 riporta i massimi valori RMS calcolati su un intervallo di 300 [s] della corrente nei cavi di rinforzo positivi in parallelo alla linea di contatto. I valori sono inferiori al valore massimo definito in Tabella 14. I valori riportati in tabella sono i peggiori tra tutte le simulazioni al variare del sincronismo dei treni.

Simulazione	Massimo valore RMS della corrente nei feeder di rinforzo [A]	
	Sezione 4x1x300 mm <sup>2</sup> Cu	Sezione 2x1x300 mm <sup>2</sup> Cu
NF	644	494
ROSSA_SSE06-OUT	955	496
VERDE-SSE11-OUT	962	496
VERDE-SSE12-OUT	1323	550

Tabella 23: Linea VERDE, Corrente massima nel feeder di rinforzo

#### 9.5. CARICHI DEI CONVERTITORI

La Tabella 24 riporta i valori RMS della corrente alle sbarre in corrente continua delle SSE, calcolato in un intervallo temporale multiplo del cadenzamento di 300 [s]. Tutti i gruppi di conversione lavorano con un carico inferiore al carico nominale. La Tabella 25 riporta i valori di picco delle correnti alle sbarre di SSE che è sempre inferiore al 300% del valore nominale (valore di sovraccarico di breve durata). I valori riportati sono i valori massimi tra tutte le simulazioni al variare del sincronismo dei treni

Nel caso in cui nella SSE siano presenti due gruppi di conversione *in servizio*, le tabelle riportano la somma delle correnti (valori in **grassetto**).

Simulazione	Rossa SSE 5	Rossa SSE 6	Rossa SSE 7	Verde SSE 11	Verde SSE 12
	Valore RMS corrente alle sbarre DC [A]				
NF	1189	1328	743	1207	999
ROSSA_SSE06-OUT	1764		1220	1497	1070
VERDE-SSE11-OUT	1167	<b>1984</b>	676		<b>1725</b>

	Rossa SSE 5	Rossa SSE 6	Rossa SSE 7	Verde SSE 11	Verde SSE 12
Simulazione	Valore RMS corrente alle sbarre DC [A]				
VERDE-SSE12-OUT	1183	1327	742	2286	

Tabella 24: Carichi delle SSE, valori RMS su 300s della corrente alle sbarre DC

	Rossa SSE 5	Rossa SSE 6	Rossa SSE 7	Verde SSE 11	Verde SSE 12
Simulazione	Valore RMS corrente alle sbarre DC [A]				
NF	2716	2994	1751	3147	2753
ROSSA_SSE06-OUT	3920		2635	3814	2848
VERDE-SSE11-OUT	2600	4393	1680		4315
VERDE-SSE12-OUT	2716	2944	1760	5309	

Tabella 25: Carichi delle SSE, valori di picco della corrente alle sbarre DC

Le seguenti tabelle riportano i valori medi e massimi della potenza richiesta alle sbarre in corrente continua e a monte dei trasformatori del gruppo di conversione. I valori riportati sono i valori massimi tra tutte le simulazioni al variare del sincronismo dei treni.

SSE	Gruppo	NF		ROSSA_SSE06-OUT		VERDE-SSE11-OUT		VERDE-SSE12-OUT	
		Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max
		Potenza Attiva DC [kW]							
Linea Rossa SSE 5	GR1	815	2000	1155	2773	804	1921	815	2000
Linea Rossa SSE 6	GR1	922	2186			701	1643	922	2153
	GR2					701	1643		
Linea Rossa SSE 7	GR1	532	1327	825	1945	480	1275	531	1334
Linea Verde SSE 11	GR1	842	2286	1024	2707			824	1958
	GR2							824	1958
Linea Verde SSE 12	GR1	731	2025	780	2089	629	1615		
	GR2					629	1615		

Tabella 26: Potenza Attiva DC delle SSE

SSE	Gruppo	NF		ROSSA_SSE06-OUT		VERDE-SSE11-OUT		VERDE-SSE12-OUT	
		Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max
		Potenza Attiva al Primario del Trasformatore [kW]							
Linea Rossa SSE 5	GR1	862	2110	1221	2923	851	2026	862	2109
Linea Rossa SSE 6	GR1	974	2305			742	1733	974	2270
	GR2					742	1733		
Linea Rossa SSE 7	GR1	564	1401	873	2051	509	1347	563	1408
Linea Verde SSE 11	GR1	890	2411	1083	2854			871	2065
	GR2							871	2065
Linea Verde SSE 12	GR1	774	2135	825	2203	666	1705		
	GR2					666	1705		

Tabella 27: Potenza Attiva al Primario del Trasformatore delle SSE



SSE	Gruppo	NF		ROSSA_SSE06-OUT		VERDE-SSE11-OUT		VERDE-SSE12-OUT	
		Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max
		Potenza Reattiva al Primario del Trasformatore [kVAR]							
Linea Rossa SSE 5	GR1	210	827	368	1439	206	775	210	827
Linea Rossa SSE 6	GR1	252	955			165	604	252	932
	GR2					165	604		
Linea Rossa SSE 7	GR1	108	431	217	791	93	405	108	435
Linea Verde SSE 11	GR1	229	1031	308	1380			217	799
	GR2							217	799
Linea Verde SSE 12	GR1	179	844	198	887	143	588		
	GR2					143	588		

Tabella 28: Potenza Reattiva al Primario del Trasformatore delle SSE

SSE	Gruppo	NF		ROSSA_SSE06-OUT		VERDE-SSE11-OUT		VERDE-SSE12-OUT	
		Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max	Medio	Max
		Potenza Apparente al Primario del Trasformatore [kVA]							
Linea Rossa SSE 5	GR1	887	2266	1275	3258	875	2170	887	2265
Linea Rossa SSE 6	GR1	1007	2495			760	1835	1007	2454
	GR2					760	1835		
Linea Rossa SSE 7	GR1	574	1466	899	2199	518	1406	573	1474
Linea Verde SSE 11	GR1	919	2622	1125	3170			898	2215
	GR2							898	2215
Linea Verde SSE 12	GR1	794	2296	849	2375	681	1803		
	GR2					681	1803		

Tabella 29: Potenza Apparente al Primario del Trasformatore delle SSE

## 10. CONCLUSIONI

Le simulazioni sono state eseguite con le seguenti ipotesi:

- il modello della Linea Rossa è stato implementato in base a quanto definito in Rif. 1 e apportando le modifiche elencate al paragrafo 7.6.
- il modello semplificato del veicolo con sistema di accumulo a bordo dell'energia assume che il sistema per la carica delle batterie sia sempre attivo e che assorba in maniera continuativa la potenza di 125 [kW], tranne che alla Fermata 13 della Linea Verde in cui è assunta una ricarica a 250 [kW] per 180 [s].

L'analisi dei risultati delle simulazioni per la verifica del dimensionamento della Linea Verde, in condizioni di normale funzionamento del sistema di alimentazione e in condizioni di degrado con il fuori servizio totale ciclico di una SSE alla volta evidenzia che:

- La tensione di linea è sempre superiore al valore minimo di 500 [V] previsto dalla normativa.
- Il potenziale tra binario e terra è sempre inferiore al valore di 60 [V] e comunque inferiore al valore massimo di 120 [V] previsto dalla normativa come valore massimo della tensione di contatto ammissibile in modo permanente.



- Il valore RMS della corrente erogata dai gruppi di conversione è sempre inferiore al valore nominale di 2000 [A]. Nessuna SSE lavora in condizioni di sovraccarico.
- Il valore di picco della corrente erogata dai gruppi è sempre inferiore al 300% del valore nominale (valore di sovraccarico di breve durata).
- Il valore RMS della corrente nella linea di contatto della Linea Verde, calcolato nel tempo di cadenzamento, è sempre inferiore al valore di 320 [A] che corrisponde ad una temperatura massima del filo di 75 [°C]. Nella zona del capolinea (Fermata 13), il valore della corrente raggiunge il valore di 342 [A], per cui si suggerisce di rinforzare la linea di contatto in corrispondenza della zona di ricarica.
- Il valore RMS della corrente nei cavi di rinforzo in parallelo alla linea di contatto della Linea Verde è sempre inferiore al valore di corrente ammissibile: 1716 [A] per le sezioni 4x1x300 mm<sup>2</sup> Cu e 858 [A] per le sezioni 2x1x300 mm<sup>2</sup> Cu.

Il sistema di alimentazione della Linea Verde è quindi in grado di garantire il cadenzamento di 300 [s] previsto per i tram, sia in condizioni di normale funzionamento che in condizioni di degrado.

Per quanto riguarda la Linea Rossa, il presente documento elenca alcune modifiche al sistema di alimentazione della Linea Rossa, scaturite dal presente studio di simulazione. Si procederà ad un'analisi più dettagliata nelle successive fasi progettuali, al fine di analizzare l'impatto della Linea Verde a seguito dell'implementazione di un modello più dettagliato della Linea Rossa e considerando tutte le situazioni di degrado dell'intero sistema costituito dalle Linee Rossa e Verde.