

SKYMETRO

PROLUNGAMENTO DELLA METROPOLITANA IN VALBISAGNO

CUP B39J22001360001 CIG 9262977270

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

(D.lgs. n. 36 / 2023)



TRAZIONE ELETTRICA SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE RELAZIONE DI DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI TRAZIONE ELETTRICA

Commessa	Fase	Lotto	Disciplina	WBS	Tipo	Numero	Foglio	Rev.
MGE1	P4	LV	LTE	SS0	R	001	00	A

Rev.	Descrizione	Nome		Data
A	Adeguamento al parere del CSLLPP e altri Enti e allineamento progetto	Redatto	A. Papalini/ D. Papagni	07/03/2025
		Verificato	N. Carones	07/03/2025
		Approvato	M. Castellani	07/03/2025
		Autorizzato	P. Cucino	07/03/2025
B		Redatto		
		Verificato		
		Approvato		
		Autorizzato		
C		Redatto		
		Verificato		
		Approvato		
		Autorizzato		
D		Redatto		
		Verificato		
		Approvato		
		Autorizzato		

INDICE

1.	INQUADRAMENTO GENERALE DEL PROGETTO	7
2.	SCOPO	8
3.	NORME E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	9
3.1	RIFERIMENTI NORMATIVI	9
3.2	RIFERIMENTI PROGETTUALI	10
4.	DATI DI INPUT	11
4.1	ARCHITETTURA DEL SISTEMA DI TRAZIONE ELETTRICA	11
4.2	CARATTERISTICA DEL TRACCIATO SKYMETRO	12
4.3	SCENARI DI TRAFFICO SKYMETRO	15
4.4	CARATTERISTICA DEL TRACCIATO LINEA STORICA	16
4.5	SCENARI DI TRAFFICO LINEA STORICA	18
4.6	TIPOLOGIA DI MATERIALE ROTABILE	20
4.7	INPUT DI ESERCIZIO	21
4.8	LINEA DI CONTATTO	22
4.9	ALIMENTATORI	22
4.10	BINARIO	23
4.11	SOTTOSTAZIONI DI TRAZIONE ELETTRICA	23
5.	VERIFICA DEL SISTEMA ELETTRICO DI TRAZIONE	25
5.1	CRITERI DI VERIFICA	25
5.2	LOTTO 1 + LOTTO 2: SIMULAZIONI DI MARCIA	26
5.2.1	TRENO METRO GENOVA III GEN. UdT+UdT, SOSTA 20'' – TRATTA CANEPARI-MARTINEZ	26
5.2.2	TRENO METRO GENOVA III GEN. UdT, SOSTA 20'' – TRATTA BRIGNOLE-MOLASSANA (LOTTO COMPLETO)	27
5.3	LOTTO 1 + LOTTO 2: RISULTATO DELLE SIMULAZIONI DEL SISTEMA ELETTRICO DI TRAZIONE	28
5.3.1	NORMALE ESERCIZIO - CADENZAMENTO 5 MINUTI	29
5.3.2	FUORI SERVIZIO SSE MOLASSANA	35
5.3.3	FUORI SERVIZIO SSE PONTE CARREGA	37
5.3.4	FUORI SERVIZIO SSE BRIGNOLE	39
5.4	LOTTO 1: SIMULAZIONI DI MARCIA	42
5.4.1	TRENO METRO GENOVA III GEN. UdT+UdT, SOSTA 20'' – TRATTA CANEPARI-MARTINEZ	42
5.4.2	TRENO METRO GENOVA III GEN. UdT, SOSTA 20'' – TRATTA BRIGNOLE-PONTE CARREGA	43
5.5	LOTTO 1: RISULTATO DELLE SIMULAZIONI DEL SISTEMA ELETTRICO DI TRAZIONE	44
5.5.1	NORMALE ESERCIZIO - CADENZAMENTO 5 MINUTI	45
5.5.2	FUORI SERVIZIO SSE PONTE CARREGA	51

5.5.3	FUORI SERVIZIO SSE BRIGNOLE	53
6.	VERIFICA DEL POTENZIALE DI BINARIO	55
7.	CALCOLO MINIMA CORRENTE DI CORTO CIRCUITO TRATTA SKYMETRO	56
8.	ALIMENTAZIONE DELLE SSE	57
9.	CONCLUSIONI	58

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Inquadramento Territoriale	7
Figura 2.	Architettura del sistema di trazione elettrica	12
Figura 3.	Composizione della UdT e ubicazione carrelli motori e portanti.	20
Figura 4.	Caratteristica sforzo/velocità in trazione.	20
Figura 5.	Formula di resistenza al moto e coefficienti di riferimento.	21
Figura 6.	Sistema elettrico di trazione.	23
Figura 7.	Caratteristica esterna di SSE	24
Figura 8.	Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A).	26
Figura 9.	Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Brignole-Molassana.	27
Figura 10.	SkyMetro - Traffico Cadenzato 5 minuti	29
Figura 11.	SkyMetro - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari	30
Figura 12.	Linea 'storica' – Traffico 5 minuti	31
Figura 13.	Linea storica - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari	32
Figura 14.	Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A).	42
Figura 15.	Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Brignole-Ponte Carrega.	43
Figura 16.	SkyMetro - Traffico Cadenzato 5 minuti – Lotto 1	45
Figura 17.	SkyMetro - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari – Lotto 1	46
Figura 18.	Linea 'storica' – Traffico 5 minuti	47
Figura 19.	Linea storica - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari	48
Figura 20.	Orario di esercizio previsto nella casistica oggetto di analisi.	56

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.	Dati del tracciato SkyMetro.	12
Tabella 2.	Elenco e progressive stazioni Skymetro	15
Tabella 3.	Dati del tracciato Linea Storica.	16
Tabella 4.	Elenco e progressive stazioni Linea Storica.	19
Tabella 5.	Caratteristiche treno III Gen. (doppia UdT).	21
Tabella 6.	Collegamenti positivi e negativi line storica	22
Tabella 7.	Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A)	26
Tabella 8.	Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Brignole-Molassana	27
Tabella 9.	Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A)	42
Tabella 10.	Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Brignole-Ponte Carrega	43
Tabella 11.	Potenze richieste lato MT	57

1. INQUADRAMENTO GENERALE DEL PROGETTO

Il progetto SkyMetro prevede l'estensione del servizio della rete metropolitana esistente da Genova Brignole fino al quartiere di Molassana, con lunghezza di circa 7,1 Km, in doppio binario su viadotto, con 7 stazioni, andando a servire la Val Bisagno, una delle due principali vallate urbanizzate facenti parte del Comune di Genova. La linea si sviluppa in sponda destra a filo argine del torrente Bisagno, partendo dalla nuova stazione denominata "Brignole Sant'Agata", fino alla stazione denominata "Stadio Marassi" per poi portarsi a nord della piastra di tombamento del torrente, in zona Marassi, sulla sponda sinistra dove è prevista l'ubicazione delle stazioni "Parenzo", "Staglieno", "Ponte Carrega", "San Gottardo" e "Molassana".

La linea sarà alimentata da 3 sottostazioni elettriche (SSE) con sistema 750Vcc ed equipaggiata con catenaria rigida (ad eccezione del primo tratto di connessione con la linea metropolitana esistente che sarà realizzato con catenaria flessibile).

Per soddisfare l'attuale finanziamento, la realizzazione dell'opera verrà divisa in due lotti di cui il primo, della lunghezza di circa 4,5 km, parte dalla stazione "Brignole Sant'Agata" e arriva alla stazione "Ponte Carrega", definendo così un lotto funzionale. Il secondo lotto, partendo dalla stazione "Ponte Carrega", termina alla stazione di testa "Molassana", definendo così un lotto di completamento. La nuova infrastruttura è provvista di un binario di servizio per il collegamento al deposito esistente di Dinegro.



Figura 1. Inquadramento Territoriale

2. SCOPO

La presente relazione illustra i risultati dell'analisi di dimensionamento delle installazioni fisse di trazione elettrica destinate all'alimentazione della tratta oggetto di studio.

Sulla base del carico costituito dal traffico metropolitano viene verificata la potenzialità del sistema elettrico proposto in condizione di normale servizio di tutte le SSE. Sarà inoltre considerato il caso di fuori servizio degli impianti.

L'analisi è stata realizzata tramite programmi dedicati che eseguono le simulazioni di marcia dei treni e forniscono le prestazioni di sistema quali la qualità della tensione al pantografo e il carico della linea e delle apparecchiature di sottostazione. I risultati delle simulazioni vengono confrontati con i valori limite previsti dalle normative di riferimento, al fine di verificarne il rispetto.

Considerando che l'ipotesi iniziale è quella di sfruttare la SSE Brignole esistente che alimenta attualmente la linea storica, per verificare questa ipotesi le simulazioni sono state effettuate considerando anche la tratta storica e la sua relativa estensione. Per cui la linea complessivamente da Canepari arriva fino a Brignole, per poi proseguire verso Martinez, mentre la tratta SkyMetro da Brignole si sviluppa fino a Molassana. Non sono previste intersezioni tra le due linee a livello meccanico, ma solamente un collegamento elettrico nella SSE Brignole, rendendo pertanto le due situazioni di traffico indipendenti l'una dall'altra.

Sono stati considerati i seguenti scenari di traffico:

- cadenzamento a 5 minuti sulla tratta storica con aggiunta delle estensioni Canepari e Martinez;
- cadenzamento a 5 minuti sulla nuova tratta SkyMetro.

In aggiunta, è stato effettuato un ulteriore studio che prevede l'analisi della nuova tratta Skymetro considerando la messa in servizio di una sola parte di tracciato, che va da Brignole fino a Ponte Carrega. Tale tratta sarà analizzata come Lotto 1 all'interno della seguente relazione.

Si fa presente che tali orari sono da considerarsi in condizione di Normale Esercizio (tutti gli impianti di SSE in funzione) e che, in caso di fuori servizio, tale orario potrebbe subire modifiche in base alla capacità della linea oggetto di studio.

3. NORME E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

3.1 Riferimenti Normativi

Le norme di riferimento alla base di questa analisi sono quelle che definiscono la qualità della tensione al pantografo:

EN 50119 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Impianti fissi Linee aeree di contatto per trazione elettrica

EN 50163 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Tensioni di alimentazione dei sistemi di trazione

EN 50163/A1 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Tensioni di alimentazione dei sistemi di trazione

EN 50388 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Alimentazione elettrica e materiale rotabile Criteri tecnici per il coordinamento tra l'alimentazione elettrica (sottostazione) e materiale rotabile per ottenere l'interoperabilità

EN 50318 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Sistemi di captazione della corrente Convalida della simulazione dell'interazione dinamica tra pantografo e linea aerea di contatto

3.2 Riferimenti Progettuali

Di seguito sono indicati i riferimenti progettuali ai quali si farà implicito/esplicito riferimento nel presente studio:

- EC01P009038B 01 - Caratteristica sforzo e frenatura treni di terza generazione;
- MGE1P2LVTRCCOMT005_A -Tracciato profilo altimetrico binario dispari
- MGE1P2LVTRCCOMT007_A - Tracciato profilo altimetrico binario pari
- MGE1P2LVESECOMK001A - Schematico di Esercizio;
- MGE1P2LVLDCCOMK001A - Schema TE.

4. DATI DI INPUT

4.1 Architettura del sistema di trazione elettrica

Il sistema di trazione elettrica è un sistema a corrente continua, con tensione nominale 750Vcc. In accordo alla norma EN 50163, i limiti di tensione ammessi per un sistema a 750Vcc sono i seguenti:

Tabella 1 – Tensioni nominali e relativi limiti ammissibili per valore e durata

Sistema di elettrificazione	Tensione non permanente minima U_{min2} V	Tensione permanente minima U_{min1} V	Tensione nominale U_n V	Tensione permanente massima U_{max1} V	Tensione non permanente massima U_{max2} V
c.c. (valori medi)	400	400	600 ^(a)	720	800
	500 ^(c)	500	750	900 ^(c)	1 000
	1 000	1 000	1 500	1 800 ^(c)	1 950
	2 000	2 000	3 000	3 600	3 900 ^(b)
a.c. (valori efficaci)	11 000	12 000	15 000	17 250	18 000
	17 500 ^(c)	19 000 ^(c)	25 000	27 500 ^(c)	29 000
Condizioni speciali nazionali per la Francia: vedi allegato B.					
(a) I futuri sistemi di trazione in CC per tramvie e ferrovie locali dovrebbero conformarsi alle tensioni nominali di sistema di 750 V, 1500 V o 3000V.					
(b) Condizioni speciali per il Belgio: vedere allegato B					
(c) Condizioni speciali nazionali per il Regno Unito: vedi allegato B.					

Lo schema elettrico del sistema di trazione è rappresentato nella figura sottostante, in cui si riporta in blu la tratta SkyMetro e in nero la linea storica in esercizio. In blu sono inoltre rappresentate le SSE che saranno oggetto di nuova realizzazione, in rosso le SSE attualmente esistenti e in esercizio. Si fa presente che tale schema è solo di tipo elettrico: le due linee risultano separate a livello di esercizio e di traffico.

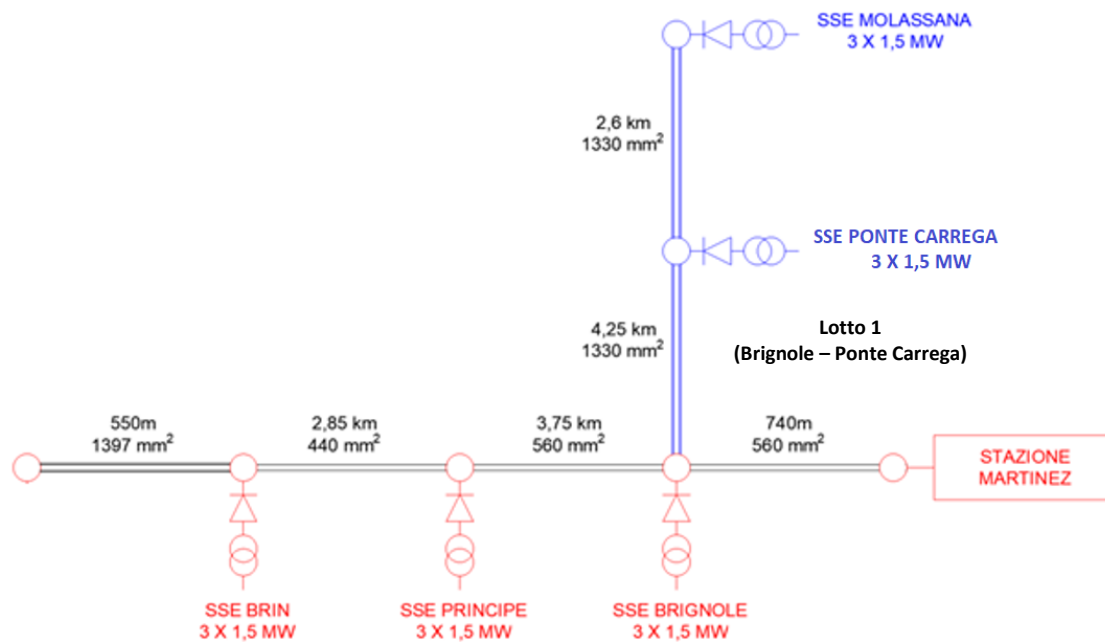


Figura 2. Architettura del sistema di trazione elettrica

4.2 Caratteristica del tracciato SkyMetro

Di seguito si riportano i dati principali del tracciato: pk, pendenze, raggio di curvatura, stazioni.

Tabella 1. Dati del tracciato SkyMetro.

Da PK [m]	A PK [m]	Pendenza ‰	Raggio curva [m]	Scoperto - Galleria (S/G)	Stazione o Fermata
0	0	-0,241	703	S	INIZIO
0	74	-0,241	703	S	
74	169	-0,241	50	S	
169	202	20	0	S	
202	202	20	0	S	BRIGNOLE
202	261	20	100	S	
261	291	20	153	S	
291	336	35	153	S	
336	424	35	0	S	
424	548	2,263	418	S	
548	633	22,336	418	S	
633	726	22,336	700	S	

Da PK [m]	A PK [m]	Pendenza ‰	Raggio curva [m]	Scoperto - Galleria (S/G)	Stazione o Fermata
726	801	0,999	700	S	
801	968	0,999	203	S	
968	1061	0,999	350	S	
1061	1180	0,999	0	S	
1180	1180	0,999	0	S	STADIO MARASSI
1180	1205	0,999	0	S	
1205	1283	0,999	233	S	
1283	1338	0,999	100	S	
1338	1384	10,337	100	S	
1384	1453	10,337	0	S	
1453	1551	10,337	103	S	
1551	1722	10,337	320	S	
1722	1846	10,337	0	S	
1846	1925	10,337	300	S	
1925	1984	2	300	S	
1984	2049	2	0	S	
2049	2114	2	170	S	
2114	2149	2	0	S	
2149	2149	2	0	S	PARENZO
2149	2186	2	0	S	
2186	2275	2	5000	S	
2275	2322	2	0	S	
2322	2396	8,842	300	S	
2396	2718	8,842	200	S	
2718	2795	2	170	S	
2795	2828	2	0	S	
2828	2828	2	0	S	STAGLIENO
2828	2877	2	0	S	
2877	2933	2	250	S	
2933	2969	2	0	S	
2969	3029	2	695	S	
3029	3303	7,136	695	S	
3303	3544	7,136	0	S	
3544	3573	12,46	0	S	
3573	3645	12,46	400	S	
3645	3762	12,46	300	S	
3762	3810	12,46	0	S	
3810	4047	12,46	770	S	
4047	4154	2	770	S	

Da PK [m]	A PK [m]	Pendenza ‰	Raggio curva [m]	Scoperto - Galleria (S/G)	Stazione o Fermata
4154	4191	2	0	S	
4191	4255	2	170	S	
4255	4289	2	0	S	
4289	4289	2	0	S	PONTE CARREGA
4289	4320	2	0	S	
4320	4393	2	170	S	
4393	4426	2	680	S	
4426	4460	9,721	680	S	
4460	4517	9,721	0	S	
4517	4690	9,721	1065	S	
4690	4690	9,721	1065	S	FINE LOTTO 1
4690	4736	9,721	1065	S	
4736	4932	9,721	1100	S	
4932	4985	9,721	0	S	
4985	5082	9,721	640	S	
5082	5143	0,97	640	S	
5143	5204	0,97	0	S	
5204	5266	0,97	170	S	
5266	5299	0,97	0	S	
5299	5299	0,97	0	S	SAN GOTTARDO
5299	5331	0,97	0	S	
5331	5396	0,97	170	S	
5396	5425	0,97	0	S	
5425	5483	0,97	500	S	
5483	5536	8,78	500	S	
5536	5636	8,78	350	S	
5636	5689	8,78	0	S	
5689	5929	8,78	300	S	
5929	6071	8,78	0	S	
6071	6113	8,78	945	S	
6113	6522	18,93	945	S	
6522	6573	2	945	S	
6573	6647	2	170	S	
6647	6683	2	0	S	
6683	6683	2	0	S	MOLASSANA
6683	6716	2	0	S	
6716	6784	2	170	S	
6784	6833	2	0	S	

Da PK [m]	A PK [m]	Pendenza ‰	Raggio curva [m]	Scoperto - Galleria (S/G)	Stazione o Fermata
6833	7026	2	397	S	
7026	7026	2	397	S	FINE

4.3 Scenari di traffico SkyMetro

Il modello di esercizio implementato nel software di dimensionamento è relativo a un'ora di punta (critica dal punto di vista elettrico). In particolare, per l'ora di punta sono stati considerati i seguenti scenari di traffico: **cadenzamento treni pari a 5 minuti per senso di percorrenza**. Nel modello di esercizio sono considerati dei tempi di fermata pari a 20 secondi, nelle seguenti stazioni:

Tabella 2. Elenco e progressive stazioni Skymetro

STAZIONE	PROGRESSIVA [km]	TEMPO SOSTA [s]
BRIGNOLE	202	20
STADIO MARASSI	1180	20
PARENZO	2149	20
STAGLIENO	2828	20
PONTE CARREGA	4289	20
SAN GOTTARDO	5299	20
MOLASSANA	6683	20

4.4 Caratteristica del tracciato Linea Storica

Di seguito si riportano i dati principali del tracciato: pk, pendenze, raggio di curvatura, stazioni.

In tale situazione è riportata la traccia della linea metropolitana di Genova attualmente in servizio, con previsione dei nuovi prolungamenti verso Canepari e verso Martinez.

Tabella 3. Dati del tracciato Linea Storica.

Da PK [m]	A PK [m]	Pendenza %	Raggio curva [m]	Scoperto - Galleria (S/G)	Stazione o Fermata
0	0	-31,00	0	S	CANEPARI
0	152	-31,00	0	S	
152	374	35,00	0	S	
374	427	0,00	0	S	
427	556	0,00	0	S	
556	556	0,00	0	S	BRIN
556	583	0,00	0	G	
583	631	0,00	600	G	
631	680	0,00	0	G	
680	752	6,92	418	G	
752	828	6,92	0	G	
828	988	7,31	0	G	
988	1280	7,78	0	G	
1280	1528	-16,00	0	G	
1528	2245	-14,91	0	G	
2245	2420	-58,00	0	G	
2420	2473	-58,00	500	G	
2473	2512	7,14	0	G	
2512	2583	7,14	480	G	
2583	2637	0,00	480	G	
2637	2730	0,00	0	G	
2730	2730	0,00	0	G	DINEGRO
2730	2789	0,00	398	G	
2789	2998	0,00	0	G	
2998	3057	0,00	100	G	
3057	3085	0,00	0	G	
3085	3151	0,00	150	G	
3151	3214	33,27	150	G	
3214	3260	33,27	0	G	
3260	3323	33,27	60	G	
3323	3362	0,00	0	G	

Da PK [m]	A PK [m]	Pendenza ‰	Raggio curva [m]	Scoperto - Galleria (S/G)	Stazione o Fermata
3362	3391	0,00	0	G	
3391	3391	0,00	0	G	PRINCIPE
3391	3456	0,00	0	G	
3456	3505	20,00	0	G	
3505	3611	20,00	400	G	
3611	3661	20,00	0	G	
3661	3777	20,00	400	G	
3777	3865	4,00	400	G	
3865	4009	4,00	0	G	
4009	4075	0,00	0	G	
4075	4075	0,00	0	G	DERSENA
4075	4120	0,00	0	G	
4120	4154	0,00	160	G	
4154	4188	29,00	160	G	
4188	4223	29,00	0	G	
4223	4357	4,00	0	G	
4357	4473	4,00	160	G	
4473	4583	0,00	0	G	
4583	4619	0,00	160	G	
4619	4664	0,00	0	G	
4664	4664	0,00	0	G	SAN GIORGIO
4664	4779	0,00	160	G	
4779	4824	0,00	0	G	
4824	4861	0,00	200	G	
4861	5063	35,00	200	G	
5063	5108	35,00	0	G	
5108	5273	35,00	165	G	
5273	5331	35,00	260	G	
5331	5384	0,00	260	G	
5384	5384	0,00	260	G	S. AGOSTINO
5384	5444	0,00	260	G	
5444	5537	1,70	260	G	
5537	5710	1,70	0	G	
5710	5754	0,00	0	G	
5754	5754	0,00	0	G	DE FERRARI
5754	5810	0,00	0	G	
5810	5913	4,11	0	G	
5913	5994	4,11	683	G	
5994	6056	10,14	683	G	

Da PK [m]	A PK [m]	Pendenza ‰	Raggio curva [m]	Scoperto - Galleria (S/G)	Stazione o Fermata
6056	6112	39,86	126	G	
6112	6151	27,16	0	G	
6151	6187	8,78	140	G	
6187	6230	0,00	0	G	
6230	6230	0,00	0	G	CORVETTO
6230	6295	0,00	131	G	
6295	6381	0,00	0	G	
6381	6421	0,00	500	G	
6421	6463	-33,93	500	G	
6463	6632	-33,93	0	G	
6632	6708	-33,93	235	G	
6708	6786	38,96	235	G	
6786	7032	38,96	154	G	
7032	7072	38,96	135	G	
7072	7142	0,00	135	G	
7142	7142	0,00	0	S	BRIGNOLE
7142	7235	0,00	0	S	
7235	7288	0,00	404	S	
7288	7341	5,60	275	S	
7341	7395	0,00	275	S	
7395	7440	-6,20	0	S	
7440	7487	0,00	340	S	
7487	7586	-7,00	340	S	
7586	7613	-7,00	0	S	
7613	7677	-7,00	800	S	
7677	7751	-7,00	0	S	
7751	7794	-7,00	800	S	
7794	7838	-7,00	0	S	
7838	7878	0,00	0	S	
7878	7878	0,00	0	S	MARTINEZ

4.5 Scenari di traffico Linea Storica

Il modello di esercizio implementato nel software di dimensionamento è relativo a un'ora di punta (critica dal punto di vista elettrico). In particolare, per l'ora di punta sono stati considerati i seguenti scenari di traffico: **cadenzamento treni pari a 5 minuti per senso di percorrenza**. Nel modello di esercizio sono considerati dei tempi di fermata pari a 20 secondi, nelle seguenti stazioni:

Tabella 4. Elenco e progressive stazioni Linea Storica.

STAZIONE	PROGRESSIVA [km]	TEMPO SOSTA [s]
CANEPARI	0+000	20
BRIN	0+556	20
DINEGRO	2+730	20
PRINCIPE	3+391	20
DERSENA	4+075	20
SAN GIORGIO	4+664	20
S. AGOSTINO	5+384	20
DE FERRARIS	5+754	20
CORVETTO	6+230	20
BRIGNOLE	7+142	20
MARTINEZ	7+878	20

4.6 Tipologia Di Materiale Rotabile

Sulla base del modello di esercizio, descritto nel paragrafo precedente, di seguito si riportano le categorie e i parametri caratteristici del materiale rotabile utilizzati nelle simulazioni. In particolare, per le simulazioni effettuate sono stati utilizzati i veicoli Metro Genova di terza generazione, in regime di doppia composizione, di cui si riportano le caratteristiche di seguito.

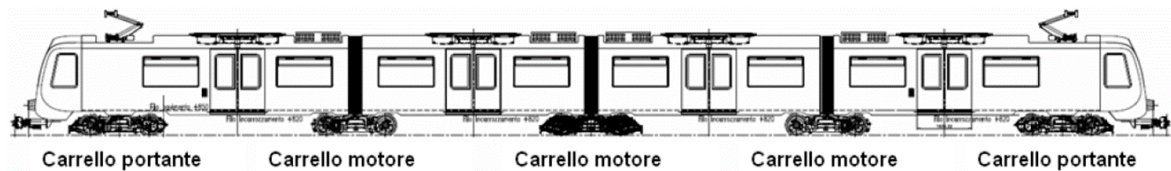


Figura 3. Composizione della UdT e ubicazione carrelli motori e portanti.

Caratteristiche Meccanica di Trazione in funzione delle condizioni di carico

Composizione UdT: 4 casse (A+C+D+B), 6 motori di trazione, condizioni di carico C3, ruote a nuove, Vlinea ≥ 750 Vcc

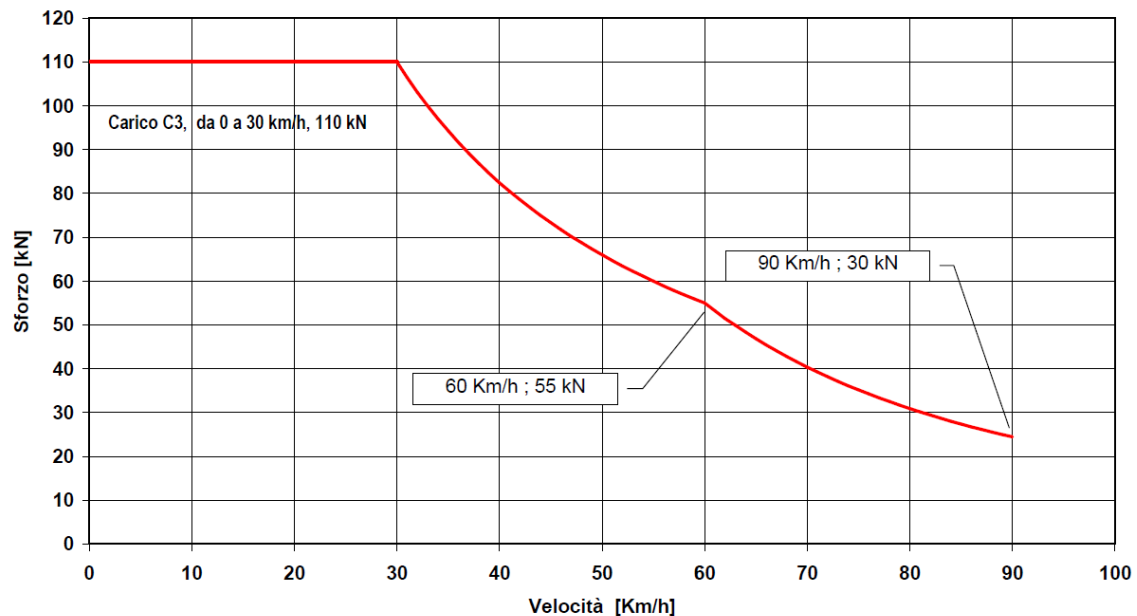


Figura 4. Caratteristica sforzo/velocità in trazione.

La definizione degli sforzi di trazione e frenatura e le simulazioni della marcia sulle tratte di Metro Genova sono state condotte tenendo in considerazione la resistenza al moto della UdT. Nella seguente tabella sono riportati alcuni valori di riferimento relativi al convoglio in questione.

Tabella 5. Caratteristiche treno III Gen. (doppia UdT).

CARATTERISTICHE	VALORI
Velocità di impostazione	80 km/h
Tensione nominale	750 V
Potenza oraria	1,85 MW
Potenza Ausiliari	250 kW
Massa complessiva	190 t
Rendimento Locomotiva	0,85
Coefficiente di inerzia masse rotanti	1,05
Decelerazione costante di frenatura in piano	1 m/s ²

La resistenza al moto è calcolata con la seguente formula:

$$R = M * 9,81 * (p + A + \frac{v^2}{B}) + \frac{9,81 * M * C}{r}$$

A [N/t]	2,5
B [t*(km/h) ² /N]	850
C [N*m/t]	500

Figura 5. Formula di resistenza al moto e coefficienti di riferimento.

4.7 Input di esercizio

Nel seguente paragrafo sarà riportata la sintesi dei dati tecnici generali dell'intervento che sono stati utilizzati per le simulazioni elettriche di dimensionamento:

- Lunghezza del tracciato pari a circa 6,9 km;
- Numero di stazioni: 7 (fare riferimento alla Tabella 2);
- Tempo di sosta nelle varie stazioni: 20'';
- Lunghezza della singola UdT di terza generazione: 40m;
- Lunghezza del convoglio: 80m (2 UdT di terza generazione o 3 UdT di prima o seconda generazione) su linea storica e 40m (1 UdT di terza generazione) su SkyMetro;
- Capacità del singolo treno: 442 passeggeri;
- Velocità commerciale: 35 km/h;
- Velocità massima: 75 km/h;
- Frequenza massima: 5 minuti nell'ora di punta su linea storica, 3 minuti nell'ora di punta su linea SkyMetro;

Si osserva che, nonostante i dati di input forniti dalla committenza prevedano l'utilizzo di treni di prima o seconda generazione, al fine di rendere le simulazioni maggiormente conservative è stato ipotizzato l'utilizzo di treni esclusivamente di terza generazione per ambo le tratte.

4.8 Linea di contatto

La linea di contatto per la nuova tratta SkyMetro sarà realizzata con catenaria rigida (sezione di circa 1330 mm² rame equivalente), ed è stata considerata un'usura del 20%. Temperatura ambiente considerata: 40°C

Per quanto riguarda la tratta storica, attualmente risulta essere elettrificata come segue:

- da Canepari a Brin, alimentazione a catenaria rigida 1397 mmq rame equivalente;
- da Brin a Principe, alimentazione a catenaria flessibile 440 mmq;
- da Principe a Brignole, alimentazione a catenaria flessibile 560 mmq;

Nell'ambito del progetto di estensione da Brignole a Martinez è previsto l'inserimento di catenaria flessibile a 560 mmq.

4.9 Alimentatori

Per la tratta SkyMetro, come alimentatori positivi sono stati considerati conduttori in rame 5x1x400mmq per ciascun interruttore extrarapido, con una lunghezza di 300m. Come alimentatori negativi sono stati considerati conduttori in rame 12x1x240mmq per ciascun binario, con una lunghezza di 300m.

Per la linea storica sono stati considerati gli alimentatori attualmente installati, riportati nella tabella di seguito:

Tabella 6. Collegamenti positivi e negativi line storica

SSE	Alimentatore	Tipo di cavo	Lunghezza	Binario
Brin	Q54F1*	4x(1x500) Cu	200	Dispari (UP)
	Q54F2*	4x(1x500) Cu	200	Pari (DW)
	Q54F3	4x(1x500) Cu	50	Dispari (UP)
	Q54F4	4x(1x500) Cu	50	Pari (DW)
	N1	6x(1x500) Cu	50	Dispari (UP)
	N2	6x(1x500) Cu	50	Pari (DW)
Principe	Q54F1	4x(1x500) Cu	400	Dispari (UP)
	Q54F2	4x(1x500) Cu	400	Pari (DW)
	Q54F3	4x(1x500) Cu	200	Dispari (UP)
	Q54F4	4x(1x500) Cu	200	Pari (DW)
	N1	6x(1x500) Cu	370	Dispari (UP)
	N2	6x(1x500) Cu	400	Pari (DW)
Brignole	Q54F1	4x(1x500) Cu	150	Dispari (UP)
	Q54F2	4x(1x500) Cu	150	Pari (DW)
	Q54F3*	4x(1x500) Cu	300	Dispari (UP)
	Q54F4*	4x(1x500) Cu	300	Pari (DW)
	N1	2x(1x500) Cu	150	Dispari (UP)
	N2	2x(1x500) Cu	150	Pari (DW)
	N3 (*)	2x(1x500) Cu	320	Dispari (UP)
	N4 (*)	2x(1x500) Cu	320	Pari (DW)

4.10 Binario

Il binario è formato da rotaie UNI 50, con peso equivalente pari a 50 kg/m. La resistenza equivalente di ciascun binario è perciò valutata essere pari a 18 mΩ/km.

4.11 Sottostazioni di trazione elettrica

Al fine di realizzare la verifica del sistema elettrico di alimentazione, è stata analizzata la rete a 750V rappresentata nella figura sottostante, in cui si riporta in blu la tratta SkyMetro e in nero la linea storica in esercizio. In blu sono inoltre rappresentate le SSE che saranno oggetto di nuova realizzazione, in rosso le SSE attualmente esistenti e in esercizio.

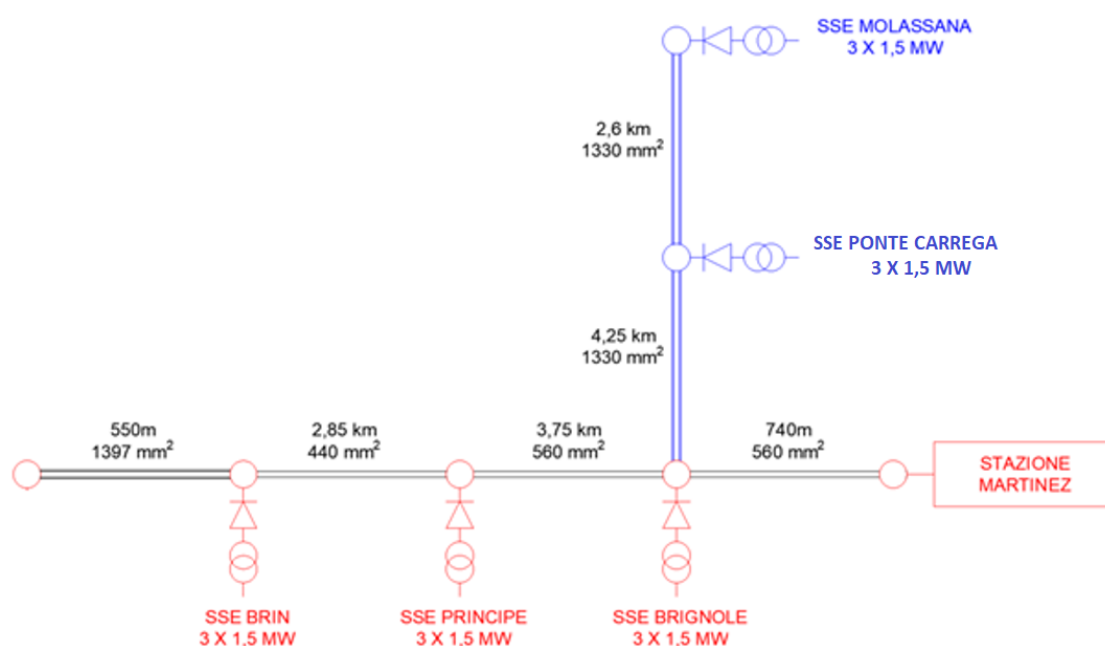


Figura 6. Sistema elettrico di trazione.

Le sottostazioni elettriche presenti sull'impianto sono ubicate in corrispondenza delle stazioni di Brin, Principe, Brignole, Ponte Carrega e Molassana. Ognuna di esse risulta equipaggiata con tre gruppi trasformatori-raddrizzatori, di cui due sempre in erogazione ed uno in riserva "calda", pronto ad essere inserito in sostituzione di uno degli altri due nell'eventualità che si verifichi qualsiasi problema.

Le principali caratteristiche elettriche di ciascun raddrizzatore sono le seguenti:

- potenza nominale 1500 kW
- corrente nominale (c.c.) 2000 A
- classe di sovraccarico classe VI CEI EN 60146 (150% della corrente nominale per 2 ore, 300% della corrente nominale per 1 minuto)

Considerando l'utilizzo di due raddrizzatori in parallelo, la caratteristica esterna della SSE risulta essere (potenza nominale 3000 kW):

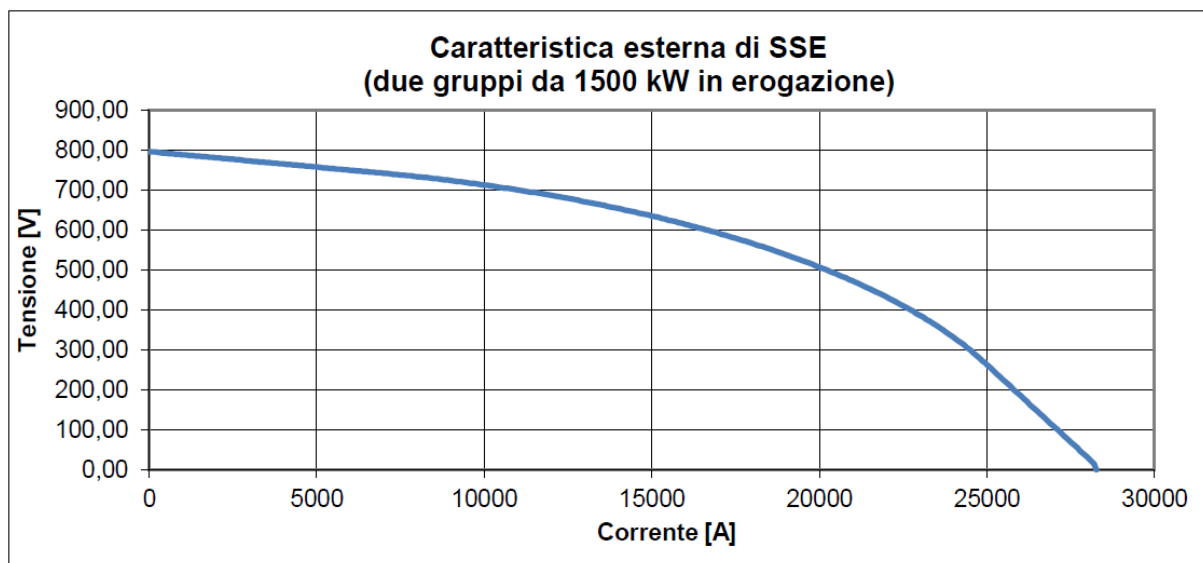


Figura 7. Caratteristica esterna di SSE

5. VERIFICA DEL SISTEMA ELETTRICO DI TRAZIONE

5.1 CRITERI DI VERIFICA

I carichi elettrici determinati dalla simulazione possono essere supportati dall'equipaggiamento installato nelle sottostazioni se le seguenti condizioni (corrispondenti alla classe VI, tab. 2, delle norme CEI EN 60146-1-1) sono verificate:

- 150% della corrente nominale per 2 ore
- 300% della corrente nominale per 1 minuto

I risultati della simulazione sono da valutarsi accettabili se vengono verificate le seguenti condizioni:

- la minima tensione di linea misurata in corrispondenza del pantografo dei tram deve essere sempre superiore al minimo valore ammesso di 500 V (norma CEI EN 50163)
- i carichi erogati dalle sottostazioni verificano sempre le condizioni sopra citate (150% per 2 ore, 300% per 1 minuto)
- il massimo valore calcolato del potenziale di binario deve essere inferiore al massimo ammesso dalla Norma CEI EN 50122-1 come valore continuativo e pari a 120 V.

Se queste condizioni sono sempre verificate, allora è possibile confermare che l'equipaggiamento di sottostazione è in grado di supportare il massimo carico elettrico calcolato e garantire le prestazioni di traffico considerate.

LOTTO COMPLETO

5.2 LOTTO 1 + LOTTO 2: Simulazioni Di Marcia Simulazioni Di Marcia

Nell'ambito dello studio di dimensionamento, sono state condotte simulazioni di marcia al fine di determinare l'andamento della velocità e i relativi consumi di potenza per il materiale rotabile preso in esame, considerando entrambi i sensi di percorrenza nella tratta oggetto di analisi. Si presenta di seguito simulazione di marcia relativa a treno di terza generazione in doppia composizione, con un tempo di sosta nelle varie stazioni intermedie pari a 20'', sia per quanto riguarda la tratta Storica (completa di prolungamento da Brignole a Martinez) sia per la nuova linea SkyMetro. Nel caso di tratta storica, viene riportata una casistica con limitazione di assorbimento in corrente pari a 2000A per il convoglio.

5.2.1 Treno Metro Genova III gen. UdT+UdT, sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez

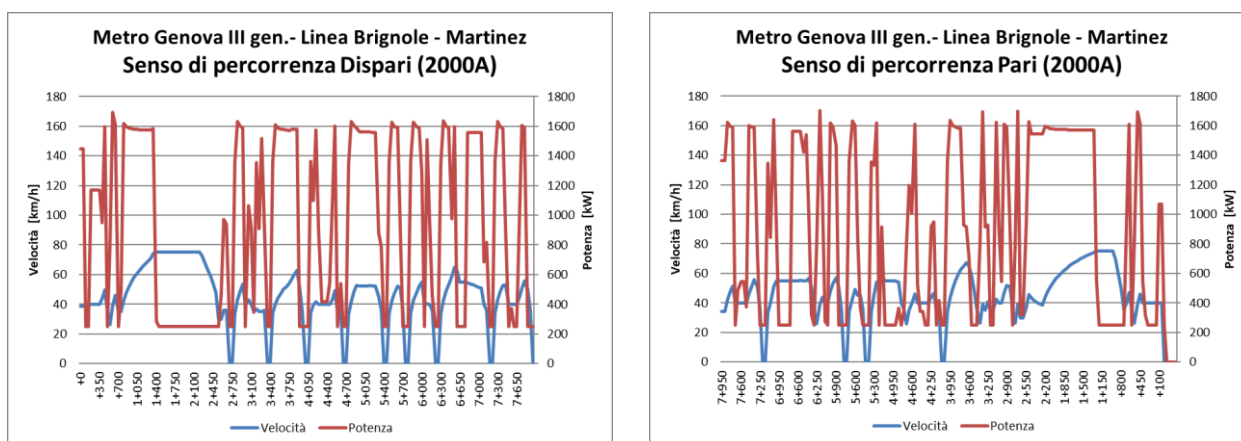


Figura 8. Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A).

La seguente tabella riassume inoltre le principali grandezze risultanti dalle simulazioni per entrambi i sensi di marcia.

Tabella 7. Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A)

	BIN. DISPARI	BIN. PARI
Tempi di percorrenza (hh:mm:ss)	14' 30''	13' 5''
Energia totale assorbita [kWh]	200,22	182,5
Energia specifica media assorbita per treno [kWh/tr.km]	25,18	22,95
Energia specifica media assorbita per kt [kWh/kt.km]	132,55	120,82
Potenza media per treno [kW]	828,1	836,3
Velocità media [km/h]	32,881	36,431

5.2.2 Treno Metro Genova III gen. UdT, sosta 20'' – Tratta Brignole-Molassana (Lotto completo)

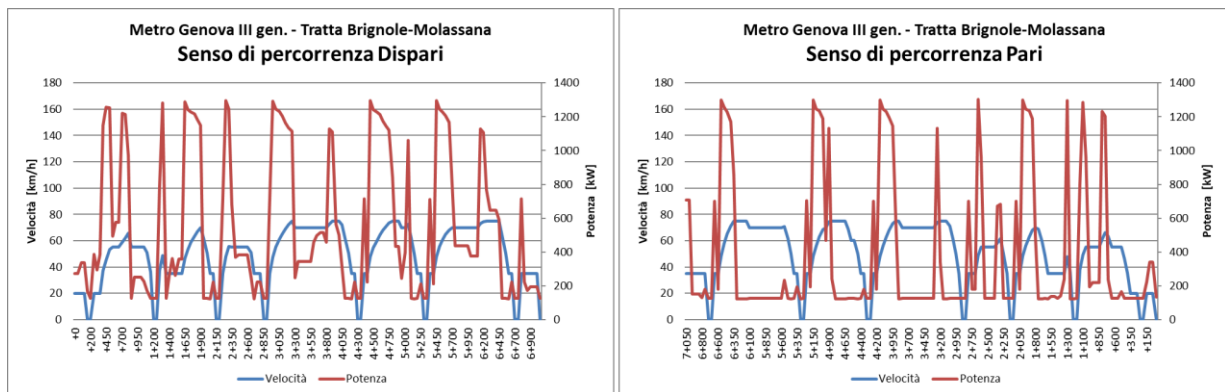


Figura 9. Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Brignole-Molassana.

La seguente tabella riassume inoltre le principali grandezze risultanti dalle simulazioni per entrambi i sensi di marcia.

Tabella 8. Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Brignole-Molassana

	BIN. DISPARI	BIN. PARI
Tempi di percorrenza (hh:mm:ss)	12'31"	12'29"
Energia totale assorbita [kWh]	92,26	69,21
Energia specifica media assorbita per treno [kWh/tr.km]	13,08	9,81
Energia specifica media assorbita per kt [kWh/kt.km]	137,75	103,33
Potenza media per treno [kW]	441,73	332,31
Velocità media [km/h]	33,755	33,851

5.3 LOTTO 1 + LOTTO 2: Risultato delle simulazioni del sistema elettrico di trazione

Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati delle simulazioni elettriche effettuate relativamente allo schema di alimentazione proposto nel capitolo 4.11. Nel dettaglio saranno analizzati i diversi scenari di esercizio che prevedono sia il sistema di trazione elettrica in funzionamento di normale servizio (tutte le SSE in servizio), sia il funzionamento in caso di fuori servizio delle SSE nella tratta SkyMetro. Sarà inoltre riportato il caso di normale funzionamento della Linea Canepari – Martinez in regime di normale esercizio e con il caso di fuori servizio della SSE Principe.

5.3.1 Normale esercizio - Cadenzamento 5 minuti

È stato preso in considerazione il traffico cadenzato a 5 minuti per senso di marcia di treni di terza generazione in doppia composizione sulla linea storica, mentre sulla linea SkyMetro è stato considerato un cadenzamento a 5 minuti per senso di marcia di treni di terza generazione a singola composizione.

Per i treni circolanti nella linea SkyMetro, in caso di normale esercizio, non sono previste limitazioni di assorbimento in corrente.

Per i treni circolanti nella storica, è stato necessario introdurre una limitazione della corrente assorbita dal veicolo a 2000 A: questa limitazione si ritiene necessaria a causa della catenaria flessibile presente attualmente che determina una caduta di tensione eccessiva (tensione minima inferiore a 500 V). Con questa limitazione, si ottiene la prestazione di traffico desiderata (cadenzamento a 5 minuti), portando come solo effetto collaterale un minimo aumento (circa 1 minuto) dei tempi di percorrenza da Canepari a Martinez e viceversa.

La limitazione in corrente nella linea storica può essere eliminata fornendo alla catenaria da 440mmq e 560mmq in tratta due alimentatori per binario, da 230 mmq l'uno.

Il traffico previsto nella linea SkyMetro è riportato nella figura sottostante:

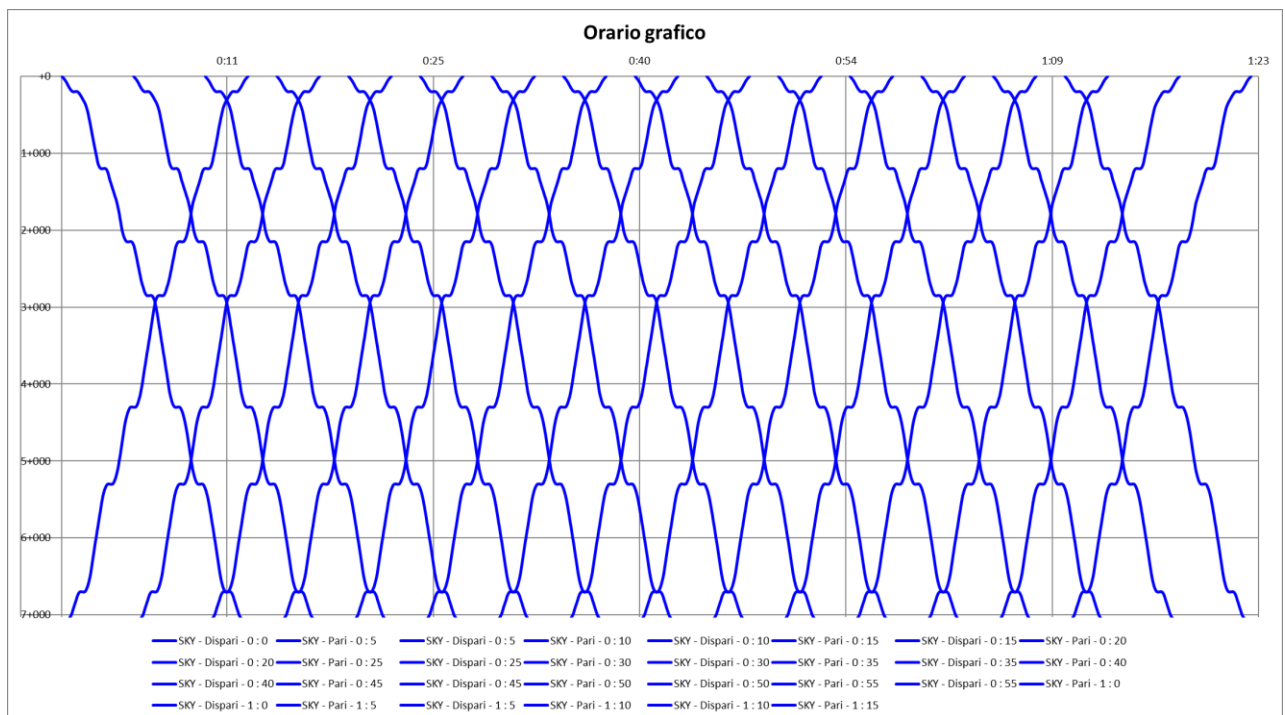


Figura 10. SkyMetro - Traffico Cadenzato 5 minuti

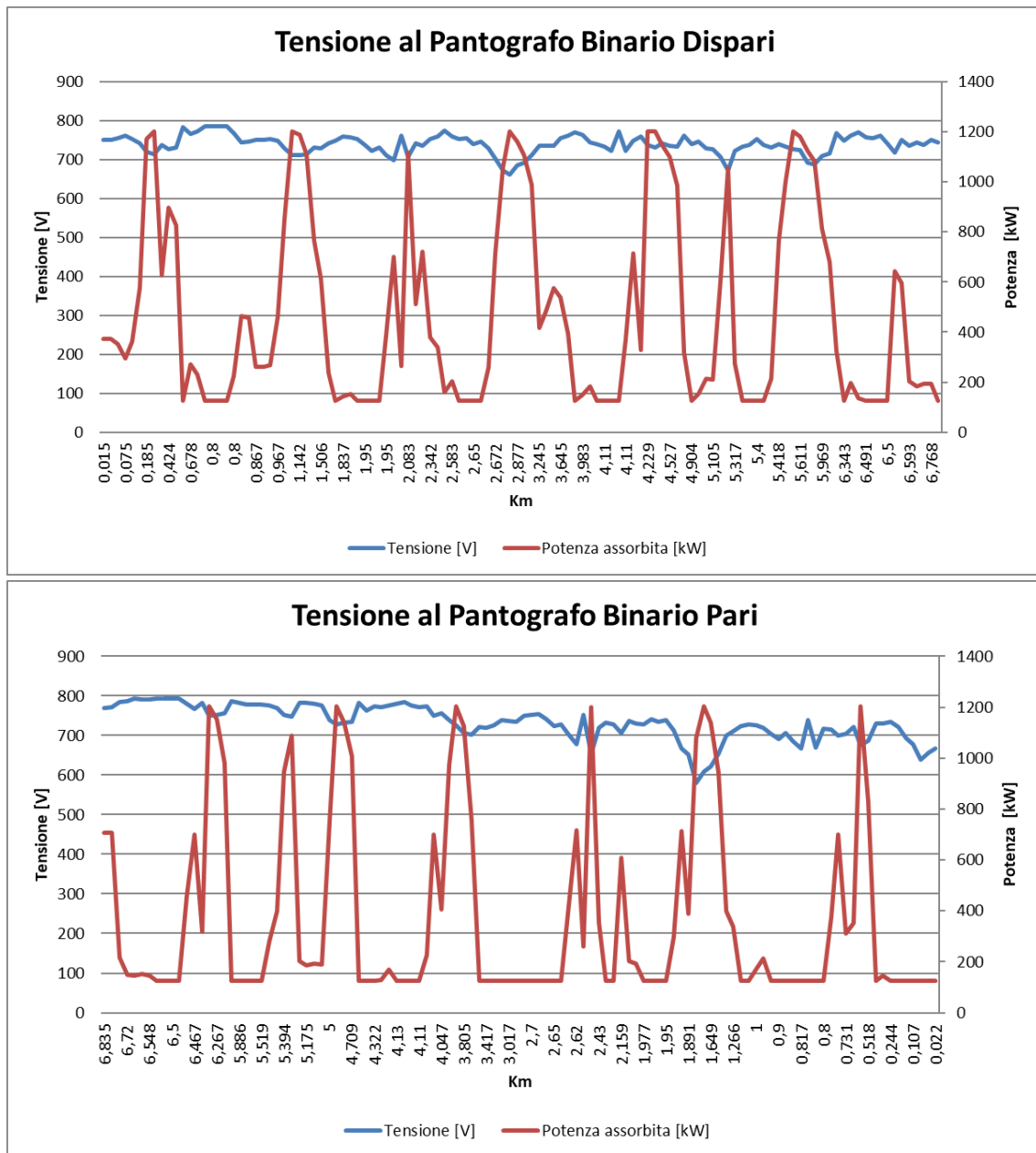


Figura 11. SkyMetro - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari



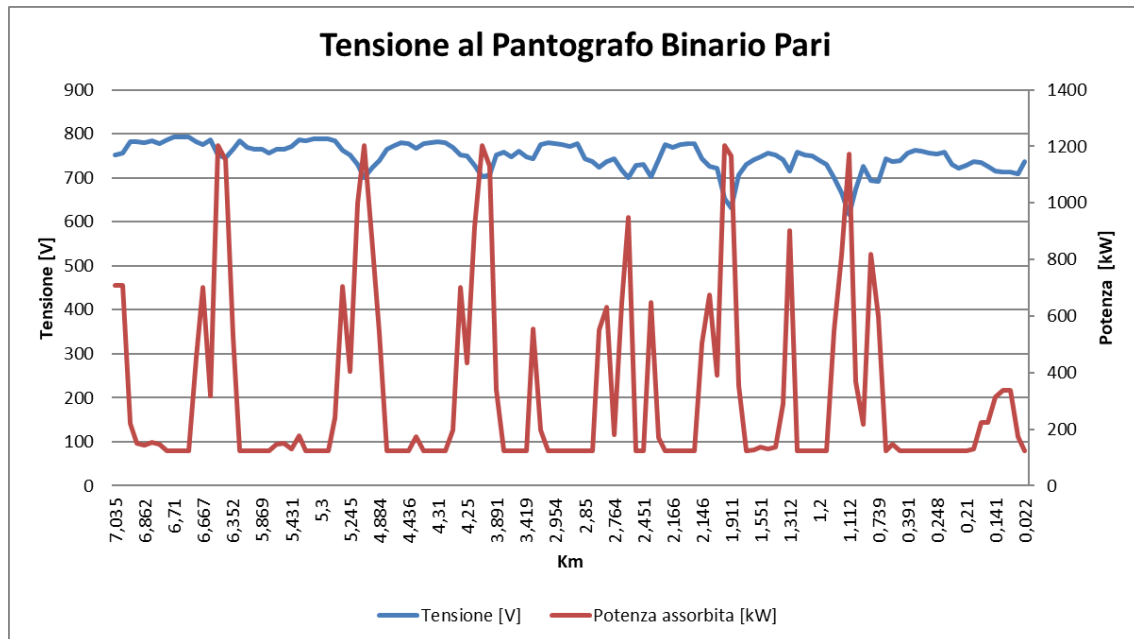


Figura 13. Linea storica - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari

Si evidenziano i risultati della simulazione considerando l'ora di punta:

Potenza media fornita da tutte le SSE (kW): 6898

Potenza media quadratica fornita da tutte le SSE (kW): 7364

Potenza massima fornita da tutte le SSE (kW): 12938

Tensioni Linea SkyMetro		
	Dispari	Pari
Tensione media utile[V]	722	724
Tensione minima [V]	631	617
Tensioni Linea Storica		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	676	676
Tensione minima [V]	556	553

Correnti in SSE [A]			
	Media	Media Q.	Massima
SSE Brin	1665	1916	3592
SSE Principe	2971	3164	5393
SSE Brignole	2787	3382	6889
SSE Ponte Carrega	2037	2323	3857
SSE Molassana	1358	1429	2455

Correnti massime viste da extrarapidi [A]		
Impianto	Direzione	I _{max} [A]
SSE Brignole	post. dispari	2372
	post. pari	1996
	ant. dispari	1984
	ant. pari	1445
SSE Ponte Carrega	post. dispari	2168
	post. pari	2247
	ant. dispari	1288
	ant. pari	1254
SSE Molassana	post. dispari	1284
	post. pari	1495

Potenze impianto [kW]			
Impianti	P _{media} [kW]	P _{media q.} [kW]	P _{max} [kW]
SSE Brin	1257	1393	2619
SSE Principe	2180	2290	3748
SSE Brignole	1938	2328	4973
SSE Ponte Carrega	1469	1525	2580
SSE Molassana	1016	1063	1760

Verifiche

1. Per quanto riguarda la verifica della caduta di tensione, si evince che il sistema di trazione elettrica è in grado di sostenere il traffico ipotizzato. Ci si attesta ben oltre il limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 631V e 617V sulla linea SkyMetro e 556V e 553V sulla linea storica (valori riferiti a binario pari e binario dispari);
2. Per quanto concerne la verifica dei gruppi di trazione, la potenza installata nelle SSE è ritenuta sufficiente per supportare il carico richiesto;
3. Per quanto riguarda le sovratemperature, la norma CEI EN 50119 riporta come limite di temperatura per il rame quello di 80°C per il regime permanente e 120°C per un tempo massimo di 30 minuti (a pantografo fermo). I valori di sovratemperatura sulla linea di contatto risultano essere:
 - nella linea SkyMetro: pari a 1°C sulla tratta posteriore dispari della SSE Ponte Carrega, per un valore di temperatura complessiva pari a 41°C (temperatura ambiente pari a 40°C).
 - nella linea storica: pari a 23,64°C sulla tratta anteriore dispari della SSE Principe, per un valore di temperatura complessiva pari a 63,64°C (temperatura ambiente pari a 40°C).

I valori di temperatura sulla linea di contatto risultano dunque essere al di sotto dei due limiti normativi.

5.3.2 Fuori servizio SSE Molassana

Si è valutato il sistema ai fini di ottenere la massima prestazione di traffico in relazione al totale fuori servizio della SSE Molassana sulla linea SkyMetro. In tale contesto, è stato operato un cadenzamento pari a **8 minuti**.

Sulla linea storica, si mantiene il normale esercizio (cadenzamento 5 minuti – limitazione a 2000 A).

Si evidenziano i risultati della simulazione della linea SkyMetro:

- Potenza media fornita da tutte le SSE (kW): 1203
- Potenza media quadratica fornita da tutte le SSE (kW): 1386
- Potenza massima fornita da tutte le SSE (kW): 4070

Tensioni		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	721	718
Tensione minima [V]	568	569
Tensioni Linea Storica		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	676	676
Tensione minima [V]	556	553

Correnti in SSE [A]			
	Media	Media Q.	Massima
SSE Brin	1665	1916	3592
SSE Principe	2971	3164	5393
SSE Brignole	2485	2921	6253
SSE Ponte Carrega	1279	1394	3585
SSE Molassana	-	-	-

Correnti massime viste da extrarapidi [A]		
Impianto	Direzione	I _{max} [A]
SSE Brignole	post. dispari	347
	post. pari	369
	ant. dispari	1323
	ant. pari	1007
SSE Ponte Carrega	post. dispari	1307
	post. pari	1534
	ant. dispari	1572
	ant. pari	1634

Potenze impianto [kW]			
Impianti	P _{media} [kW]	P _{media q.} [kW]	P _{max} [kW]
SSE Brin	1257	1393	2619
SSE Principe	2180	2290	3748
SSE Brignole	1730	2024	3912
SSE Ponte Carrega	957	1032	2868
SSE Molassana	-	-	-

Verifiche

1. Per quanto riguarda la verifica della caduta di tensione, si evince che il sistema di trazione elettrica è in grado di sostenere il traffico ipotizzato. Sulla linea SkyMetro si osservano tensioni minime al di sopra del limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 568V e 569V. Anche sulla linea storica ci si attesta ben oltre il limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 556V e 553V sulla linea storica (valori riferiti a binario pari e binario dispari);
2. Per quanto concerne la verifica dei gruppi di trazione, la potenza installata nelle SSE è ritenuta sufficiente per supportare il carico richiesto. In tutte le SSE il valore di corrente/potenza erogata è al di sotto dei valori nominali dei gruppi di trazione;
3. Per quanto riguarda le sovratemperature, la norma CEI EN 50119 riporta come limite di temperatura per il rame quello di 80°C per il regime permanente e 120°C per un tempo massimo di 30 minuti (a pantografo fermo). I valori massimi di sovratemperatura sulla linea di contatto risultano essere:
 - nella linea SkyMetro: pari a 0,62 °C sulla tratta anteriore dispari della SSE Ponte Carrega, per un valore di temperatura complessiva pari a 40,62°C (temperatura ambiente pari a 40°C).
 - nella linea storica: pari a 23,64°C sulla tratta anteriore dispari della SSE Principe, per un valore di temperatura complessiva pari a 63,64°C (temperatura ambiente pari a 40°C).

I valori di temperatura sulla linea di contatto risultano dunque essere al di sotto dei due limiti normativi.

5.3.3 Fuori servizio SSE Ponte Carrega

Si è valutato il sistema ai fini di ottenere la massima prestazione di traffico in relazione al totale fuori servizio della SSE Ponte Carrega sulla linea SkyMetro. In tale contesto, è stato operato un cadenzamento pari a 8 minuti.

Sulla linea storica, si mantiene il normale esercizio (cadenzamento 5 minuti – limitazione a 2000 A).

Si evidenziano i risultati della simulazione:

- Potenza media fornita da tutte le SSE (kW): 1222
- Potenza media quadratica fornita da tutte le SSE (kW): 1427
- Potenza massima fornita da tutte le SSE (kW): 3950

Tensioni		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	707	708
Tensione minima [V]	608	605
Tensioni Linea Storica		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	676	676
Tensione minima [V]	556	553

Correnti in SSE [A]			
	Media	Media Q.	Massima
SSE Brin	1665	1916	3592
SSE Principe	2971	3164	5393
SSE Brignole	2713	3246	6735
SSE Ponte Carrega	-	-	-
SSE Molassana	1222	1095	2604

Correnti massime viste da extrarapidi [A]		
Impianto	Direzione	I _{max} [A]
SSE Brignole	post. dispari	356
	post. pari	360
	ant. dispari	1422
	ant. pari	1172
SSE Ponte Carrega	post. dispari	1154
	post. pari	1245
	ant. dispari	653
	ant. pari	603
SSE Molassana	post. dispari	1431
	post. pari	1900
	ant. dispari	932
	ant. pari	524

Potenze impianto [kW]			
Impianti	P _{media} [kW]	P _{media q.} [kW]	P _{max} [kW]
SSE Brignole	1924	2245	4022
SSE Ponte Carrega	-	-	-
SSE Molassana	826	909	2083

Verifiche

1. Per quanto riguarda la verifica della caduta di tensione, si evince che il sistema di trazione elettrica è in grado di sostenere il traffico ipotizzato. Ci si attesta ben oltre il limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 608V e 605V sulla linea SkyMetro e 556V e 553V sulla linea storica (valori riferiti a binario pari e binario dispari);
2. Per quanto concerne la verifica dei gruppi di trazione, la potenza installata nelle SSE è ritenuta sufficiente per supportare il carico richiesto. In tutte le SSE il valore di corrente/potenza erogata è al di sotto dei valori nominali dei gruppi di trazione;
3. Per quanto riguarda le sovratemperature, la norma CEI EN 50119 riporta come limite di temperatura per il rame quello di 80°C per il regime permanente e 120°C per un tempo massimo di 30 minuti (a pantografo fermo). I valori massimi di sovratemperatura sulla linea di contatto risultano essere:
 - nella linea SkyMetro: pari a 0,93°C sulla tratta posteriore dispari della SSE Molassana, per un valore di temperatura complessiva pari a 40,93°C (temperatura ambiente pari a 40°C).
 - nella linea storica: pari a 23,64°C sulla tratta anteriore dispari della SSE Principe, per un valore di temperatura complessiva pari a 63,64°C (temperatura ambiente pari a 40°C).

I valori di temperatura sulla linea di contatto risultano dunque essere al di sotto dei due limiti normativi.

5.3.4 Fuori servizio SSE Brignole

Si è valutato il sistema ai fini di ottenere la massima prestazione di traffico in relazione al totale fuori servizio della SSE Brignole sulla linea SkyMetro. In tale contesto, è stato operato un cadenzamento pari a **8 minuti**. In questo scenario, è stato inoltre necessario introdurre una limitazione della corrente assorbita dal veicolo in singola composizione, pari a 1200 A: questa limitazione permette di garantire la prestazione di traffico desiderata, portando come solo effetto collaterale un minimo aumento (circa 10 sec per binario) dei tempi di percorrenza da Brignole a Molassana e viceversa. Nello specifico:

- senza limitazione: 12 min e 31 sec (binario dispari) – 12 min e 29 sec (binario pari)
- con limitazione a 1200 A: 12 min e 42 sec (binario dispari) – 12 min 36 sec (binario pari)

Sulla linea storica, si opera invece in questo modo:

- è stato operato un cadenzamento pari a 20 minuti (un treno circolante in linea) nella linea storica;

Si evidenziano i risultati della simulazione:

- Potenza media fornita da tutte le SSE (kW): 1126
- Potenza media quadratica fornita da tutte le SSE (kW): 1318
- Potenza massima fornita da tutte le SSE (kW): 3356

Tensioni Linea SkyMetro		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	725	729
Tensione minima [V]	552	559
Tensioni Linea Storica		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	707	701
Tensione minima [V]	560	550

Correnti in SSE [A]			
	Media	Media Q.	Massima
SSE Brin	229	478	2506
SSE Principe	506	692	2438
SSE Brignole	-	-	-
SSE Ponte Carrega	893	1047	2647
SSE Molassana	582	694	1548

Correnti massime viste da extrarapidi [A]		
Impianto	Direzione	I _{max} [A]
SSE Brignole	post. dispari	398
	post. pari	395
	ant. dispari	638
	ant. pari	528
SSE Ponte Carrega	post. dispari	1470
	post. pari	1618
	ant. dispari	926
	ant. pari	749
SSE Molassana	post. dispari	923
	post. pari	1102
	ant. dispari	919
	ant. pari	508

Potenze impianto [kW]			
Impianti	P _{media} [kW]	P _{media q.} [kW]	P _{max} [kW]
SSE Brin	177	366	1877
SSE Principe	393	533	1593
SSE Brignole	-	-	-
SSE Ponte Carrega	677	786	2118
SSE Molassana	449	532	1238

Verifiche

- Per quanto riguarda la verifica della caduta di tensione, si evince che il sistema di trazione elettrica è in grado di sostenere il traffico ipotizzato. Sulla linea SkyMetro Ci si attesta non di molto al di sopra del limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 552V e 559V. Sulla linea storica ci si attesta ben oltre il limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 560V e 550V sulla linea storica (valori riferiti a binario pari e binario dispari);
- Per quanto concerne la verifica dei gruppi di trazione, la potenza installata nelle SSE è ritenuta sufficiente per supportare il carico richiesto. In tutte le SSE il valore di corrente/potenza erogata è al di sotto dei valori nominali dei gruppi di trazione;
- Per quanto riguarda le sovratemperature, la norma CEI EN 50119 riporta come limite di temperatura per il rame quello di 80°C per il regime permanente e 120°C per un tempo massimo di 30 minuti (a pantografo fermo). I valori massimi di sovratemperatura sulla linea di contatto risultano essere:
 - nella linea SkyMetro: pari a 0,75°C sulla tratta posteriore pari della SSE Ponte Carrega, per un valore di temperatura complessiva pari a 40,75°C (temperatura ambiente pari a 40°C).

- nella linea storica: pari a $9,58^{\circ}\text{C}$ sulla tratta anteriore dispari della SSE Principe, per un valore di temperatura complessiva pari a $63,64^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente pari a 40°C).

I valori di temperatura sulla linea di contatto risultano dunque essere al di sotto dei due limiti normativi.

LOTTO 1

5.4 LOTTO 1: Simulazioni Di Marcia

Nell'ambito dello studio di dimensionamento, sono state condotte simulazioni di marcia al fine di determinare l'andamento della velocità e i relativi consumi di potenza per il materiale rotabile preso in esame, considerando entrambi i sensi di percorrenza nella tratta oggetto di analisi. Si presenta di seguito simulazione di marcia relativa a treno di terza generazione in doppia composizione, con un tempo di sosta nelle varie stazioni intermedie pari a 20'', sia per quanto riguarda la tratta Storica (completa di prolungamento da Brignole a Martinez) sia per la nuova linea SkyMetro. Nel caso di tratta storica, viene riportata una casistica con limitazione di assorbimento in corrente pari a 2000A per il convoglio.

5.4.1 Treno Metro Genova III gen. UdT+UdT, sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez

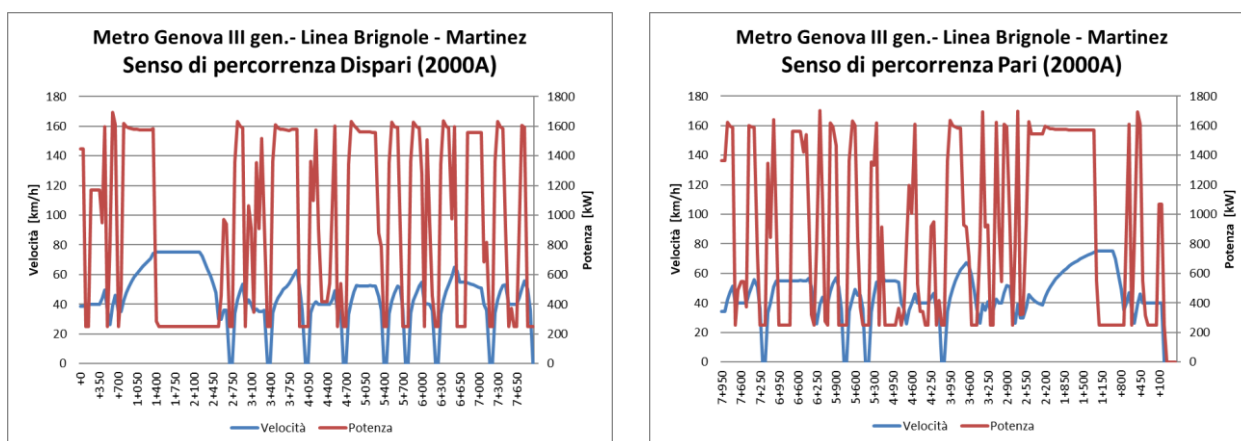


Figura 14. Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A).

La seguente tabella riassume inoltre le principali grandezze risultanti dalle simulazioni per entrambi i sensi di marcia.

Tabella 9. Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Canepari-Martinez (2000A)

	BIN. DISPARI	BIN. PARI
Tempi di percorrenza (hh:mm:ss)	14' 30''	13' 5''
Energia totale assorbita [kWh]	200,22	182,5
Energia specifica media assorbita per treno [kWh/tr.km]	25,18	22,95
Energia specifica media assorbita per kt [kWh/kt.km]	132,55	120,82
Potenza media per treno [kW]	828,1	836,3
Velocità media [km/h]	32,881	36,431

5.4.2 Treno Metro Genova III gen. UdT, sosta 20'' – Tratta Brignole-Ponte Carrega

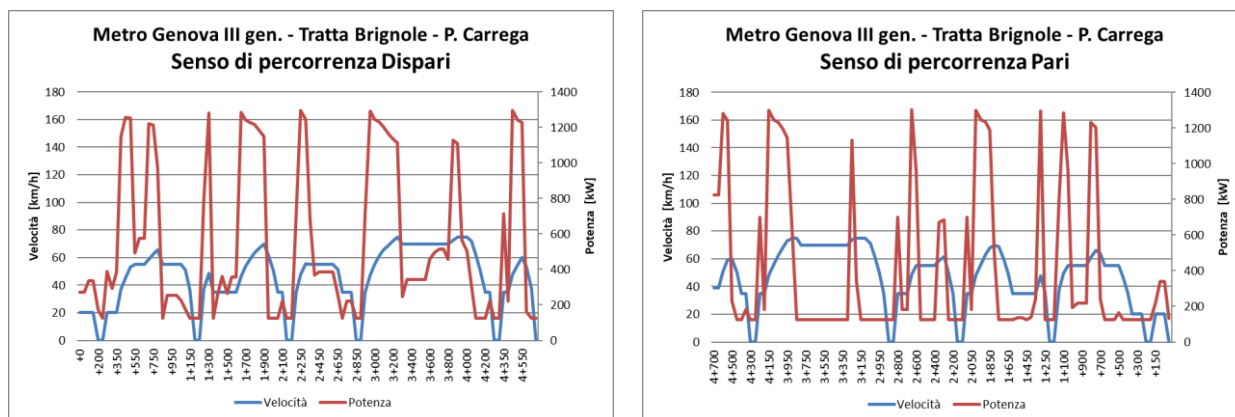


Figura 15. Profilo di marcia potenza/velocità Treno UdT III Gen sosta 20'' – Tratta Brignole-Ponte Carrega.

La seguente tabella riassume inoltre le principali grandezze risultanti dalle simulazioni per entrambi i sensi di marcia.

Tabella 10. Informazioni marcia treno UdT III Gen. Sosta 20'' – Tratta Brignole-Ponte Carrega

	BIN. DISPARI	BIN. PARI
Tempi di percorrenza (hh:mm:ss)	8'55"	8'53"
Energia totale assorbita [kWh]	65,39	50,78
Energia specifica media assorbita per treno [kWh/tr.km]	13,91	10,8
Energia specifica media assorbita per kt [kWh/kt.km]	146,45	113,72
Potenza media per treno [kW]	439,34	342,47
Velocità media [km/h]	31,578	31,698

5.5 LOTTO 1: Risultato delle simulazioni del sistema elettrico di trazione

Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati delle simulazioni elettriche effettuate relativamente allo schema di alimentazione proposto nel capitolo 4.1. Nel dettaglio saranno analizzati i diversi scenari di esercizio che prevedono sia il sistema di trazione elettrica in funzionamento di normale servizio (tutte le SSE in servizio), sia il funzionamento in caso di fuori servizio delle SSE nella tratta SkyMetro, in riferimento al Lotto 1. Sarà inoltre riportato il caso di normale funzionamento della Linea Canepari – Martinez in regime di normale esercizio e con il caso di fuori servizio della SSE Principe.

5.5.1 Normale esercizio - Cadenzamento 5 minuti

È stato preso in considerazione il traffico cadenzato a 5 minuti per senso di marcia di treni di terza generazione in doppia composizione sulla linea storica, mentre sulla linea SkyMetro – Lotto 1 è stato considerato un cadenzamento a 5 minuti per senso di marcia di treni di terza generazione a singola composizione.

Per i treni circolanti nella linea SkyMetro – Lotto 1, in caso di normale esercizio, non sono previste limitazioni di assorbimento in corrente.

Per i treni circolanti nella storica, è stato necessario introdurre una limitazione della corrente assorbita dal veicolo a 2000 A: questa limitazione si ritiene necessaria a causa della catenaria flessibile presente attualmente che determina una caduta di tensione eccessiva (tensione minima inferiore a 500 V). Con questa limitazione, si ottiene la prestazione di traffico desiderata (cadenzamento a 5 minuti), portando come solo effetto collaterale un minimo aumento (circa 1 minuto) dei tempi di percorrenza da Canepari a Martinez e viceversa.

La limitazione in corrente nella linea storica può essere eliminata fornendo alla catenaria da 440mmq e 560mmq in tratta due alimentatori per binario, da 230 mmq l'uno.

Il traffico previsto nella linea SkyMetro è riportato nella figura sottostante:

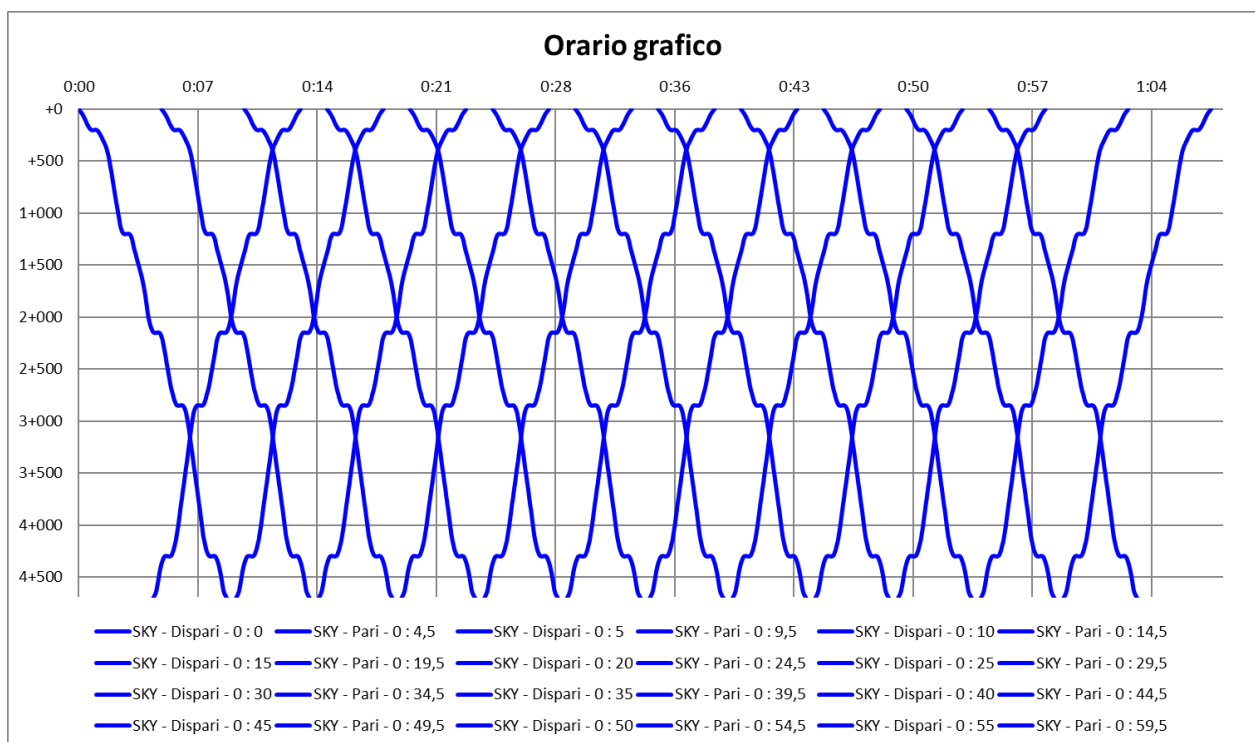


Figura 16. SkyMetro - Traffico Cadenzato 5 minuti – Lotto 1

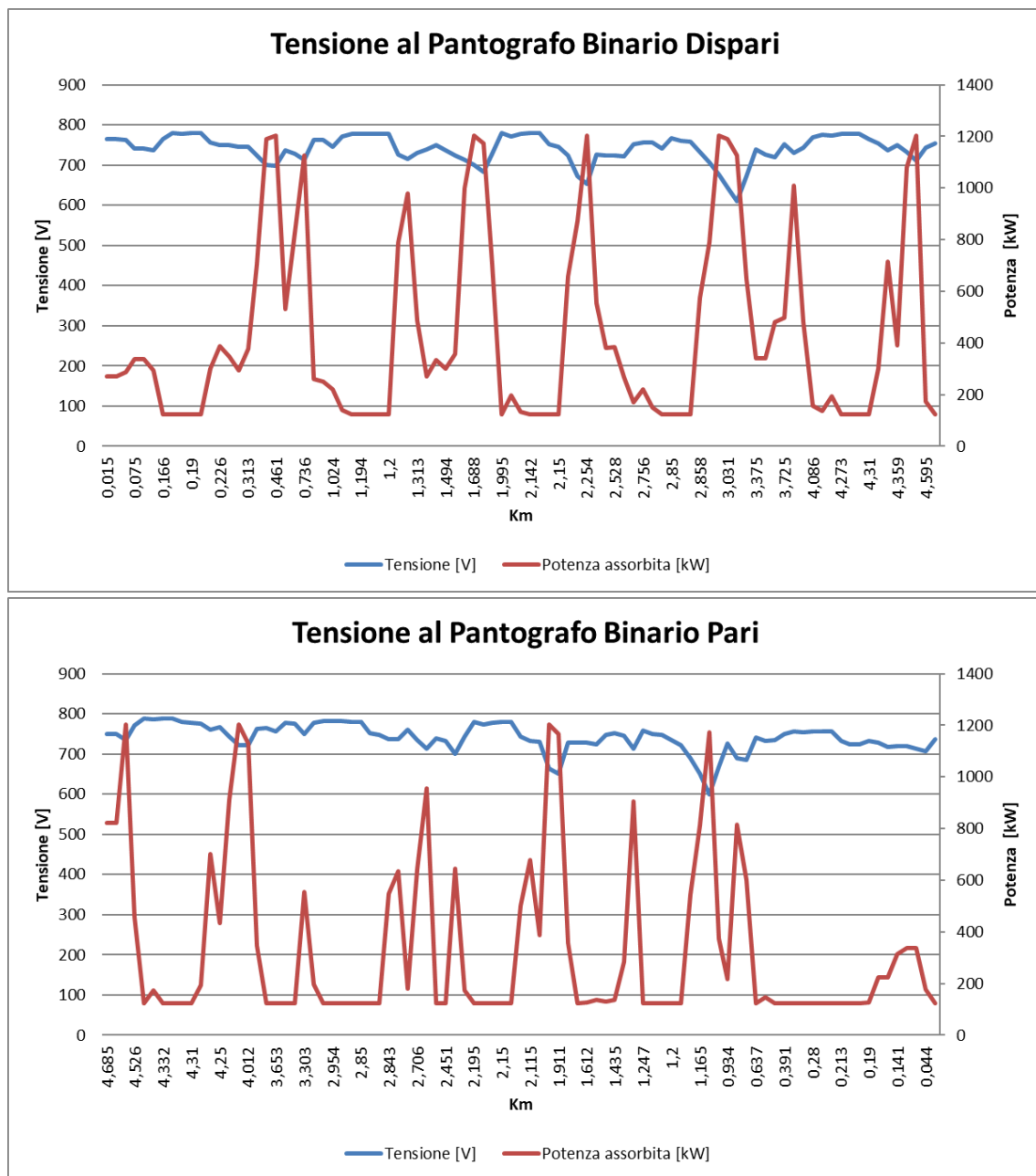


Figura 17. SkyMetro - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari – Lotto 1

Il traffico previsto nella linea storica è riportato nella figura sottostante:

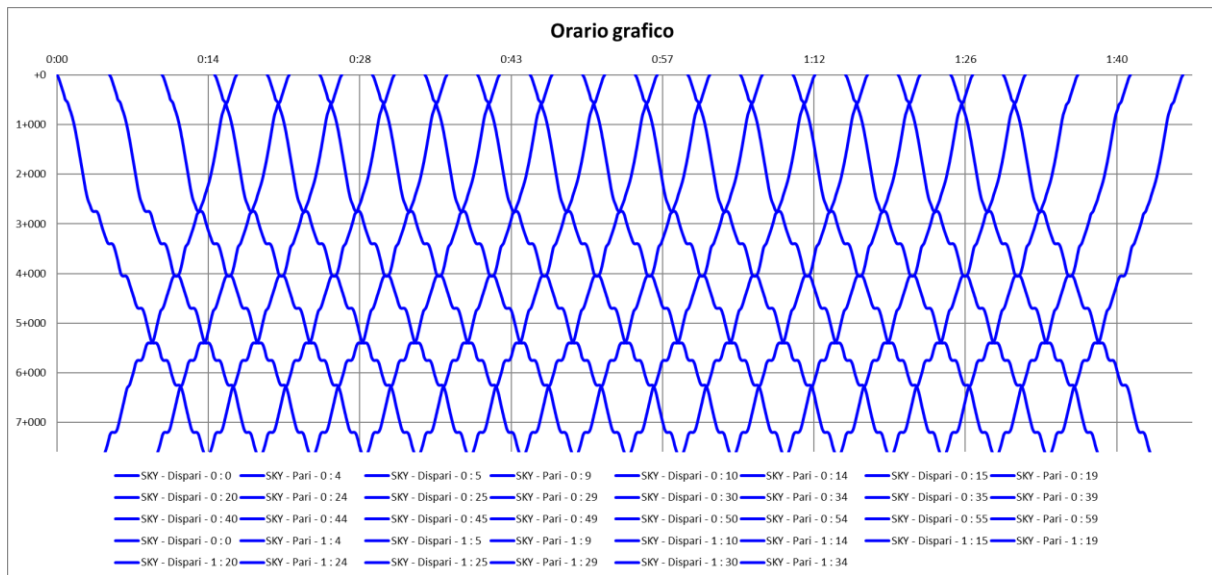
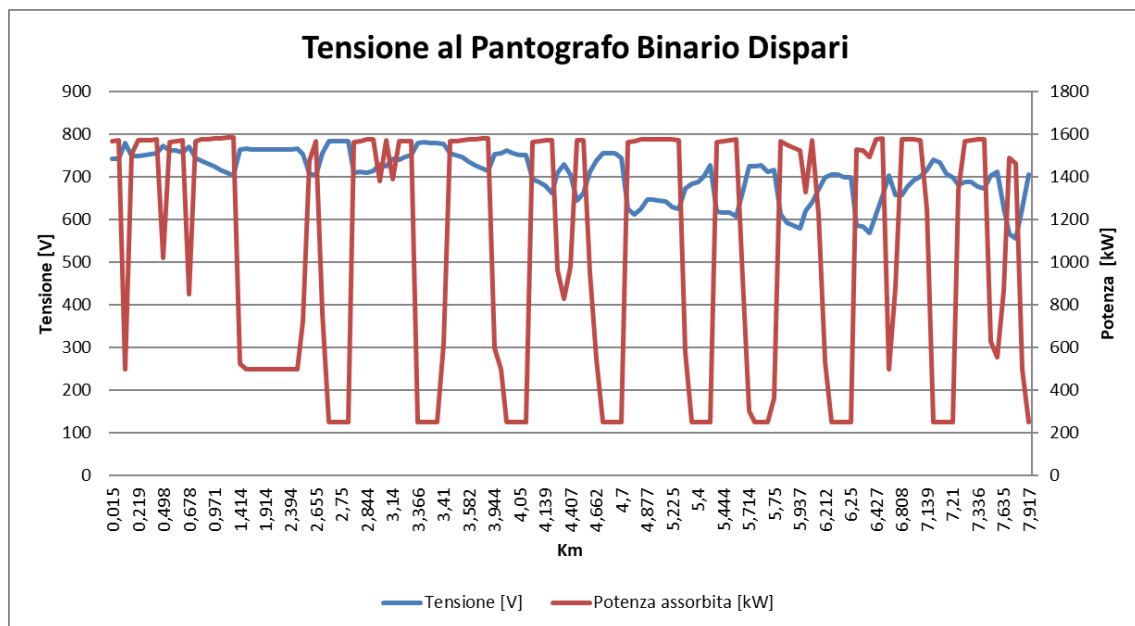


Figura 18. Linea 'storica' – Traffico 5 minuti



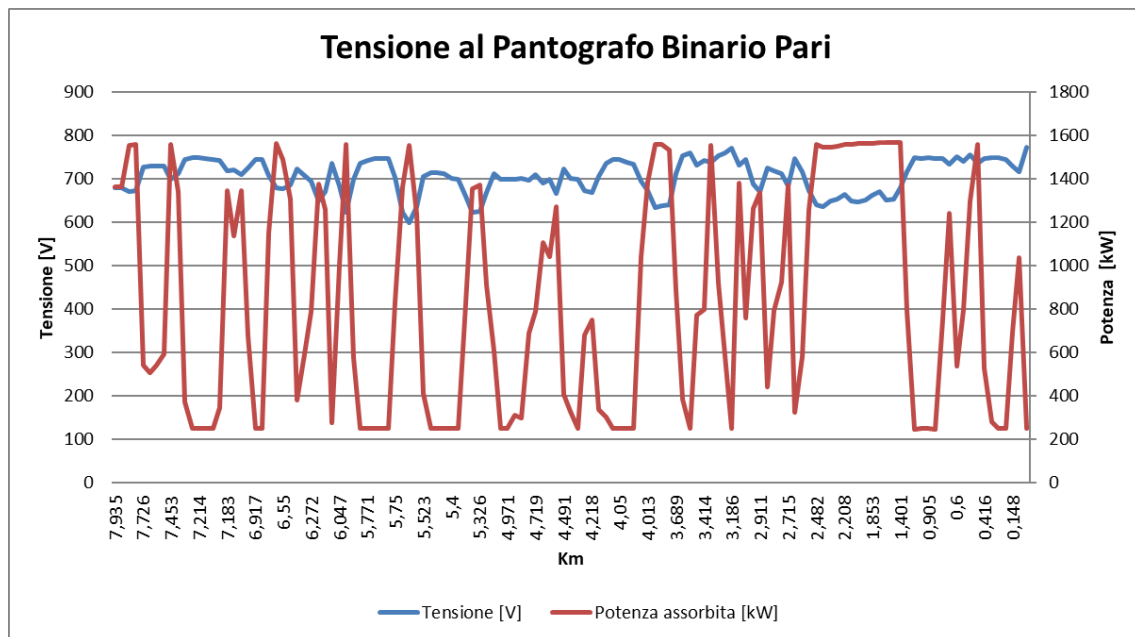


Figura 19. Linea storica - Profilo tensione e potenza del veicolo – binario pari e binario dispari

Tensioni Linea SkyMetro		
	Dispari	Pari
Tensione media utile[V]	706	709
Tensione minima [V]	610	599
Tensioni Linea Storica		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	676	676
Tensione minima [V]	556	553

Correnti in SSE [A]			
	Media	Media Q.	Massima
SSE Brin	1665	1916	3592
SSE Principe	2971	3164	5393
SSE Brignole	2824	3411	6528
SSE Ponte Carrega	1223	1456	4094

Correnti massime viste da extrarapidi [A]		
Impianto	Direzione	I _{max} [A]
SSE Brignole	post. dispari	355
	post. pari	373
	ant. dispari	2112
	ant. pari	1370
SSE Ponte Carrega	post. dispari	1651
	post. pari	2443
	ant. dispari	1269
	ant. pari	1006

Potenze impianto [kW]			
Impianti	P _{media} [kW]	P _{media q.} [kW]	P _{max} [kW]
SSE Brin	1257	1393	2619
SSE Principe	2180	2290	3748
SSE Brignole	1960	2345	4761
SSE Ponte Carrega	906	1057	3275

Verifiche

4. Per quanto riguarda la verifica della caduta di tensione, si evince che il sistema di trazione elettrica è in grado di sostenere il traffico ipotizzato. Ci si attesta ben oltre il limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 610V e 599V sulla linea SkyMetro e 556V e 553V sulla linea storica (valori riferiti a binario pari e binario dispari);
5. Per quanto concerne la verifica dei gruppi di trazione, la potenza installata nelle SSE è ritenuta sufficiente per supportare il carico richiesto;
6. Per quanto riguarda le sovratemperature, la norma CEI EN 50119 riporta come limite di temperatura per il rame quello di 80°C per il regime permanente e 120°C per un tempo massimo di 30 minuti (a pantografo fermo). I valori di sovratemperatura sulla linea di contatto risultano essere:
 - nella linea SkyMetro: pari a 0,94°C sulla tratta posteriore dispari della SSE Ponte Carrega, per un valore di temperatura complessiva pari a 40,94°C (temperatura ambiente pari a 40°C).
 - nella linea storica: pari a 23,64°C sulla tratta anteriore dispari della SSE Principe, per un valore di temperatura complessiva pari a 63,64°C (temperatura ambiente pari a 40°C).

I valori di temperatura sulla linea di contatto risultano dunque essere al di sotto dei due limiti normativi.

5.5.2 Fuori servizio SSE Ponte Carrega

Si è valutato il sistema ai fini di ottenere la massima prestazione di traffico in relazione al totale fuori servizio della SSE Ponte Carrega sulla linea SkyMetro. In tale contesto, è stato operato un cadenzamento pari a **8 minuti**. In questo scenario, è stato inoltre necessario introdurre una limitazione della corrente assorbita dal veicolo in singola composizione, pari a 800 A: questa limitazione permette di garantire la prestazione di traffico desiderata, portando come solo effetto collaterale un minimo aumento (circa 28 sec per il binario dispari e 17 sec per il binario pari) dei tempi di percorrenza da Brignole a Molassana e viceversa. Nello specifico:

- senza limitazione: 8 min e 55 sec (binario dispari) – 8 min e 53 sec (binario pari)
- con limitazione a 800 A: 9 min 27 sec (binario dispari) – 9 min 10 sec (binario pari)

Sulla linea storica, si mantiene il normale esercizio (cadenzamento 5 minuti – limitazione a 2000 A).

Si evidenziano i risultati della simulazione:

- Potenza media fornita da tutte le SSE (kW): 778
- Potenza media quadratica fornita da tutte le SSE (kW): 869
- Potenza massima fornita da tutte le SSE (kW): 2045

Tensioni Linea SkyMetro		
	Dispari	Pari
Tensione media utile [V]	667	662
Tensione minima [V]	527	525
Tensioni Linea Storica		
	Dispari	Pari
Tensione media utile [V]	676	676
Tensione minima [V]	556	553

Correnti in SSE [A] (solo Skymetro)			
	Media	Media Q.	Massima
SSE Brignole	1108	1250	2727
SSE Ponte Carrega	-	-	-

Correnti massime viste da extrarapidi [A]		
Impianto	Direzione	I _{max} [A]
SSE Brignole	post. dispari	359
	post. pari	402
	ant. dispari	1562
	ant. pari	1293
SSE Ponte Carrega	post. dispari	362
	post. pari	418
	ant. dispari	1335
	ant. pari	930

Potenze impianto [kW] (solo Skymetro)			
Impianti	P _{media} [kW]	P _{media q.} [kW]	P _{max} [kW]
SSE Brignole	778	869	2045
SSE Ponte Carrega	-	-	-

Verifiche

4. Per quanto riguarda la verifica della caduta di tensione, si evince che il sistema di trazione elettrica è in grado di sostenere il traffico ipotizzato. Ci si attesta ben oltre il limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 527V e 525V sulla linea SkyMetro e 556V e 553V sulla linea storica (valori riferiti a binario pari e binario dispari);
5. Per quanto concerne la verifica dei gruppi di trazione, la potenza installata nelle SSE è ritenuta sufficiente per supportare il carico richiesto. In tutte le SSE il valore di corrente/potenza erogata è al di sotto dei valori nominali dei gruppi di trazione;
6. Per quanto riguarda le sovratemperature, la norma CEI EN 50119 riporta come limite di temperatura per il rame quello di 80°C per il regime permanente e 120°C per un tempo massimo di 30 minuti (a pantografo fermo). I valori massimi di sovratemperatura sulla linea di contatto risultano essere:
 - nella linea SkyMetro: pari a 0,93°C sulla tratta posteriore dispari della SSE Molassana, per un valore di temperatura complessiva pari a 40,93°C (temperatura ambiente pari a 40°C).
 - nella linea storica: pari a 23,64°C sulla tratta anteriore dispari della SSE Principe, per un valore di temperatura complessiva pari a 63,64°C (temperatura ambiente pari a 40°C).

I valori di temperatura sulla linea di contatto risultano dunque essere al di sotto dei due limiti normativi.

5.5.3 Fuori servizio SSE Brignole

Si è valutato il sistema ai fini di ottenere la massima prestazione di traffico in relazione al totale fuori servizio della SSE Brignole sulla linea SkyMetro. In tale contesto, è stato operato un cadenzamento pari a **8 minuti**. In questo scenario, è stato inoltre necessario introdurre una limitazione della corrente assorbita dal veicolo in singola composizione, pari a 1200 A: questa limitazione permette di garantire la prestazione di traffico desiderata, portando come solo effetto collaterale un minimo aumento (circa 11 sec per il binario dispari e 7 sec per il binario pari) dei tempi di percorrenza da Brignole a Molassana e viceversa. Nello specifico:

- senza limitazione: 8 min e 55 sec (binario dispari) – 8 min e 53 sec (binario pari)
- con limitazione a 1200 A: 9 min e 3 sec (binario dispari) – 8 min 58 sec (binario pari)

Sulla linea storica, si opera invece in questo modo:

- è stato operato un cadenzamento pari a 20 minuti (un treno circolante in linea) nella linea storica;

Si evidenziano i risultati della simulazione:

- Potenza media fornita da tutte le SSE (kW): 835
- Potenza media quadratica fornita da tutte le SSE (kW): 958
- Potenza massima fornita da tutte le SSE (kW): 2433

Tensioni Linea SkyMetro		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	705	709
Tensione minima [V]	528	534
Tensioni Linea Storica		
	Dispari	Pari
Tensione media [V]	707	701
Tensione minima [V]	560	550

Correnti in SSE [A]			
	Media	Media Q.	Massima
SSE Brignole	-	-	-
SSE Ponte Carrega	1114	1295	3041

Correnti massime viste da extrarapidi [A]		
Impianto	Direzione	I _{max} [A]
SSE Ponte Carrega	post. dispari	1442
	post. pari	1599
	ant. dispari	957
	ant. pari	841

Potenze impianto [kW] (solo Skymetro)			
Impianti	P _{media} [kW]	P _{media q.} [kW]	P _{max} [kW]
SSE Brignole	-	-	-
SSE Ponte Carrega	835	958	2433

Verifiche

1. Per quanto riguarda la verifica della caduta di tensione, si evince che il sistema di trazione elettrica è in grado di sostenere il traffico ipotizzato. Sulla linea SkyMetro ci si attesta non di molto al di sopra del limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 528V e 534V. Sulla linea storica ci si attesta ben oltre il limite normativo fissato dalla norma CEI EN 50163 pari a 500V, registrando valori minimi di 560V e 550V sulla linea storica (valori riferiti a binario pari e binario dispari);
2. Per quanto concerne la verifica dei gruppi di trazione, la potenza installata nelle SSE è ritenuta sufficiente per supportare il carico richiesto. In tutte le SSE il valore di corrente/potenza erogata è al di sotto dei valori nominali dei gruppi di trazione;
3. Per quanto riguarda le sovratemperature, la norma CEI EN 50119 riporta come limite di temperatura per il rame quello di 80°C per il regime permanente e 120°C per un tempo massimo di 30 minuti (a pantografo fermo). I valori massimi di sovratemperatura sulla linea di contatto risultano essere:
 - nella linea SkyMetro: pari a 0,74°C sulla tratta posteriore pari della SSE Ponte Carrega, per un valore di temperatura complessiva pari a 40,74°C (temperatura ambiente pari a 40°C).
 - nella linea storica: pari a 9,58°C sulla tratta anteriore dispari della SSE Principe, per un valore di temperatura complessiva pari a 63,64°C (temperatura ambiente pari a 40°C).

I valori di temperatura sulla linea di contatto risultano dunque essere al di sotto dei due limiti normativi.

6. VERIFICA DEL POTENZIALE DI BINARIO

La progettazione del circuito di ritorno deve essere effettuata conformemente alle prescrizioni della norma EN 50122-1. Ai fini della sicurezza per le persone, la norma prescrive che la massima tensione effettiva di contatto a regime permanente nel corpo umano è pari a 120V nei sistemi a corrente continua. Pertanto, ne consegue che il circuito di ritorno deve essere progettato con l'obiettivo di ottenere un potenziale di rotaia inferiore a questo valore.

Prendendo in considerazione una situazione di traffico cadenzato a 5 minuti, è stato considerato il caso in cui due treni che si trovano nella medesima sezione di tratta (molto vicini tra loro, distanziati a meno di 200m) su binari diversi (Pari e Dispari) con situazione che si ripete in vari punti della tratta, considerando il traffico cadenzato a 5 minuti. Tale casistica è quella peggiore possibile, in quanto prevede molteplici treni che si incrociano nel medesimo punto. Per ogni treno, è stato considerato l'assorbimento della piena corrente di spunto in singola composizione (1525A). Per tale ipotesi conservativa, è risultato un potenziale di binario pari a 43 V, inferiori al limite massimo di 120 V previsto dalla norma EN 50122-1.

Tale verifica è stata effettuata anche nel caso di fuori servizio, ipotizzando un medesimo posizionamento dei treni (quindi in una situazione peggiorativa). Nel caso del fuori servizio della SSE di Molassana, si osserva un valore di potenziale massimo di binario pari a 101V, mentre nel caso di fuori servizio della SSE Ponte Carrega si ottiene un valore pari a 75V. Entrambi tali limiti rientrano all'interno dei valori normativi.

Per verificare il fuori servizio della SSE Brignole, è stato necessario considerare il ripetersi della situazione di incrocio ogni 8 minuti, con assorbimenti considerati pari a 1200A. In tale casistica, si osserva un potenziale di binario pari a 106V. È opportuno ricordare che tale casistica è stata ipotizzata considerando il tratto Brignole-Molassana isolato elettricamente. Il contributo delle SSE della linea storica consentirebbe di ottenere potenziali di binario inferiori.

7. CALCOLO MINIMA CORRENTE DI CORTO CIRCUITO TRATTA SKYMETRO

Per quanto riguarda il calcolo della corrente di corto-circuito minima di tratta, si è considerato il seguente caso (critico) di corto-circuito linea e binario:

- corto circuito in corrispondenza della SSE Ponte Carrega con SSE Ponte Carrega 'aperta';
- corto circuito alimentato a sbalzo dalla SSE Brignole (tratta alimentata di 4,2 km);

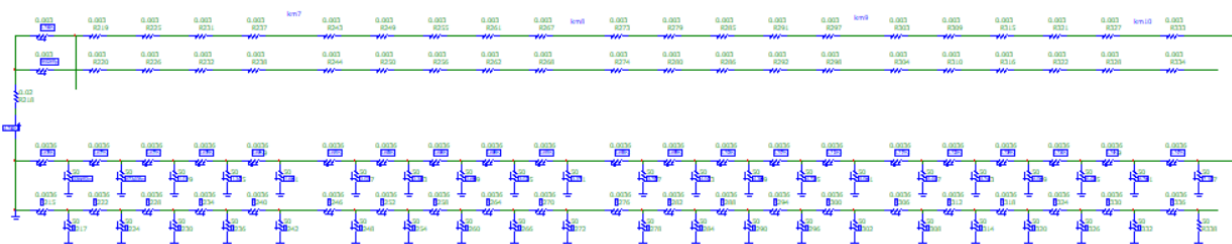


Figura 20. Orario di esercizio previsto nella casistica oggetto di analisi.

La corrente di corto circuito risulta pari a 4747 A. Considerando che la massima corrente vista da un interruttore extrarapido è di 3187 A, si ritiene che con una corretta taratura degli extrarapidi si ottenga una protezione adeguata dal corto circuito. Per una ulteriore sicurezza di individuazione del guasto, si prevederanno degli RV (rilevatori di tensione) in corrispondenza di metà tratta tra le SSE (sia tra Brignole e Ponte Carrega che tra Ponte Carrega e Molassana).

Si rimanda alla fase di progettazione esecutiva una analisi definitiva sulle correnti di guasto e sulle valutazioni sulle tarature delle protezioni, sulla base delle effettive condizioni di installazione e le specifiche apparecchiature previste.

8. ALIMENTAZIONE DELLE SSE

Per entrambe le nuove SSE di Ponte Carrega e Molassana verrà fatta richiesta di connessione alla rete MT del distributore, e ciascuna di esse sarà alimentata da una linea in antenna. Sarebbe preferibile che le due SSE venissero alimentate da linee derivate da fonti indipendenti. In ciascuna SSE sarà previsto un locale distributore e un locale misure per la gestione della linea MT di alimentazione secondo quanto previsto dalla CEI 0-16.

Al fine di migliorare la continuità del servizio e l'affidabilità del sistema, si prevede una connessione MT tra le SSE Ponte Carrega e Molassana: questa connessione rappresenta un'alimentazione di soccorso per ciascuna SSE. In caso di fuori servizio dell'alimentazione del distributore in una delle SSE, l'altra SSE potrà rialimentare la SSE 'guasta' tramite questa connessione (*vedi MGE1PRLVLFMSTZK002B*).

Considerando i risultati dello studio di dimensionamento della trazione elettrica, l'analisi dei carichi delle stazioni e l'architettura della rete MT, le potenze di connessione stimate per le 3 SSE saranno orientativamente:

	Potenza stimata lato MT [kW]
Alimentazione MT SSE Brignole (*)	8000/9000
Alimentazione MT SSE Ponte Carrega	6000/7000
Alimentazione MT SSE Molassana	6000/7000

Tabella 11. Potenze richieste lato MT

(*) ipotesi fatta sulle potenze delle stazioni lato linea storica

La presente stima delle potenze è da considerarsi preliminare in quanto basata sul livello di dettaglio di questa fase progettuale, necessariamente andrà svolta una valutazione ulteriore e definitiva nella fase di progettazione esecutiva. Inoltre, sarà necessario stabilire un tavolo tecnico con l'ente distributore per concordare la soluzione definitiva, in base alle condizioni della rete, del territorio e dei piani di sviluppo della rete.

9. CONCLUSIONI

Il presente studio ha come obiettivo quello di dimensionare il sistema di trazione elettrica della nuova linea SkyMetro e di verificare la fattibilità di alimentare la nuova tratta SkyMetro attraverso la SSE Brignole esistente e attualmente in esercizio.

Nel normale esercizio (tutte le SSE sono in funzione), l'architettura del sistema di trazione elettrica proposta si dimostra idonea a sostenere lo scenario di traffico desiderato:

- cadenzamento 5 minuti, tempo fermata 20sec, treni di terza generazione in singola composizione per la nuova linea SkyMetro.
- cadenzamento 5 minuti, tempo fermata 20sec, treni di terza generazione in doppia composizione per la linea 'storica', seppur con una minima limitazione in corrente che non comporta impatti sostanziali sull'esercizio (vedi dettaglio al §4.3.1).

Nei casi di fuori servizio delle SSE, si è valutato caso per caso il tipo di servizio che il sistema riesce a garantire in questa condizione di degrado. Si tratta ovviamente di un servizio meno performante di quello garantito nel normale esercizio (vedi dettaglio al §4.3.2,3,4,5).

In tutti i casi in cui è stata applicata, la limitazione in corrente è da intendersi come corrente massima assorbibile dal veicolo in doppia e/o singola composizione. In tutte le casistiche, tale limitazione è considerata più che accettabile considerando che comporta un incremento trascurabile dei tempi di percorrenza.