

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



Tesi Magistrale

**Studio del funzionamento in parallelo  
delle sottostazioni elettriche nelle zone  
tranviarie della rete torinese**

**Relatori**

**Enrico PONS**

**Pietro COLELLA**

**Ivo GIAMMÒ**

**Felice CALAMUSA**

**Candidato**

**Pietro GIACHETTI**

**Marzo 2025**

# Abstract

La riduzione dell'uso di combustibili fossili per la trazione passa anche attraverso lo sviluppo e l'aggiornamento dei sistemi ferroviari e tranviari. Questi sistemi rappresentano una valida soluzione per l'elettificazione del trasporto pubblico, evitando l'uso delle batterie e affidandosi a una rete elettrica stabile.

Per la rete tranviaria, più complessa rispetto a quella ferroviaria, è particolarmente utile possedere i giusti strumenti per effettuare simulazioni al fine di prevedere gli effetti di modifiche e miglioramenti, prima di applicarli fisicamente alla rete. Uno dei progetti di InfraTo, in collaborazione con il Politecnico di Torino, si è posto l'obiettivo di sviluppare un software in grado di analizzare il comportamento elettrico della rete tranviaria, con particolare attenzione alle tensioni nei nodi, alla partizione delle correnti nei rami e alle perdite di potenza nella rete.

Questa tesi fornisce un contributo all'aggiornamento del modello della rete utilizzato dal software, evidenziandone eventuali limiti e criticità, e valuta l'impatto dell'alimentazione di una singola zona con due sottostazioni elettriche in parallelo rispetto all'attuale configurazione di alimentazione, che prevede una sottostazione principale e una di riserva. L'analisi è stata condotta confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni nelle diverse condizioni di alimentazione, considerando prima casi di assorbimento semplificati, ma rappresentativi del comportamento della rete, e successivamente ricostruendo scenari riferiti a condizioni di traffico reale. I risultati evidenziano i vantaggi e le criticità dell'alimentazione in parallelo delle zone elettriche tranviarie, sottolineando come questa possa migliorare i profili di tensione e ridurre le perdite, a discapito di una maggiore complessità della gestione della rete e, in modo particolare, del coordinamento e della taratura dei sistemi di protezione. Per questo risulta necessaria un'analisi normativa al fine di definire la migliore configurazione per la sicurezza elettrica del sistema.

Il software utilizzato si dimostra uno strumento utile per la pianificazione e ottimizzazione della rete tranviaria, ma presenta ancora alcuni limiti, che dovranno essere superati nelle fasi successive del progetto.

# Ringraziamenti

Prima di proseguire con la discussione degli argomenti trattati in questa tesi, credo sia giusto dedicare questo spazio per ringraziare chi ha contribuito a rendere questo lavoro possibile.

Innanzitutto vorrei ringraziare il professore Enrico Pons che mi ha seguito durante tutta la stesura dell'elaborato con grande disponibilità e preziosi consigli.

Un ringraziamento va anche alla società InfraTo e in particolare a Ivo Giammò per il suo contributo nel reperire tutte le informazioni necessarie, ma soprattutto per la sua gentilezza e il suo supporto.

Questa tesi è la conclusione di un lungo percorso che ho condiviso con molte persone speciali, a partire dalla mia famiglia, la mia certezza da sempre e per sempre. Per questo voglio ringraziare in particolare i miei genitori, Sara e Alfonso, mia sorella, Elisa, e i miei nonni.

Un ringraziamento speciale va anche a Marta, che è entrata nella mia vita portando con sé un'energia stupenda.

Queste poche righe non mi permetterebbero di ringraziare adeguatamente tutti gli amici e i colleghi il cui supporto è stato essenziale in questi anni. Condividere con loro i momenti di gioia ha avuto la stessa importanza del loro aiuto nei momenti di difficoltà.

*“Un ringraziamento speciale a tutti”  
Pietro*

# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	v
<b>Elenco delle figure</b>	vii
<b>1 Introduzione</b>	1
1.1 Obiettivo dello studio . . . . .	2
1.2 Struttura della rete tranviaria . . . . .	3
1.3 Software di calcolo TTN-simulator . . . . .	5
<b>2 Aggiornamento del modello elettrico della zona 16</b>	7
2.1 Criteri per la codifica degli elementi della rete su AutoCAD . . . . .	10
2.1.1 Cavi . . . . .	10
2.1.2 Lame . . . . .	12
2.1.3 Linea di contatto . . . . .	12
2.1.4 Oggetti a blocchi . . . . .	13
2.2 Aggiornamento file AutoCAD . . . . .	14
2.2.1 Aggiornamento cavi positivi e cavi di alimentazione . . . . .	14
2.2.2 Aggiornamento linea di contatto . . . . .	20
<b>3 Validazione TTN-simulator per alimentazione in parallelo</b>	23
3.1 Metodo di validazione . . . . .	23
3.2 Calcolo dei flussi di potenza . . . . .	24
3.2.1 Calcolo TTN-simulator . . . . .	24
3.2.2 Calcolo LT-spice . . . . .	30
3.3 Confronto di validazione . . . . .	32
3.3.1 Confronto con motrice . . . . .	32
3.3.2 Confronto con guasto . . . . .	40
<b>4 Confronto per casi semplificati/rappresentativi</b>	47
4.1 Confronto profilo di tensione e perdite . . . . .	48
4.1.1 Calcolo e confronto delle perdite . . . . .	50

4.1.2	Analisi e confronto dei profili di tensione . . . . .	55
4.2	Aumento del traffico . . . . .	59
4.2.1	Valutazioni sulla corrente massima erogabile dalle SSE in parallelo . . . . .	62
4.2.2	Cavi più sollecitati dall'aumento di traffico . . . . .	63
4.3	Corrente minima di cortocircuito . . . . .	75
4.4	Recupero energia in frenata . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Confronto di tensioni e perdite per un caso di traffico reale</b>	<b>81</b>
5.1	Elaborazione dei dati sul traffico tranviario . . . . .	81
5.2	Assorbimento dei tram in base a posizione e serie . . . . .	87
5.3	Perdite e profilo di tensione per casi di traffico reale . . . . .	90
5.3.1	Confronto delle perdite nella rete . . . . .	91
5.3.2	Confronto dei profili di tensione . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Telecomunicazione fra interruttori extrarapidi</b>	<b>97</b>
6.1	Studio normativo . . . . .	99
6.2	Valutazioni per sicurezza del sistema . . . . .	101
<b>7</b>	<b>Conclusioni e lavori futuri</b>	<b>102</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>104</b>

# Elenco delle tabelle

3.1	Confronto tensioni nodali della zona 16. Caso motrice . . . . .	34
3.2	Confronto correnti nei rami della zona 16 . Caso motrice . . . . .	34
3.3	Confronto tensioni nodali della zona 25. Caso motrice . . . . .	36
3.4	Confronto correnti nei rami della zona 25. Caso motrice . . . . .	37
3.5	Confronto tensioni nodali della zona 28. Caso motrice . . . . .	39
3.6	Confronto correnti nei rami della zona 28. Caso motrice . . . . .	39
3.7	Confronto tensioni nodali della zona 16. Caso guasto . . . . .	42
3.8	Confronto correnti nei rami della zona 16. Caso guasto . . . . .	42
3.9	Confronto tensioni nodali della zona 25. Caso guasto . . . . .	44
3.10	Confronto correnti nei rami della zona 25. Caso guasto . . . . .	44
3.11	Confronto tensioni nodali della zona 28. Caso guasto . . . . .	46
3.12	Confronto correnti nei rami della zona 28. Caso guasto . . . . .	46
4.1	Confronto delle perdite nella zona 16 . . . . .	53
4.2	Confronto delle perdite nella zona 25 . . . . .	54
4.3	Confronto delle perdite nella zona 28 . . . . .	54
4.4	Confronto del rendimento tra la condizione di alimentazione da una sola SSE e da due SSE in parallelo . . . . .	55
4.5	Tensioni minime zona 16 nei tre casi analizzati . . . . .	58
4.6	Assorbimento massimo per la zona 16 con SSE in parallelo . . . . .	62
4.7	Assorbimento massimo per la zona 25 con SSE in parallelo . . . . .	62
4.8	Assorbimento massimo per la zona 28 con SSE in parallelo . . . . .	63
4.9	Cavi più sollecitati con aumento traffico, zona 16 . . . . .	64
4.10	Cavi più sollecitati alimentazione da SSE Cittadella, zona 16 . . . . .	64
4.11	Cavi più sollecitati con aumento traffico, zona 25 . . . . .	65
4.12	Cavi più sollecitati alimentazione da SSE Duca d'Aosta, zona 25 . . . . .	65
4.13	Cavi più sollecitati con aumento traffico, zona 28 . . . . .	66
4.14	Cavi più sollecitati alimentazione da SSE Sebastopoli, zona 28 . . . . .	66
4.15	Caratteristiche elettriche cavi RG7H1E-1,8/3kV . . . . .	68
4.16	Tabella dei valori di corrente di cortocircuito per la Zona 16 . . . . .	75
4.17	Tabella dei valori di corrente di cortocircuito per la Zona 25 . . . . .	76

4.18	Tabella dei valori di corrente di cortocircuito per la Zona 28 . . . . .	76
4.19	Riduzione di $I_{cc,min}$ per alimentazione in parallelo . . . . .	77
5.1	Correnti utilizzate nelle simulazioni per ogni tipo di motrice . . . . .	90
5.2	Confronto delle perdite per la zona 16 . . . . .	91
5.3	Confronto delle perdite per la zona 25 . . . . .	92
5.4	Confronto delle perdite per la zona 28 . . . . .	92
5.5	Confronto del rendimento tra la condizione di alimentazione da una sola SSE e da due SSE in parallelo in condizioni di traffico reale . . .	93
5.6	Tensioni minime zona per condizioni di traffico reali . . . . .	96

# Elenco delle figure

1.1	Schema della rete tranviaria [1]	4
2.1	Linee aeree di tutta la rete tranviaria di Torino	8
2.2	Zone 16, 25 e 28 evidenziate in verde	9
2.3	Layer cavi positivi	11
2.4	Codifica sezione cavi	11
2.5	Layer cavi di alimentazione	11
2.6	Layer lame	12
2.7	Layer linea di contatto	13
2.8	Esempi di blocchi usati nel file AutoCAD	13
2.9	Esempi di blocchi usati nel file AutoCAD	14
2.10	Esempio di una porzione della mappa cavi zona 16 CI	15
2.11	Carta di manovra 5	16
2.12	Porzione della SSE Cittadella nella carta di manovra	16
2.13	Dettaglio botole e sezioni nella carta di manovra	17
2.14	Carta di manovra GTT con disegni delle lame	18
2.15	Foto botola 516 prima dell'inserimento della lama	19
2.16	Equipotenziale nei pressi dell'incrocio tra Corso Matteotti e Via Gioia	21
2.17	Punto di alimentazione derivato dalla botola 502	21
2.18	Tratto di linea tripla con equipotenziale lungo Via dell'Arsenale	22
3.1	Interfaccia software TTN-Simulator	25
3.2	Configurazione parametri in ingresso	26
3.3	Configurazione interruttori SSE in parallelo	27
3.4	Tabella attributi tram inseriti nella mappa	28
3.5	Tabella attributi guasti inseriti nella mappa	28
3.6	Impostazioni per lancio della simulazione	29
3.7	Parametri delle sezioni usate nel modello	30
3.8	Modello elettrico equivalente della zona 16 costruito su LT-spice	31
3.9	posizione della motrice nella zona 16 su TTN-simulator	33
3.10	Posizione della motrice zona 16 su LT-spice	34

3.11	posizione della motrice nella zona 25 su TTN-simulator . . . . .	35
3.12	Posizione della motrice nella zona 25 su LT-spice . . . . .	36
3.13	posizione della motrice nella zona 28 su TTN-simulator . . . . .	38
3.14	Posizione della motrice nella zona 28 su LT-spice . . . . .	38
3.15	posizione del guasto nella zona 16 su TTN-simulator . . . . .	40
3.16	Posizione del guasto nella zona 16 su LT-spice . . . . .	41
3.17	posizione del guasto nella zona 25 su TTN-simulator . . . . .	43
3.18	Posizione dell guasto nella zona 25 su LT-spice . . . . .	43
3.19	posizione del guasto nella zona 28 su TTN-simulator . . . . .	45
3.20	Posizione del guasto nella zona 28 su LT-spice . . . . .	45
4.1	Posizioni dei tram considerati nelle simulazioni per il confronto di perdite e tensioni . . . . .	49
4.2	Comando per esportare i dati dalla tabella degli attributi . . . . .	50
4.3	Schemi gruppo di conversione [8] . . . . .	51
4.4	Tabella degli attributi <i>links</i> . . . . .	53
4.5	Profili di tensione per il caso A applicato alla zona 16 . . . . .	56
4.6	Profili di tensione per il caso B applicato alla zona 16 . . . . .	56
4.7	Profili di tensione per il caso C applicato alla zona 16 . . . . .	57
4.8	Profili di tensione per il caso C applicato alla zona 25 . . . . .	59
4.9	Profili di tensione per il caso C applicato alla zona 28 . . . . .	60
4.10	Dati relativi al convertitore usato per il gruppo di conversione . . . . .	61
4.11	Modello termico semplificato del cavo . . . . .	68
4.12	Andamento delle correnti assorbite dalla motrice serie 6000 . . . . .	70
4.13	Andamento equivalente della corrente assorbita dai tram . . . . .	71
4.14	Andamento equivalente delle perdite nei cavi considerati . . . . .	72
4.15	Circuito equivalente del modello termico cavo . . . . .	72
4.16	Transitorio sovratemperatura cavo 3A601, zona 16 . . . . .	73
4.17	Transitorio sovratemperatura cavo 4454A7, zona 28 . . . . .	74
4.18	Esempio sbarra comune a valle del gruppo di conversione [8] . . . . .	78
4.19	Posizione tram in frenata su LT-spice, zona 25 . . . . .	79
4.20	Posizione del tram in assorbimento su LT-spice, zona 16 . . . . .	80
5.1	Visualizzazione delle posizioni dei tram su My Maps . . . . .	83
5.2	Posizioni dei tram per il traffico reale nella zona 16 . . . . .	84
5.3	Posizioni dei tram per il traffico reale nella zona 25 . . . . .	85
5.4	Posizioni dei tram per il traffico reale nella zona 28 . . . . .	86
5.5	Profilo della corrente assorbita da una motrice serie 6000 . . . . .	88
5.6	Corrente di una motrice serie 5000 in accelerazione [15] . . . . .	89
5.7	Corrente di una motrice serie 5000 in recupero [15] . . . . .	89
5.8	Corrente di una motrice serie 2800 in accelerazione [16] . . . . .	90

5.9	Profili di tensione per traffico reale nella zona 16 . . . . .	94
5.10	Profili di tensione per traffico reale nella zona 25 . . . . .	94
5.11	Profili di tensione per traffico reale nella zona 28 . . . . .	95
6.1	Campi di intervento relè DIA-IGTv [17] . . . . .	98

# Capitolo 1

## Introduzione

Nella ricerca finalizzata a ridurre i consumi di combustibili fossili dovuti ai trasporti, i mezzi pubblici rappresentano un valido strumento soprattutto in ambito urbano. Le due strade percorribili per la riduzione di questi consumi, infatti, sono il trasporto pubblico e lo sviluppo, sempre più attivo, delle automobili elettriche, che però attualmente presentano diverse limitazioni tra cui quelle dovute all'uso e alla ricarica delle batterie. Tra queste due possibili alternative, la trazione elettrica alimentata da infrastrutture fisse, come gli impianti ferroviari e tranviari, è una perfetta unione dei rispettivi vantaggi. Proprio per questo, approfondire e studiare le potenzialità del sistema tranviario risulta di particolare interesse per ampliare, potenziare o anche solo migliorare il servizio che si può offrire per il funzionamento efficiente e sostenibile dei sistemi di trasporto pubblico.

L'applicazione dell'energia elettrica per la trazione risale a oltre un secolo fa con i primi esperimenti volti a mettere in atto l'idea di convertire l'energia elettrica in energia meccanica. Questi esperimenti hanno portato allo sviluppo delle prime automobili elettriche già nella prima metà del XIX secolo, ma il loro sviluppo e utilizzo diffuso ha dovuto aspettare la fine del XX secolo proprio per le difficoltà dell'accumulo e trasporto di energia elettrica a bordo della vettura [1]. Dato questo ostacolo, la soluzione che si è adottata è stata utilizzare condotti fissi combinati a contatti mobili striscianti a bordo dei veicoli, dando origine alle linee tranviarie e ferroviarie. La storica rete tranviaria della città di Torino è un significativo esempio in questo contesto con più di 200 km di binari, circa 500 km di cavi sotterranei che alimentano le linee aeree di 49 zone elettriche grazie a circa 20 sottostazioni elettriche (SSE). La società InfraTo, nata il 1° ottobre 2010 a seguito di scissione di ramo di azienda del Gruppo Torinese Trasporti S.p.A., è proprietaria della linea 1 della Metropolitana Automatica di Torino e delle linee tranviarie 4 e 16, ma si occupa di gestione, progettazione, costruzione e sviluppo degli impianti dell'intera rete tranviaria e metropolitana [2].

L'alimentazione elettrica della rete tranviaria presenta alcune peculiarità rispetto ai sistemi di alimentazione presenti in campo ferroviario dovute alla maggiore complessità della rete magliata rispetto alla rete lineare delle ferrovie e al fatto che i percorsi dei tram non sono sempre in sede propria come quelli dei treni e per questo possono creare maggiori pericoli, richiedendo un sistema di protezione più complesso. Proprio a causa della magliatura della rete tranviaria la partizione delle correnti nei rami della rete risulta più difficile da prevedere e lo stesso vale per la gestione dei guasti. Per questo generalmente le zone elettriche del sistema tranviario, che sono separate elettricamente le une dalle altre, non prevedono l'alimentazione contemporanea da due sottostazioni elettriche in parallelo. L'alimentazione principale è affidata alla SSE con corrente di cortocircuito minima,  $I_{cc,min}$ , maggiore, mentre una seconda SSE svolge il ruolo di riserva e può alimentare la zona in caso di manutenzione o guasto alla prima. Si sceglie come SSE principale quella con  $I_{cc,min}$  maggiore per una migliore efficacia dell'interruttore extrarapido, presente nella SSE, in caso di cortocircuito lontano dalla SSE.

Gli interruttori extrarapidi sono tarati per evitare di intervenire per assorbimenti elevati dei tram, che però hanno valori paragonabili a quelli delle correnti di cortocircuito dovute a guasti a fondo linea. Per questo, un'elevata  $I_{cc,min}$  permette una migliore distinzione tra corrente di guasto e corrente di normale funzionamento dei tram. L'alimentazione in parallelo di una zona elettrica richiede una maggiore attenzione a queste caratteristiche della rete, ma può risultare utile per aumentare il traffico di tram nelle zone alimentate, incrementando la potenza disponibile sulla singola zona e riducendo le perdite e le cadute di tensione nei punti in cui i tram assorbono correnti elevate. Per questo è interessante analizzare la rete tranviaria al fine di scoprire se l'alimentazione in parallelo da due SSE è possibile e se i vantaggi superano le criticità da affrontare.

## 1.1 Obiettivo dello studio

Lo sviluppo di questa tesi riprende un progetto di ricerca stipulato tra InfraTo e il Dipartimento di Energia "Galileo Ferraris" del Politecnico di Torino (DENERG), volto allo studio della rete tranviaria torinese per un monitoraggio più efficace e per eventuali aggiornamenti e miglioramenti della rete stessa e dei suoi componenti. Nelle fasi precedenti del progetto è stato sviluppato il software di calcolo TTN-Simulator in linguaggio Python ed ambiente GIS, per la simulazione e risoluzione dei flussi di potenza nella rete elettrica tranviaria di Torino [3]. Il software crea un circuito elettrico equivalente alla rete a partire da un file sviluppato e codificato opportunamente in ambiente AutoCAD ed è in grado di calcolare tensioni ai nodi e correnti nei rami sia in caso di assorbimento normale dei tram, sia in caso di guasto. Le zone della rete sono elettricamente separate, quindi è possibile considerare una

zona alla volta; per questo motivo in una seconda fase due zone elettriche, zona 25 e zona 28, sono state aggiornate sulla mappa AutoCAD, verificandone la correttezza rispetto alla situazione reale della rete, e per queste zone è stata effettuata la validazione del software in caso di assorbimento di un tram e in caso di guasto con la zona alimentata da una sola SSE [4].

L'obiettivo di questa tesi è analizzare il comportamento di alcune zone della rete tranviaria, alimentandole con due SSE in parallelo per valutarne possibili vantaggi e criticità e per considerare i provvedimenti necessari per le protezioni della linea aerea di queste zone. Tra i possibili vantaggi risultano di particolare interesse la possibilità di aumentare il traffico, la riduzione delle perdite joule a parità di assorbimento, un migliore profilo di tensione e un migliore recupero di energia in fase di frenatura dei tram, avendo una rete più ricettiva.

Tra le possibili criticità si pone particolare attenzione alla partizione delle correnti delle due SSE in caso di guasto e al sovraccarico dei rami in caso di un maggiore traffico di tram. Per l'esercizio delle zone con due SSE in parallelo sono inoltre necessarie alcune considerazioni sulla comunicazione e interblocco tra gli interruttori extrarapidi delle due sottostazioni.

Per buona parte di questo studio si usa il software TTN-simulator: partendo dai risultati ottenuti nelle fasi precedenti del progetto in collaborazione con InfraTo, si aggiorna una terza zona di interesse e si effettua la validazione delle tre zone aggiornate per l'esercizio con due SSE in parallelo, confrontando i risultati ottenuti con TTN-simulator con quelli ottenuti da un modello equivalente costruito su LT-spice. Una volta aggiornato il modello e dopo averlo validato, si procede con tutte le simulazioni necessarie a valutare il comportamento delle zone elettriche tranviarie in caso di doppia alimentazione da due SSE in parallelo per diversi scenari tra cui correnti di cortocircuito in caso di guasto e assorbimento di tram in condizioni realistiche basate su un'analisi statistica del traffico tranviario reale nelle zone considerate.

## 1.2 Struttura della rete tranviaria

La struttura della rete tranviaria è complessa ed è composta da numerosi elementi necessari per il suo funzionamento e la sua messa in sicurezza. È importante sottolineare che la rete tranviaria è divisa in zone elettricamente separate, che significa che le linee aeree di contatto delle diverse zone sono separate da divisori di zona. Questa divisione ci permette di considerare le singole zone come elettricamente indipendenti, considerazione che ritornerà utile per le simulazioni svolte su TTN-simulator. Per avere un quadro generale su tale struttura, la si considera come un circuito che ha origine da una SSE di conversione che si connette al circuito di trazione tramite i cavi di alimentazione. La linea di contatto aerea, grazie ai

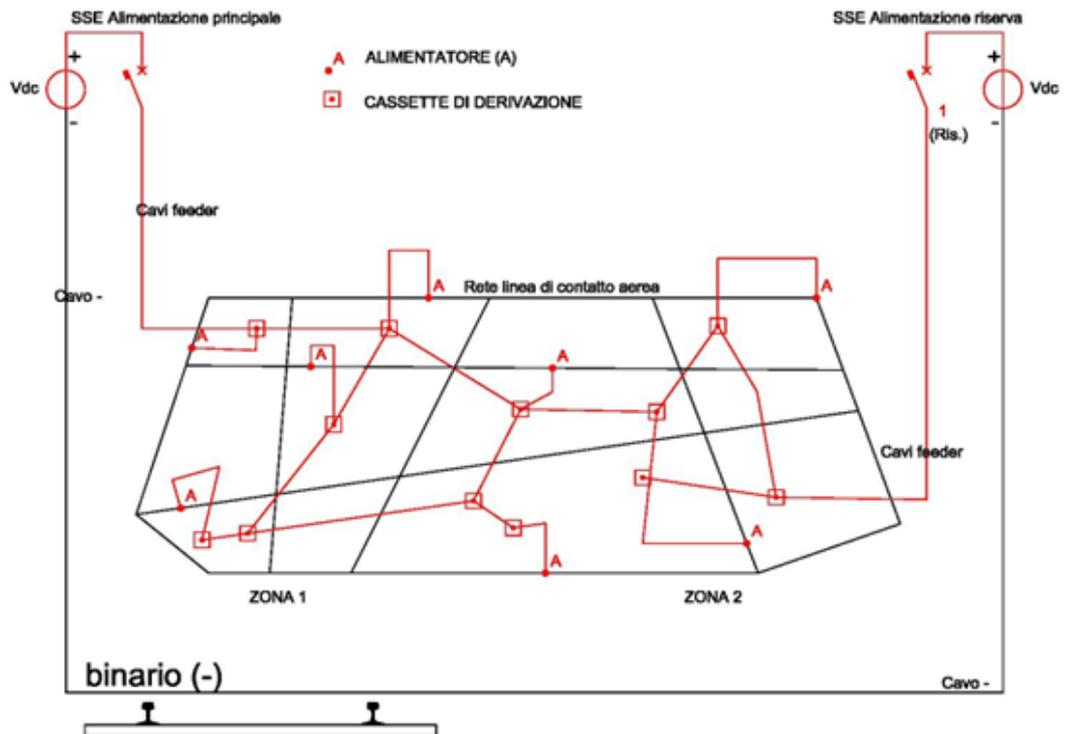


Figura 1.1: Schema della rete tranviaria [1]

contatti striscianti, alimenta i tram collegati al circuito di ritorno composto dalle rotaie del binario. Nella Figura 1.1 si può apprezzare uno schema semplificato della rete tranviaria.

Gli elementi principali delle singole zone della rete sono proprio gli elementi elencati in questo circuito semplificato:

- Le sottostazioni elettriche presentano al proprio interno un sistema di trasformazione e conversione della tensione (AC-DC) ai fini di abbassare il livello di tensione della rete da 22kV(MT) in alternata fino al valore richiesto per il sistema di trazione pari a 600V (BT) in continua. Nel lato BT è di particolare interesse la presenza di un interruttore extrarapido che protegge i cavi di alimentazione e la linea aerea di contatto.
- I cavi di alimentazione, o feeder positivi, conducono l'energia elettrica dalla SSE ai vari punti lungo la linea tranviaria permettendo l'alimentazione delle linee di contatto. La rete tranviaria presenta una rete a maglie con cassette di derivazione che costituiscono i nodi principali della rete e permettono modifiche alla configurazione della rete.

- Le linee aeree di contatto forniscono l'alimentazione positiva ai tram tramite un conduttore di rame sagomato a contatto con il pantografo dei tram.
- Il circuito di ritorno è composto dalle rotaie dei binari e dai cavi negativi presenti nelle sottostazioni. Si noti che le rotaie sono il più possibile isolate da terra, per evitare correnti disperse, e sono collegate tra di loro garantendo una bassa resistenza che permette una caduta di tensione ridotta.
- I tram sono i principali carichi della rete tranviaria con assorbimenti molto elevati, che in alcune circostanze rendono difficile la distinzione tra un avviamento di più tram con la corrente dovuta a un cortocircuito a fondo linea. Il caso studio considera la motrice 6000, la quale contiene un totale di 12 motori a induzione alimentati a loro volta da 12 inverter. La motrice consente inoltre la frenatura rigenerativa, in caso di rete ricettiva, mediante un chopper apposito.

### 1.3 Software di calcolo TTN-simulator

Il software TTN-Simulator permette di generare un modello elettrico equivalente della rete tranviaria a partire da un file AutoCAD in input in formato .dxf e di calcolarne i flussi di potenza, fornendo come risultati i valori delle tensioni in ciascun nodo e delle correnti nei rami della rete. L'aggiornamento del modello elettrico richiede di apportare modifiche al disegno della rete, che viene poi utilizzato come input per TTN-Simulator. Questo programma genera automaticamente circuiti elettrici per ogni zona attiva della rete, raccogliendo i dati necessari direttamente dalle mappe. Infatti, esiste una codifica ben precisa degli elementi sul file AutoCAD per permettere al software di riconoscere gli elementi e le relative caratteristiche; per esempio, la sezione di un cavo o la sua appartenenza a una determinata zona.

Grazie a TTN-Simulator, è possibile eseguire diverse tipologie di simulazioni sul modello elettrico generato. Tra le opzioni disponibili, l'utente può inserire diverse motrici, definendo il punto preciso in cui posizionarle e specificandone la corrente assorbita per valutare l'impatto di queste condizioni sul funzionamento della rete. Per gli studi e le considerazioni descritti in questa tesi, è utile analizzare il comportamento della rete sia in presenza di assorbimento di motrici nelle zone considerate, sia in caso di guasti. Il programma consente infatti di simulare guasti nei rami della rete, con la possibilità di definirne la posizione e anche il valore della resistenza del guasto.

Un'ulteriore funzionalità di TTN-Simulator riguarda la capacità di eseguire simulazioni per individuare i punti di massima resistenza nelle aree attive della rete e quindi il punto in cui la corrente di cortocircuito risulterebbe minima. Tuttavia, questa funzionalità è stata sviluppata solo per localizzare il punto di massima

resistenza rispetto a una SSE e quindi non in caso di alimentazione in parallelo da due SSE. Il software offre numerose opzioni di configurazione, permettendo di personalizzare i parametri di ingresso per la creazione e il calcolo del modello elettrico. In particolare, l'utente può selezionare le zone da alimentare dalle sottostazioni, intervenendo direttamente sulla configurazione degli interruttori delle sottostazioni. Questo consente di attivare o disattivare l'alimentazione delle zone elettriche della rete, migliorando così la flessibilità del programma.

L'obiettivo principale di queste funzionalità è garantire un calcolo accurato dei flussi di potenza nei casi di interesse, con la possibilità di visualizzare i risultati direttamente sulla mappa nell'interfaccia grafica del software. Le potenzialità di TTN-simulator rappresentano uno strumento prezioso per le attività aziendali. Con eventuali accorgimenti e ulteriori potenziamenti, il software fornisce una valida alternativa a software di calcolo circuitale, che, a differenza di TTN-simulator, non permettono una visualizzazione geo-referenziata della rete e dei risultati ottenuti.

## Capitolo 2

# Aggiornamento del modello elettrico della zona 16

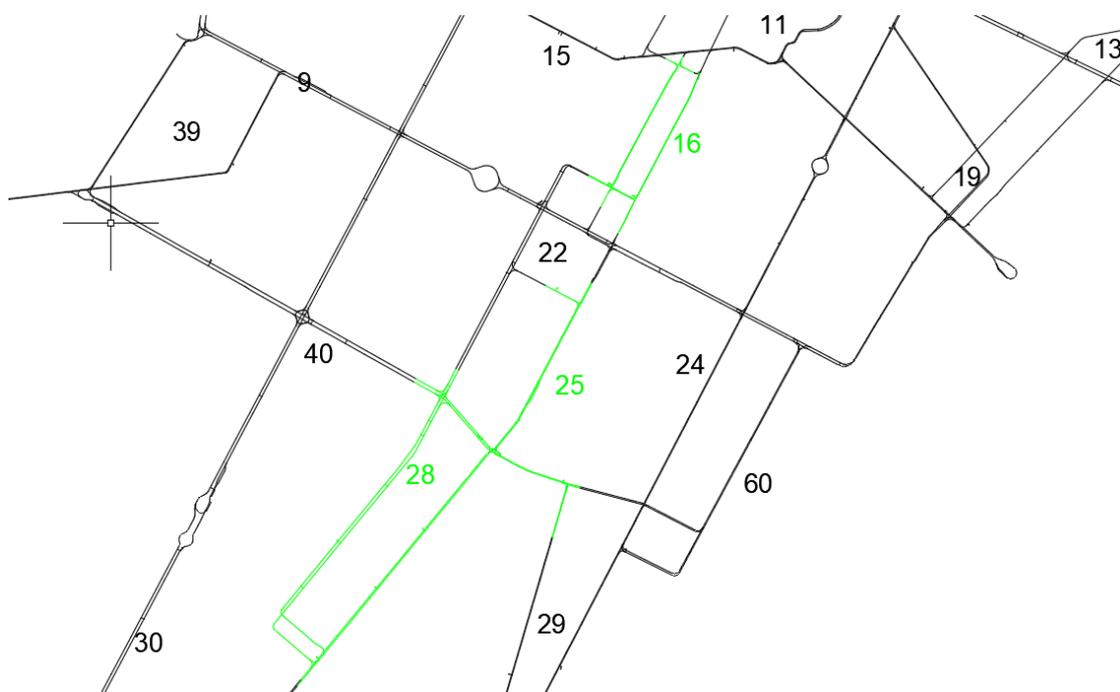
Per poter ottenere simulazioni il più realistiche possibile, è necessario innanzitutto avere un modello della rete che sia fedele alla configurazione reale della rete oggetto di studio.

Il software TTN-simulator, allo stato attuale, riproduce un modello semplificato della rete. A causa di alcuni limiti nei disegni dei circuiti negativi nel file *.dxf*, non viene implementato il circuito di ritorno e quindi si trascura la resistenza dei binari e dei cavi negativi. Nonostante ciò, il circuito positivo risulta essere la componente più interessante per lo studio della rete: una corretta rappresentazione di cavi positivi, di alimentazione e della linea di contatto, ci permette di analizzare le differenze tra l'alimentazione singola di una zona elettrica e l'alimentazione in parallelo con due sottostazioni elettriche. A causa di queste semplificazioni, i risultati assoluti risulteranno differenti da quelli reali, come studiato in [4], ma le variazioni che si riscontrano tra le due diverse configurazioni presentano un andamento che è indicativo delle variazioni reali. Per questo è fondamentale conoscere la configurazione reale delle porzioni di rete studiate. Inoltre, l'aggiornamento delle mappe *.dwg*, usate per generare il modello della rete, risulta particolarmente utile per portare avanti il progetto che prevede la creazione di un gemello digitale della rete, che permetta la simulazione del comportamento della rete prima di effettuare le modifiche alla rete reale. Nella Figura 2.1 è possibile vedere la mappa di tutte le zone che compongono la rete tranviaria di Torino, mentre nella Figura 2.2 si evidenziano la zona 16 da aggiornare e le zone 25 e 28 già aggiornate in [4].

In questo capitolo si riportano il metodo e le modifiche necessari all'aggiornamento del modello elettrico della zona 16.



**Figura 2.1:** Linee aeree di tutta la rete tranviaria di Torino



**Figura 2.2:** Zone 16, 25 e 28 evidenziate in verde

## 2.1 Criteri per la codifica degli elementi della rete su AutoCAD

Per aggiornare il modello della rete è necessario modificare il file AutoCAD *.dwg* di proprietà di InfraTo a partire dai disegni e dalle tabelle forniti da InfraTo e GTT. Per agire sul file *.dwg* è necessario seguire specifici criteri di codifica per i singoli elementi della rete, affinché il software possa generare correttamente il circuito elettrico equivalente. Il file AutoCAD è l'input principale che si fornisce al software oltre ai valori dei parametri, che vengono specificati direttamente tramite l'interfaccia del software; per questo, la correttezza del disegno è fondamentale per la corretta valutazione dei risultati forniti dal software. La codifica utilizzata per rappresentare gli elementi della rete è presentata in dettaglio in [3] e poi ripresa in [4] e, per maggiori informazioni, è stato necessario un confronto con i tecnici di InfraTo. Qui si riportano le informazioni principali per la comprensione della codifica utilizzata, ma per maggiori dettagli si fa riferimento alle tesi sopra citate.

### 2.1.1 Cavi

Tutti i cavi devono essere rappresentati tramite polilinee, indipendentemente dal layer di appartenenza. Qualsiasi altro tipo di linea non viene riconosciuto dal software in fase di importazione del file *.dwg*. Inoltre, si consiglia di non spezzare il disegno di un cavo tra due nodi, in modo tale da avere una lunghezza ben definita in fase di analisi dei parametri riportati dal software dopo la simulazione. La resistenza di un cavo viene calcolata a partire dal valore di resistività del rame, dalla lunghezza e dalla sezione del cavo stesso. Per questo è importante definire correttamente la sezione di un cavo già in fase di disegno, assegnando ai cavi uno specifico tipo di linea, che permette al software di assegnare al cavo il valore corretto di sezione.

- **Cavi positivi:** collegano le sbarre in uscita dalle SSE alle botole di derivazione e le botole tra di loro. Dopo aver disegnato il percorso del cavo con una polilinea si seleziona il layer CAVI\_POSITIVI, come riportato in Figura 2.3, e successivamente si sceglie il corretto *Tipo di Linea*, che ne definisce la sezione. La selezione del *Tipo di Linea* è mostrata in Figura 2.4 e per questo tipo di cavo la sezione selezionata è tipicamente  $500mm^2$  o  $1000mm^2$ .
- **Cavi di alimentazione:** collegano le botole o le cassette alla linea di contatto. Anche per i cavi di alimentazione è necessario specificare il layer corretto, riportato in Figura 2.5, e il *Tipo di Linea*, come già visto in Figura 2.4. Per i cavi di alimentazione le sezioni usate sono tipicamente  $240mm^2$  e  $500mm^2$ .

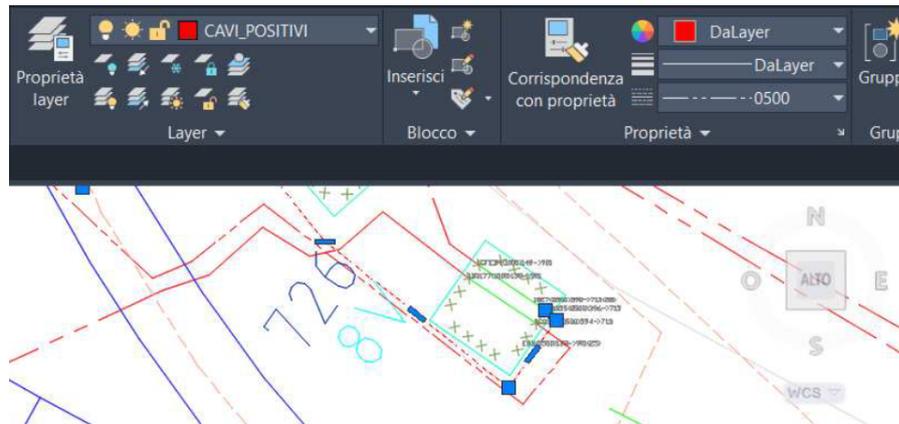


Figura 2.3: Layer cavi positivi

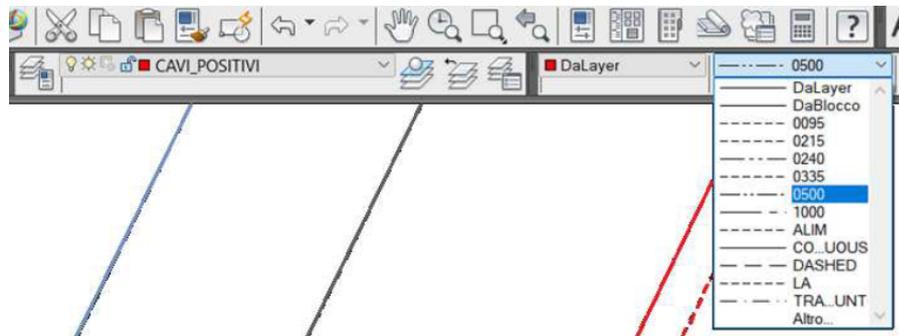
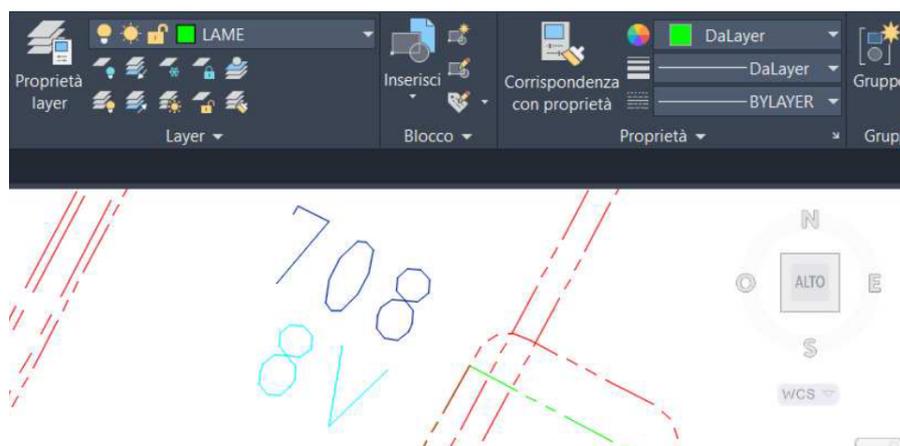


Figura 2.4: Codifica sezione cavi



Figura 2.5: Layer cavi di alimentazione



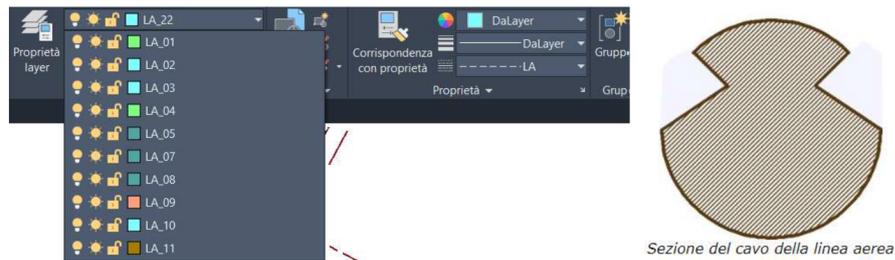
**Figura 2.6:** Layer lame

### 2.1.2 Lame

Per aggiornare le mappe di InfraTo, le lame sono un elemento fondamentale sul quale agire, perché cambiando le connessioni all'interno delle botole, si può modificare considerevolmente la configurazione della rete. Le lame sono ponti metallici che collegano i capi dei cavi in partenza e in arrivo nelle botole. Anch'esse sono disegnate come polilinee e hanno un layer dedicato, mostrato in Figura 2.6, ma non si definisce uno specifico tipo di linea, perché la resistenza delle lame viene trascurata dal software; per questo si utilizza il *Tipo di Linea* "Dalayer".

### 2.1.3 Linea di contatto

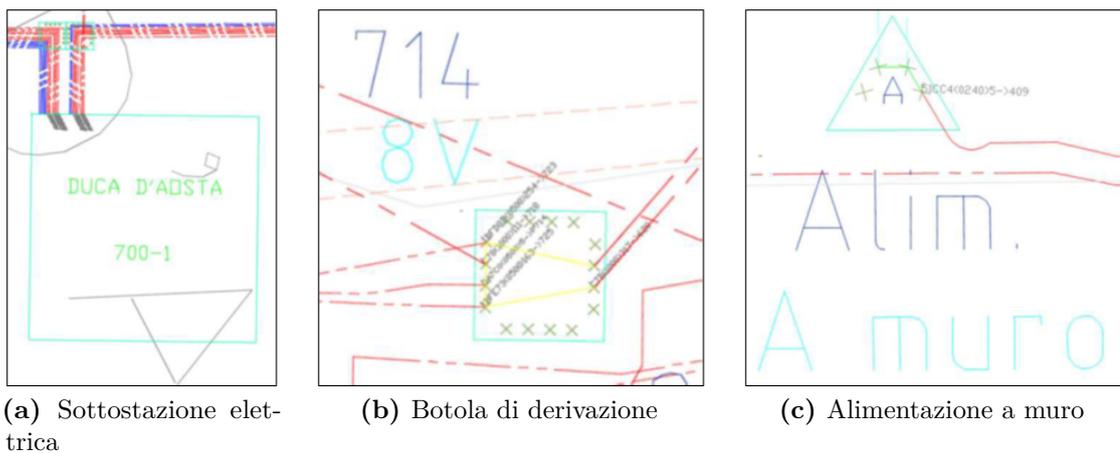
I cavi positivi e quelli di alimentazione non appartengono a un layer che ne definisce la divisione in zone elettriche, mentre la linea di contatto è suddivisa in 49 zone elettriche isolate tra di loro. Per questo esistono 49 layer ed è necessario selezionare il layer corretto per effettuare una modifica alla linea di contatto della zona da aggiornare, altrimenti l'importazione del file *.dxf* non avverrebbe nel modo corretto. Questa suddivisione ci permette di lavorare su una zona isolata sul file *.dwg*, mentre sul software TTN-simulator questo non è possibile. Nonostante ciò, il software importa l'informazione, che risulta essere utile per lo studio dei risultati ottenuti. A differenza di cavi di alimentazione e cavi positivi, per la linea di contatto non si può specificare un *Tipo di Linea* diverso per vari tratti di linea con sezione del conduttore variabile, ma la sezione è definita nella configurazione dei parametri in ingresso, come descritto meglio nel capitolo successivo nella Figura 3.2. Perciò, come mostrato nella Figura 2.7, per la linea di contatto si seleziona il layer relativo alla zona di appartenenza e il *Tipo di Linea* "LA", corrispondente alla tipica sezione sagomata da  $95mm^2$ .



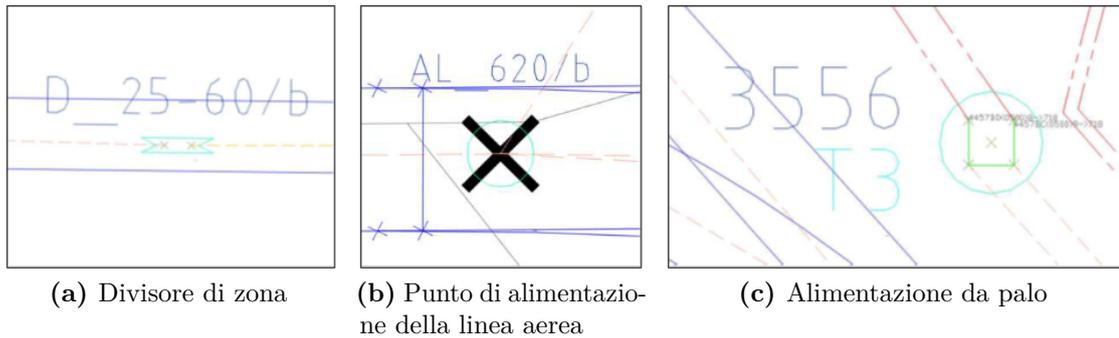
**Figura 2.7:** Layer linea di contatto

### 2.1.4 Oggetti a blocchi

Anche tutti gli altri oggetti utilizzati per il disegno, quali giunti, cassette, nodi della linea aerea, punti di alimentazione, sottostazioni elettriche, divisori di zona, ecc. rispondono a criteri ben precisi. Spesso si tratta di blocchi con attributi editabili e gli oggetti devono rispettare questi criteri per poter essere interpretati correttamente dal programma di calcolo. Nelle Figure 2.8 e 2.9 si possono vedere alcuni esempi dei blocchi principali.



**Figura 2.8:** Esempi di blocchi usati nel file AutoCAD



**Figura 2.9:** Esempi di blocchi usati nel file AutoCAD

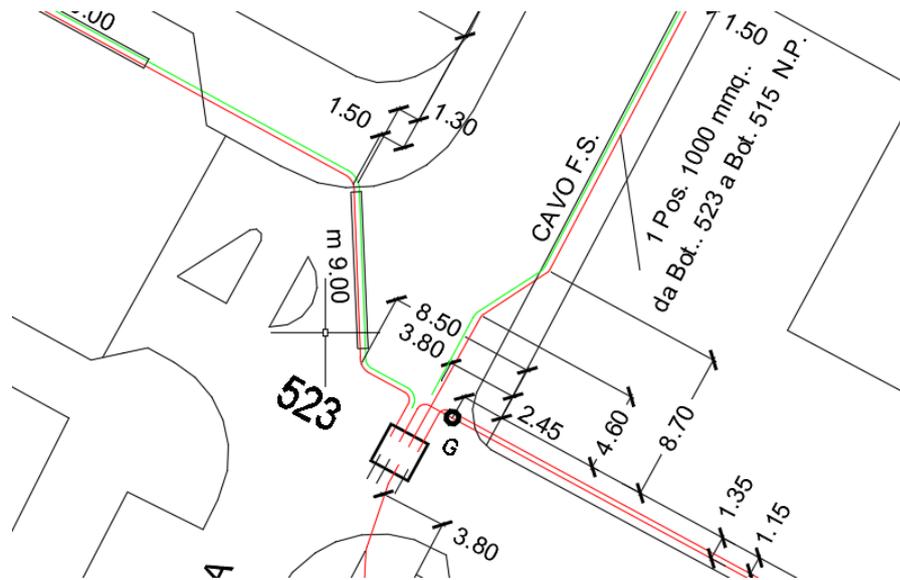
## 2.2 Aggiornamento file AutoCAD

L'aggiornamento del file AutoCAD, che definisce la struttura e la configurazione del modello della rete, è stato effettuato utilizzando mappe e carte di manovra messe a disposizione da InfraTo e GTT e successivamente tramite ispezioni visive della linea di contatto. Infatti, l'aggiornamento della zona 16 si è diviso in due fasi principali:

1. L'aggiornamento e la verifica dei cavi interrati, sia cavi positivi che cavi di alimentazione, sono stati effettuati controllando che i cavi fossero disegnati correttamente sul file *.dwg*, da cui si genera il file *.dxf* usato come input per TTN-simulator. Per fare ciò, è stato necessario seguire il percorso dei cavi sulle mappe fornite, controllare le connessioni nelle botole e verificare le sezioni dei cavi, per poi riportare le modifiche sul file AutoCAD seguendo i criteri di codifica specificati precedentemente.
2. L'aggiornamento del disegno della linea di contatto è stato effettuato prima grazie un'ispezione da remoto tramite Google Maps [5] e successivamente grazie a un'ispezione visiva, che ha permesso di apportare numerose modifiche al modello della linea di contatto in diversi punti.

### 2.2.1 Aggiornamento cavi positivi e cavi di alimentazione

Il primo passo per aggiornare i cavi positivi e di alimentazione della zona 16 ha previsto la consultazione di due file AutoCAD, forniti da InfraTo. Questi file contengono i disegni quotati dei cavi in arrivo dalle due sottostazioni interessate: il primo file contiene la porzione di cavi provenienti da Cittadella, mentre il secondo contiene quelli provenienti da Duca d'Aosta. Questi disegni permettono di conoscere il percorso seguito dai cavi e forniscono alcune informazioni relative al tipo di posa



**Figura 2.10:** Esempio di una porzione della mappa cavi zona 16 CI

e alla sezione dei cavi. Nella Figura 2.10 si riporta un esempio di una porzione di mappa. Queste mappe sono utili per conoscere il percorso esatto dei cavi, ma per comprendere più rapidamente e con maggiore chiarezza la connessione tra le botole, si usano le carte di manovra, che si presentano come in Figura 2.11. Per valutare le connessioni presenti nella zona 16, è stata utilizzata la carta di manovra 5, che rappresenta tutti i cavi in uscita dalla sottostazione Cittadella, di cui una porzione è visibile in Figura 2.12, e tutte le botole numerate presenti nella zona 16. In queste carte vengono fornite anche informazioni relative alla sezione dei cavi e alla posizione geografica delle botole, come è visibile in Figura 2.13.

L'utilizzo combinato delle mappe AutoCAD e delle carte di manovra permette una doppia verifica sul percorso dei cavi e sulle relative sezioni. In particolare, le mappe sono state usate principalmente per definire il percorso dei cavi, mentre le carte di manovra per verificare le sezioni e per avere una prima idea sulle connessioni tra le botole, poi definita con maggiore precisione osservando il percorso dei cavi sulle mappe. Le principali modifiche effettuate per aggiornare la mappa sono riportate qui di seguito:

- è stato aggiunto un cavo con sezione  $1000\text{mm}^2$  lungo circa  $600\text{m}$ , che collega tra di loro le botole 515 e 523. Partendo dalla botola 523, il cavo passa per Via Confienza in direzione nord-est fino a incontrare Via Antonio Bertola, che percorre in direzione sud-est fino alla botola 515.
- è stata aggiornata la sezione del cavo che connette le botole 523 e 524, passando da  $500\text{mm}^2$  a  $1000\text{mm}^2$ .

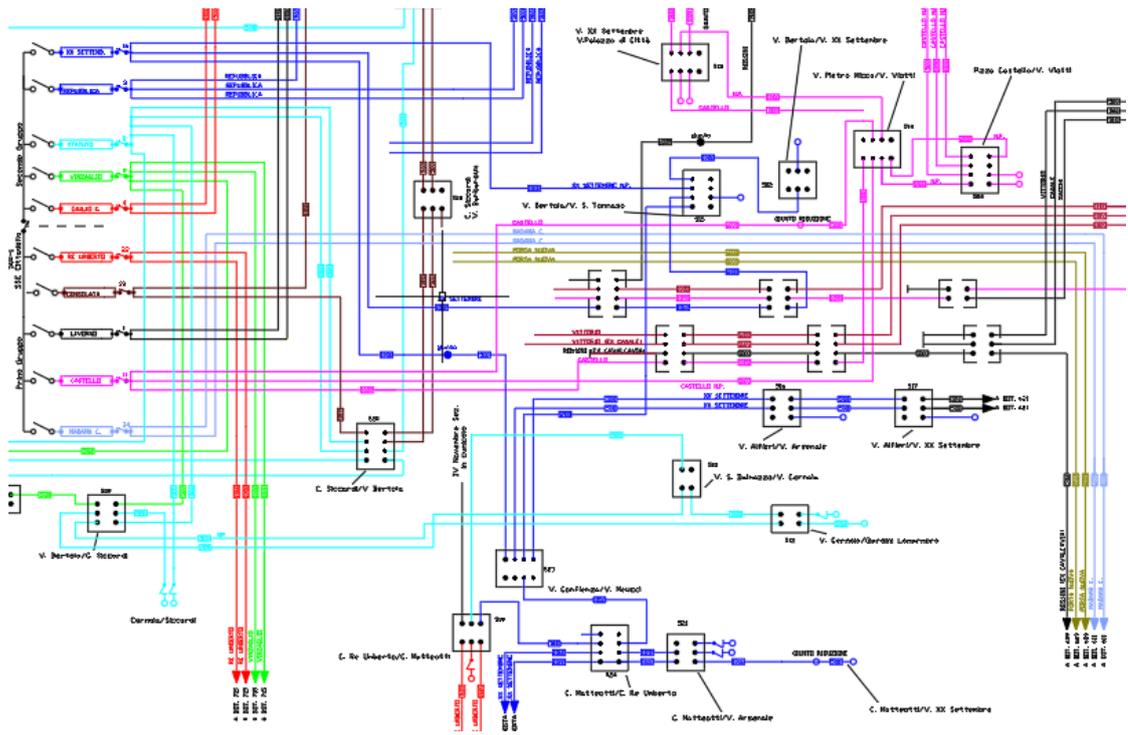


Figura 2.11: Carta di manovra 5

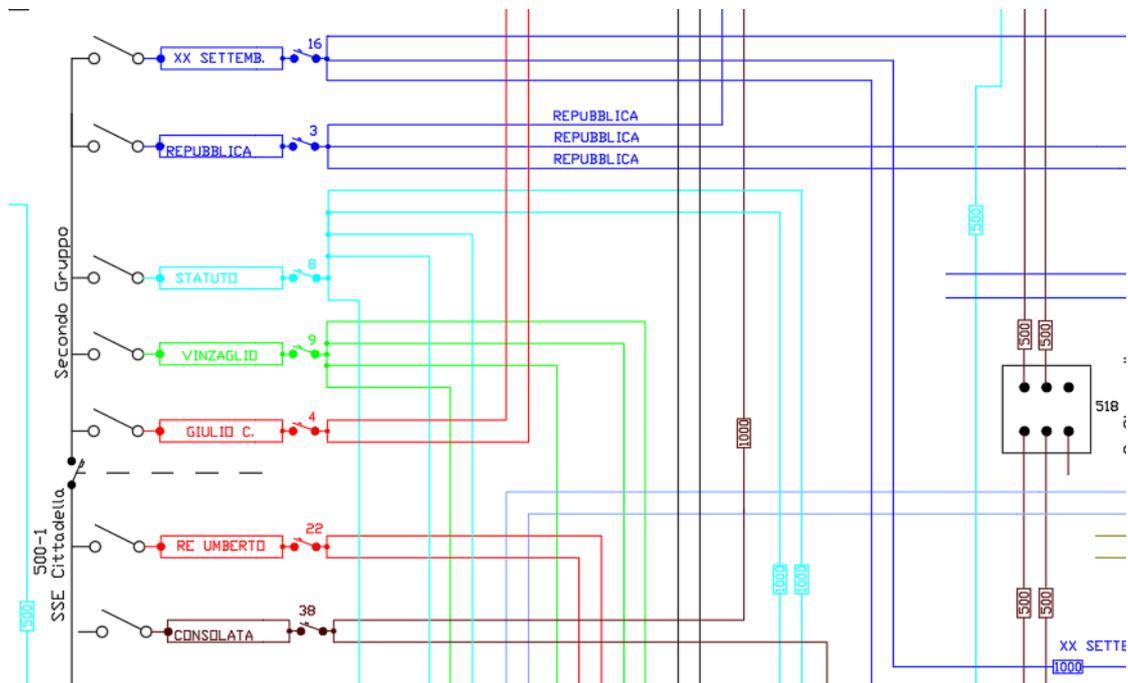


Figura 2.12: Porzione della SSE Cittadella nella carta di manovra

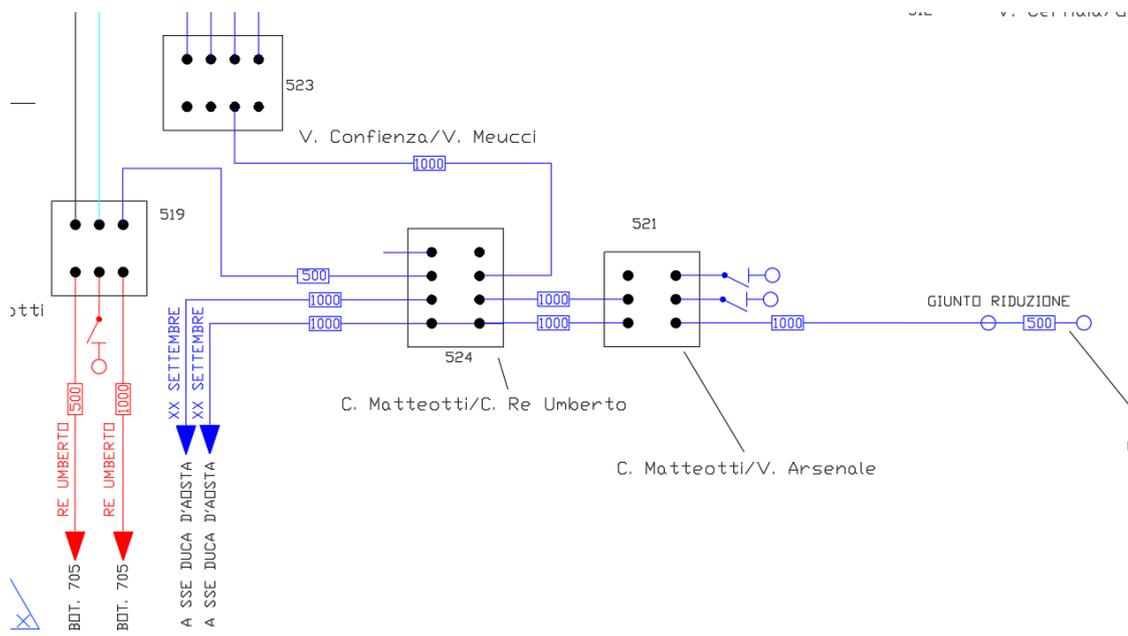


Figura 2.13: Dettaglio botole e sezioni nella carta di manovra

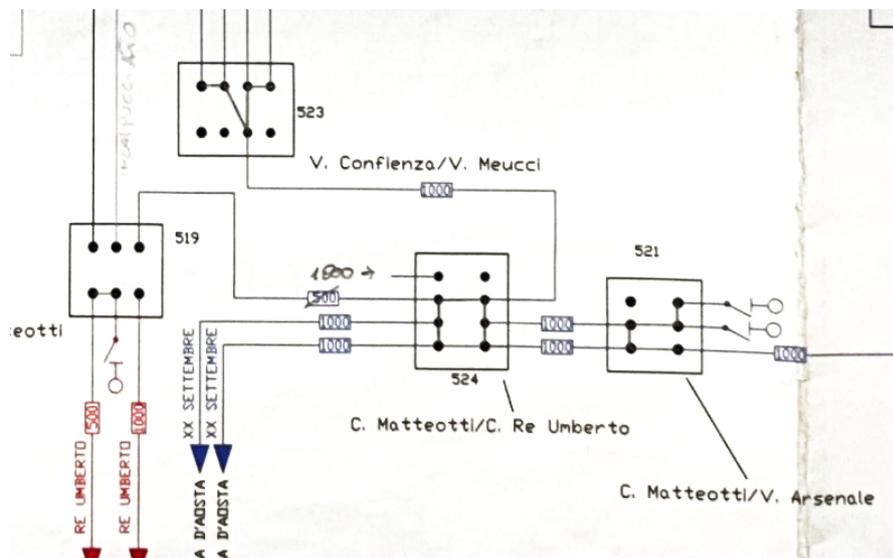
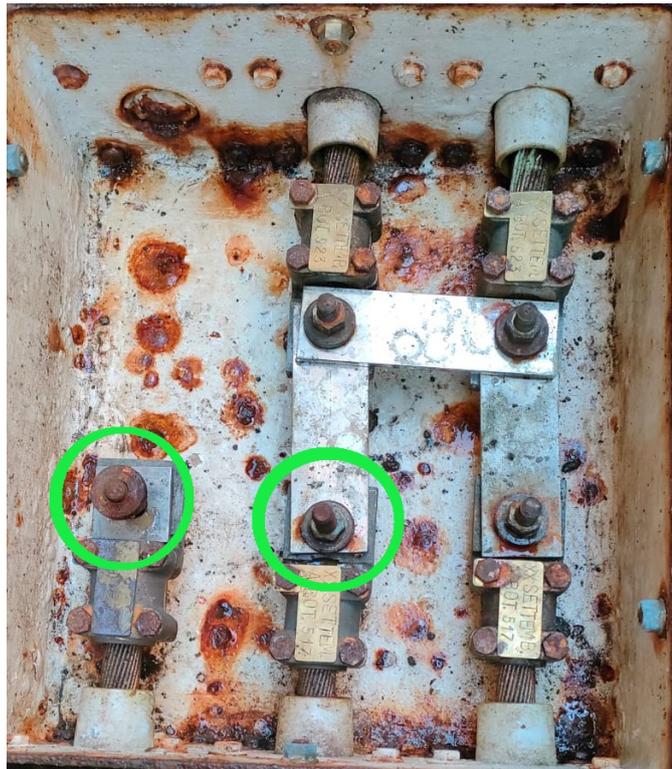


Figura 2.14: Carta di manovra GTT con disegni delle lame

- è stato aggiunto un cavo da  $500\text{mm}^2$  tra le botole 524 e 519. Questa botola contiene cavi appartenenti ad altre zone e quindi, nella configurazione attuale, il nuovo cavo non è stato connesso agli altri presenti nella botola.

Si può osservare che le carte di manovra, utilizzate per tali verifiche, non presentano alcuna connessione all'interno delle botole. Questo perché la posizione delle lame all'interno delle botole può essere cambiata dagli operatori di GTT per modificare la configurazione della rete in caso di manutenzione o semplicemente per modifiche operative. A causa di queste possibili variazioni, i disegni interni alle botole possono essere frequentemente aggiornati e quindi, per consultarli, è stato necessario chiedere le carte di manovra utilizzate dagli operatori GTT e contenenti i disegni a matita delle lame. Grazie a queste carte, di cui si riporta una porzione in Figura 2.14, è stato possibile completare l'aggiornamento della mappatura dei cavi positivi e di alimentazione della zona 16 definendo le connessioni nelle botole e verificando la variazione di sezione di un cavo.

Dopo aver aggiornato e verificato la mappa, ho potuto assistere ad un'operazione effettuata sulla botola 516, che ha portato a una modifica della configurazione della rete. In precedenza il cavo di alimentazione, in uscita dalla botola, era stato scollegato per questioni di sicurezza per un cantiere nelle vicinanze; ma, al termine del cantiere, il collegamento è stato ripristinato ponendo una lama tra i due estremi dei cavi cerchiati in Figura 2.15.



**Figura 2.15:** Foto botola 516 prima dell'inserimento della lama

## 2.2.2 Aggiornamento linea di contatto

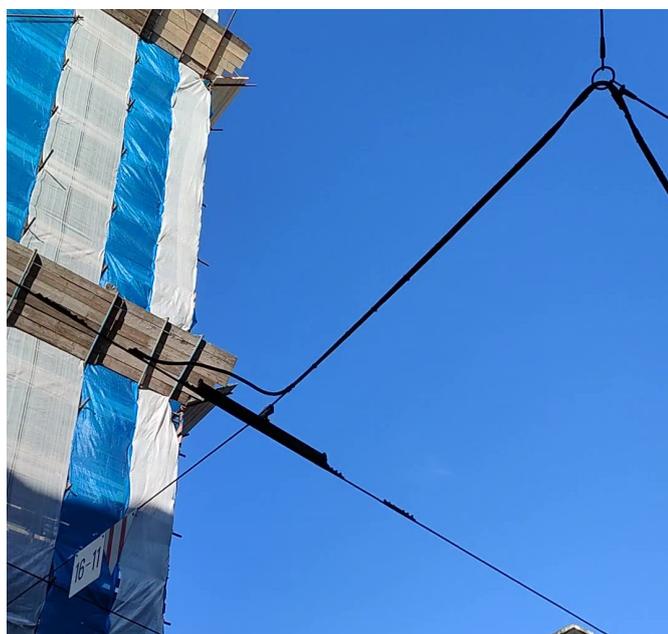
Non esistono mappe o carte da consultare per aggiornare il modello della linea di contatto della rete tranviaria. Quindi è risultato necessario effettuare un'ispezione visiva della linea aerea per verificare la geometria della linea, le connessioni equipotenziali e i punti di alimentazione. Prima di recarsi nella zona 16 per un'ispezione visiva, la zona è stata ispezionata utilizzando Google Maps. Questo mi ha permesso di confrontare le immagini fornite dal servizio internet geografico con la mappa AutoCAD, comprendendo meglio la geometria della rete. A questo punto è stato possibile effettuare un'ispezione visiva in loco, che si è rivelata particolarmente utile ai fini dell'aggiornamento della mappa della linea di contatto. Al termine dell'ispezione, sono stati riscontrati i seguenti aggiornamenti e le seguenti modifiche da apportare alla mappa AutoCAD:

- è stato inserito un equipotenziale nei pressi dell'incrocio tra Corso Giacomo Matteotti e Via Melchiorre Gioia, visibile nella Figura 2.16;
- è stato aggiunto un punto di alimentazione della linea di contatto, derivato dalla botola 521;
- l'alimentazione derivata dalla botola 522 è stata spostata in un punto dell'incrocio su Via XX Settembre;
- il punto di alimentazione derivato dalla botola 502, visibile nella Figura 2.17, è stato spostato dal tratto di linea su Via Antonio Bertola al tratto su Via XX Settembre, determinando una rilevante variazione della configurazione elettrica della linea, perché il nuovo punto di alimentazione, sebbene sia geograficamente vicino al precedente, si trova elettricamente in una posizione ben diversa;
- lungo Via dell'Arsenale e Via XX Settembre, nei tratti compresi tra l'incrocio con Corso Giacomo Matteotti e l'incrocio con Via Antonio Bertola, la linea aerea è tripla, come si può vedere nella Figura 2.18; per questo sono stati aggiunti due conduttori al fianco di quello precedente e sono stati connessi in diversi punti tramite brevi equipotenziali rispettando i punti di connessione reali;
- nel tratto di Via XX Settembre, compreso tra l'incrocio con Corso Giacomo Matteotti e l'incrocio con Corso Vittorio Emanuele II, è stato aggiunto un conduttore con relativi equipotenziali per rendere la linea doppia.

Queste modifiche sono essenziali per rispettare il più possibile la configurazione reale della rete e ottenere risultati realistici o comunque indicativi del comportamento reale della rete. Al fianco di queste azioni di modifica, è stato effettuato uno scrupoloso processo di verifica di tutti i punti di alimentazione, degli incroci e dei divisori di zona.



**Figura 2.16:** Equipotenziale nei pressi dell'incrocio tra Corso Matteotti e Via Gioia



**Figura 2.17:** Punto di alimentazione derivato dalla botola 502



Figura 2.18: Tratto di linea tripla con equipotenziale lungo Via dell'Arsenale

## Capitolo 3

# Validazione TTN-simulator per alimentazione in parallelo

TTN-simulator è un software ancora in fase di sviluppo, di cui è stata effettuata la validazione per i calcoli e i risultati ottenuti alimentando le zone 25 e 28 dalla sola SSE Duca D'Aosta. Per i calcoli necessari allo studio di vantaggi e criticità dell'alimentazione in parallelo con due SSE, si deve verificare l'affidabilità dei risultati anche in caso di alimentazione in parallelo per le due zone già validate e per la terza zona appena aggiornata. A tale scopo è necessario confrontare i risultati del software sotto analisi con altri risultati ottenuti tramite strumenti e metodi affidabili. Senza questa fase di validazione del software, i risultati ottenuti con le simulazioni successive non potrebbero essere ritenuti affidabili.

### 3.1 Metodo di validazione

Per la scelta del metodo da utilizzare per eseguire la validazione del software si fa riferimento a quello utilizzato per la validazione della zona 25 e 28 con alimentazione da una singola SSE [4]. In assenza di una procedura univoca riconosciuta per la validazione di un software di calcolo, si fa riferimento alla norma CEI UNI EN ISO/IEC 17029 [6], che definisce la validazione come la *"conferma di un'asserzione. attraverso la fornitura di evidenza oggettiva (può provenire da fonti reali o simulate), che i requisiti per uno specifico utilizzo o applicazione futuro previsto sono soddisfatti"*. In questo caso l'asserzione a cui ci riferiamo è il software TTN-simulator oggetto della validazione, per il quale è necessario evidenziare il corretto funzionamento confrontando i risultati con quelli ottenuti tramite strumenti

affidabili, rispettando le normative relative alla trazione elettrica. In questo caso lo strumento scelto per il confronto è il software LT-spice tramite il quale viene costruito un circuito elettrico delle singole zone tranviarie oggetto della validazione, permettendo di comparare i risultati ottenuti da TTN-simulator con quelli di un software già validato e ritenuto affidabile.

La norma, a cui si fa riferimento per definire il metodo di validazione più adatto al caso in esame, è la CEI EN 50641-2 [7] che presenta una procedura di cui si considerano alcuni parametri di riferimento. La Tavola C nella norma, infatti, indica un valore per la tolleranza accettata per i valori di tensione e corrente istantanei, che deve presentare un errore massimo pari al 5%. Inoltre, la norma propone i risultati da considerare per il confronto, ma quelli utili a questo caso studio sono i seguenti:

- Tensione al pantografo ( $U_p$ );
- Tensioni nodali della rete;
- Correnti nei rami della rete  $I_{link}$ .

Confrontando questi valori ottenuti con TTN-simulator e LT-spice è possibile verificare la correttezza del software sotto analisi.

## 3.2 Calcolo dei flussi di potenza

Il software di calcolo TTN-simulator è in grado di costruire e risolvere un circuito elettrico a partire da un disegno della rete elettrica tranviaria opportunamente sviluppato in ambiente AutoCAD. Inserendo gli opportuni parametri ed elementi in fase di input, il software risolve il circuito elettrico tramite un'analisi nodale basata sulla costruzione della matrice delle ammettenze nodali. Quindi, la validazione del software consiste nel confrontare i risultati dei flussi di potenza ottenuti da TTN-simulator con quelli ottenuti con un circuito equivalente costruito su LT-spice. Per comprendere meglio il confronto dei risultati, è necessario presentare brevemente le modalità con cui sono stati utilizzati i due software per effettuare questi calcoli [4].

### 3.2.1 Calcolo TTN-simulator

Per simulare il comportamento della rete tranviaria in caso di assorbimento di tram o in caso di guasto, prima è necessario caricare un file di estensione *.dxf* ottenuto da un file di estensione *.dwg* in cui è disegnata la rete tranviaria torinese. Gli elementi contenuti in questo file rispettano la codifica che permette al software di riconoscerne le specifiche caratteristiche elettriche per la creazione del circuito, oltre a quelle relative alla mappatura dei singoli elementi all'interno della rete [3]. Dopo



**Figura 3.1:** Interfaccia software TTN-Simulator

aver configurato correttamente il software e aver caricato il file *.dxf*, è possibile visualizzare la rete tranviaria di Torino con i riferimenti geografici che permettono di effettuare simulazioni nei punti desiderati della rete senza fare riferimento a un modello equivalente che andrebbe a perdere le informazioni di geo-localizzazione, utili a una comprensione più immediata dei risultati. L'interfaccia del software si presenta come in Figura 3.1 da cui si possono notare sulla sinistra i tre gruppi in cui sono suddivisi gli elementi della rete e le azioni che si possono fare per modificare gli input e per visualizzare i risultati:

- Il gruppo *input* permette di inserire tram o guasti in un qualsiasi punto della linea aerea per poter effettuare simulazioni in caso di normale funzionamento o in caso di guasto.
- All'interno del gruppo *network* sono presenti tutti gli elementi della rete divisi in livelli tra cui le cabine, le cassette, i binari, la linea aerea e tutti cavi divisi tra cavi positivi, di alimentazione e negativi. Di grande utilità è il livello relativo alle etichette delle cassette che ci permette di cercare i nodi principali della rete.
- I livelli contenuti nel gruppo *results* permettono la visualizzazione dei risultati della simulazione ottenuti dal calcolo dei flussi di potenza. I risultati di maggiore interesse sono i valori di corrente dei rami e quelli di tensione nei nodi, contenuti rispettivamente nei livelli *links* e *nodes*.

Prima di lanciare la simulazione è necessario configurare i parametri in ingresso, gli interruttori delle sottostazioni e gli elementi di input, ovvero tram e guasti. Alla

The image shows three panels of parameter configuration for the TTN-simulator. Each panel has a teal header with the text 'Parameters configuration'.

- Cables panel:**
  - Cables resistivity (ohm m): 1.68e-8
  - Track resistivity (ohm m): 1.8e-7
  - OCS default section (m<sup>2</sup>): 0,000095
  - Track section (m<sup>2</sup>): 0,0063
  - Track stray conductance to ground (S/m): 0,0008
  - Radius of connection (m): 0,02
  - Negative cables:**
    - Connection to tracks tolerance (m): 4
    - Connection to negative cables tolerance (m): 2,5
- Generators panel:**
  - Generator series R on: 0,0167
  - Generator series R off: 1000000000000
  - Generator Vcc on: 635
  - Generator Vcc off: 0
  - Cabins:**
    - Docking radius + (m): 12
    - Docking radius - (m): 24
    - Min perimeter - (m): 50
    - Conductance to ground - (S): 10000
- Trams panel:**
  - Parallel resistance (ohm): 100000
  - Location resolution (m): 1
  - Connection to tracks tolerance (m): 1
  - Faults:**
    - Location resolution (m): 1
    - Connection to tracks tolerance (m): 1
    - Always connect faults to ground:
    - Min fault resistance (ohm): 1e-9

**Figura 3.2:** Configurazione parametri in ingresso

voce "CONFIGURE PARAMETERS" è possibile impostare i principali parametri tra cui la tensione in uscita dalle SSE, la relativa resistenza in serie, la resistività dei cavi e la sezione della linea di contatto, come mostrato in Figura 3.2. Per configurare gli interruttori delle SSE e quindi le zone collegate a ogni SSE è necessario selezionare la voce "CONFIGURE SWITCHES". Per validare il software nel caso di alimentazione in parallelo da due SSE per le zone 16, 25 e 28, è necessario attivare gli interruttori nelle centrali Duca D'Aosta, Cittadella, Raffaello e Sebastopoli, come mostrato in Figura 3.3, in modo tale che tutte e tre le zone siano alimentate non solo dalla SSE principale, ma da due SSE in parallelo. Dopo aver attivato l'alimentazione per le zone di interesse è possibile inserire gli unici carichi di questo modello della rete, ovvero i tram oppure i guasti, tra linea di contatto e binari. Aprendo la tabella degli attributi del livello *trams* nel gruppo *input* e entrando in modalità editing, è possibile inserire un tram in una posizione qualsiasi sulla linea di contatto e scegliere la corrente che assorbe, considerando il tram come un generatore di corrente. Dopo questi primi due passaggi è necessario definire se il tram è attivo durante la simulazione, per fare questo si seleziona il termine *true* nella colonna *included* per attivarlo e il termine *false* per disattivarlo. Per comodità nella fase di confronto con il modello costruito su LT-spice, i tram sono stati inseriti nei nodi della rete, ma il software permette di inserire tram (o

Switches configuration	Switches configuration	Switches configuration
<b>DUCA D'AOSTA</b> <ul style="list-style-type: none"><li><input type="checkbox"/> zone 40</li><li><input checked="" type="checkbox"/> zone 28</li><li><input type="checkbox"/> zone 39</li><li><input checked="" type="checkbox"/> zone 16</li><li><input type="checkbox"/> zone 22</li><li><input checked="" type="checkbox"/> zone 25</li></ul>	<b>CITTADELLA</b> <ul style="list-style-type: none"><li><input type="checkbox"/> zone 08</li><li><input type="checkbox"/> zone 22</li><li><input type="checkbox"/> zone 09</li><li><input type="checkbox"/> zone 38</li><li><input type="checkbox"/> zone 03</li><li><input type="checkbox"/> zone 04</li><li><input type="checkbox"/> zone 01</li><li><input checked="" type="checkbox"/> zone 16</li><li><input type="checkbox"/> zone 19</li><li><input type="checkbox"/> zone 11</li><li><input type="checkbox"/> zone 24</li></ul>	<b>SEBASTOPOLI</b> <ul style="list-style-type: none"><li><input type="checkbox"/> zone 29</li><li><input type="checkbox"/> zone 35</li><li><input checked="" type="checkbox"/> zone 28</li><li><input type="checkbox"/> zone 42</li><li><input type="checkbox"/> zone 30</li><li><input type="checkbox"/> zone 40</li><li><input type="checkbox"/> zone 32</li><li><input type="checkbox"/> zone 31</li></ul>
<b>RAFFAELLO</b> <ul style="list-style-type: none"><li><input type="checkbox"/> zone 29</li><li><input type="checkbox"/> zone 60</li><li><input checked="" type="checkbox"/> zone 25</li></ul>		

**Figura 3.3:** Configurazione interruttori SSE in parallelo

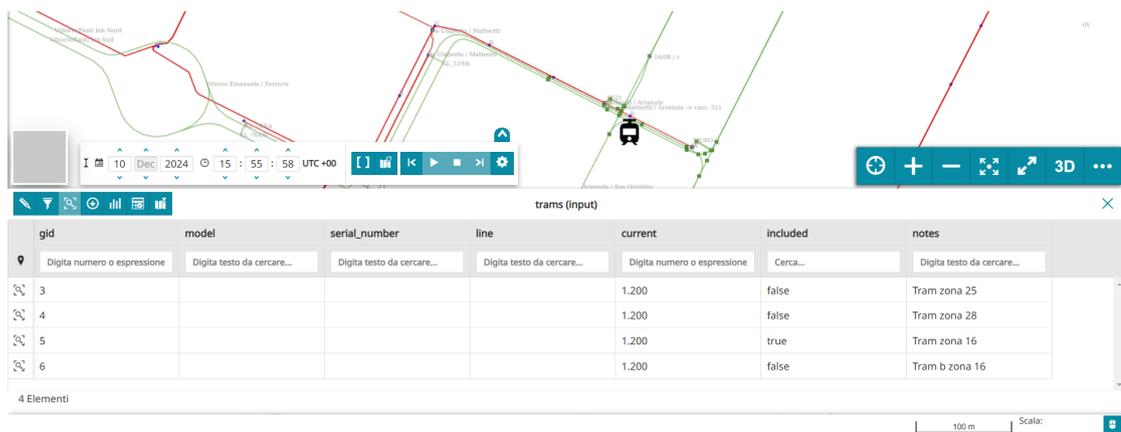


Figura 3.4: Tabella attributi tram inseriti nella mappa

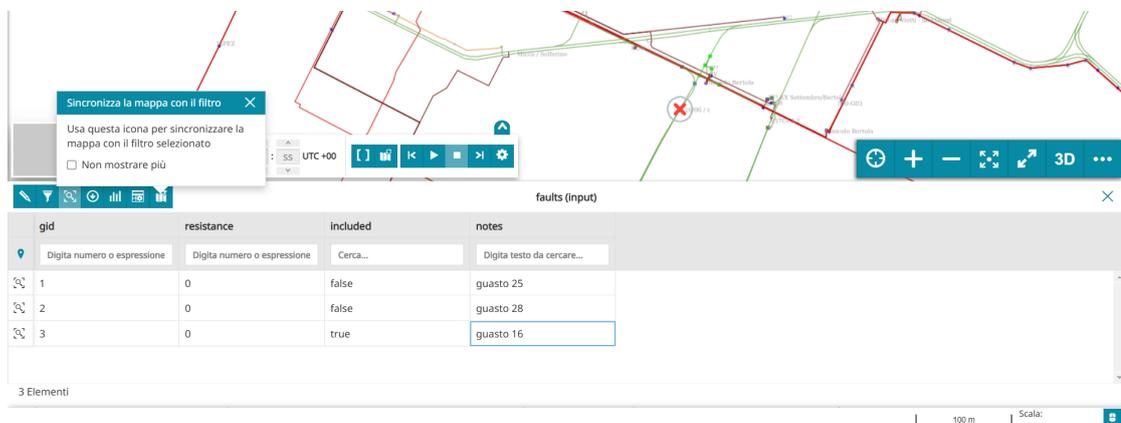
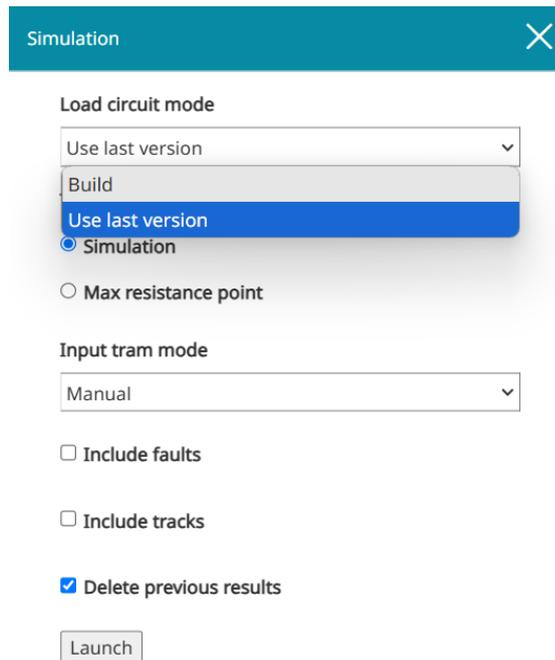


Figura 3.5: Tabella attributi guasti inseriti nella mappa

guasti) in un punto qualsiasi della linea aerea. Una volta inseriti i tram, la tabella degli attributi appare come in Figura 3.4. Si segue un procedimento analogo per l'inserimento dei guasti, con la differenza che non è presente un parametro relativo alla corrente assorbita, ma si impone la resistenza di guasto desiderata, che nei nostri casi è posta pari a  $0 \Omega$  per considerare il caso di cortocircuito franco tra linea di contatto e binari. Una volta inseriti i guasti, la tabella degli attributi del livello *faults* appare come in Figura 3.5.

Si sottolinea come la corretta codifica degli elementi nel file AutoCAD sia indispensabile affinché il software riconosca correttamente gli elementi della rete e, in particolare, ricavi le sezioni dei cavi positivi e di alimentazione dal tipo di linea usato nel disegno. Infatti, a partire dal tipo di linea, il software è in grado di ricavare la sezione del cavo che permette il calcolo della resistenza usando il valore di resistività, inserito tra i parametri iniziali, e la lunghezza del cavo, ricavata



**Figura 3.6:** Impostazioni per lancio della simulazione

dal disegno. Applicando la seconda legge di Ohm si ottiene il valore di resistenza dall'equazione 3.1

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.1)$$

Questo vale per cavi positivi e di alimentazione, mentre per la linea di contatto la sezione viene impostata direttamente sul software; in questo caso, la sezione sagomata è pari a  $95 \text{ mm}^2$ .

A questo punto è possibile lanciare la simulazione, che presenta diverse modalità selezionabili alla voce "SIMULATION" tramite la finestra riportata alla figura 3.6. Per lanciare la simulazione per il calcolo dei flussi di potenza si seleziona la *task "simulation"* includendo i guasti tramite l'apposita spunta, quando necessario. Per caricare il circuito è possibile selezionare la voce "*Build*" per ricostruire il circuito a partire da un nuovo file *.dxf* appena caricato, mentre, se quest'ultimo rimane inalterato, si seleziona la voce "*Use last version*", che utilizza l'ultima versione del circuito riducendo il tempo di calcolo. Dopo aver inserito tutti gli input necessari e aver configurato i parametri di interesse è possibile far partire la simulazione cliccando "*Launch*".

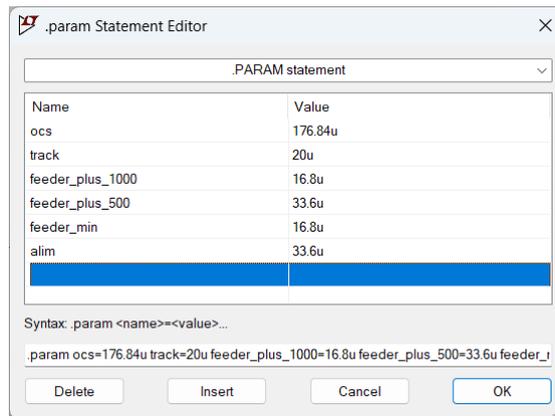


Figura 3.7: Parametri delle sezioni usate nel modello

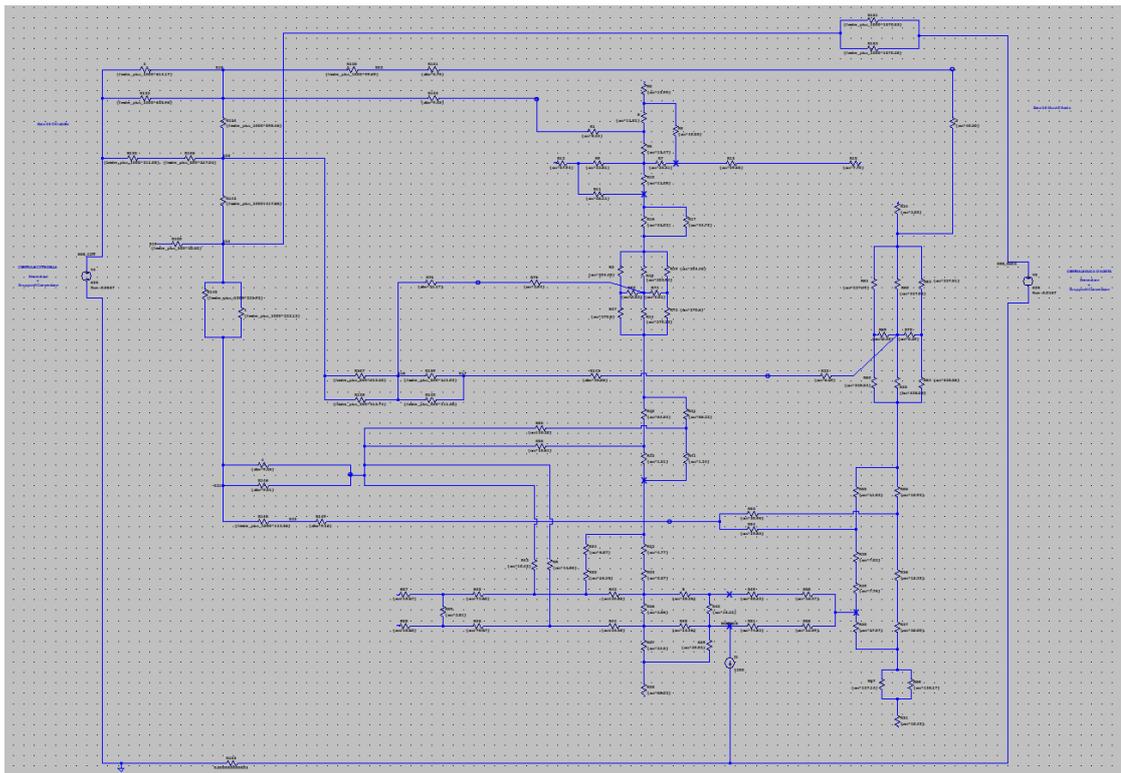
### 3.2.2 Calcolo LT-spice

Il software LT-spice permette di simulare circuiti elettrici senza limitazioni sul numero di nodi e di elementi al suo interno, perfetto per risolvere il flusso di potenza delle reti tranviarie.

Per poter confrontare i risultati ottenuti con TTN-simulator, è necessario creare su LT-spice un modello equivalente alle zone tranviarie analizzate. Per fare ciò, si considerano le seguenti approssimazioni:

- Il gruppo di generazione e conversione delle sottostazioni elettriche è rappresentato come un generatore di tensione pari a 635 V con una resistenza in serie di 0.0167  $\Omega$ ;
- Cavi, linee aeree e binari sono approssimati a semplici resistenze, trascurando i transitori che si avrebbero a causa di induttanze e capacità parassite;
- Le motrici dei tram sono considerate come generatori di corrente, il cui assorbimento è rappresentato dalla corrente imposta;
- I guasti in queste analisi sono franchi e quindi modellizzati come un collegamento in corto circuito tra linea aerea e binari.

Lo studio per la validazione viene fatto su una zona alla volta, il cui modello viene costruito separatamente dalle altre zone e alimentato in parallelo dalle due SSE scelte per ogni zona. Applicando le approssimazioni appena elencate, questi modelli sono stati costruiti inserendo due generatori di tensione con una resistenza in serie connessi alla rete magliata, in cui ogni tratto di cavi e linee è rappresentato da una resistenza. Tramite il comando ".param" si definiscono i parametri relativi alla resistenza chilometrica dei cavi, riportati alla Figura 3.7, che moltiplicata per



**Figura 3.8:** Modello elettrico equivalente della zona 16 costruito su LT-spice

la lunghezza dei cavi restituisce la resistenza dei singoli tratti. Per la zona 25 e la zona 28 si utilizza il modello utilizzato per la validazione con una singola SSE, inserendo una seconda SSE, mentre per la zona 16 è stato costruito il modello riportato alla Figura 3.8, che segue il più possibile la disposizione della linea aerea nel file .dwg.

Da questi modelli, costruiti controllando meticolosamente ogni tratto della rete, è possibile visualizzare la tensione a ogni nodo e la corrente a ogni ramo dopo aver inserito una motrice o un guasto.

### 3.3 Confronto di validazione

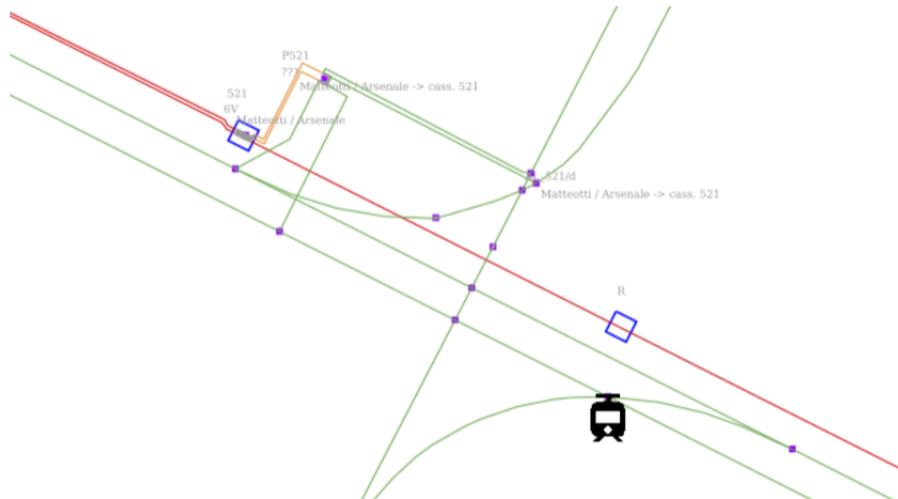
Per sostenere la validazione del software si confrontano i risultati ottenuti con TTN-simulator e con LT-spice nelle stesse condizioni operative. Si sottolinea che questa validazione riguarda la correttezza con cui il software trasforma il file .dxf in un circuito equivalente, risolvendone il flusso di potenza. L'accuratezza del modello, rispetto al comportamento reale della rete, non è oggetto di discussione in questo confronto. Nonostante il modello non rispecchi esattamente le caratteristiche reali della rete, ci permette ugualmente di ottenere risultati indicativi per il confronto tra diverse condizioni operative per osservarne le differenze, i miglioramenti e le criticità. Il file .dxf, usato come input per il software TTN-simulator, contiene disegni imprecisi del circuito negativo e per questo motivo trascuriamo i circuiti di ritorno nel modello generato su TTN-simulator. Per questo i modelli creati su LT-spice comprendono solo i cavi positivi e di alimentazione connessi alla linea aerea e i carichi o guasti che sono interposti tra la linea di contatto e il polo negativo del generatore di tensione.

Con l'obiettivo di verificare che il modello costruito manualmente su LT-spice e quello costruito automaticamente su TTN-simulator restituiscano risultati confrontabili, vengono effettuate simulazioni per le tre zone aggiornate, alimentate da due SSE in parallelo, in due differenti condizioni:

1. Assorbimento di una motrice all'interno della zona considerata
2. Cortocircuito tra linea di contatto e binari in un punto della zona considerata

#### 3.3.1 Confronto con motrice

Per effettuare il confronto si pone la motrice nello stesso punto della rete costruita da TTN-simulator e nel circuito equivalente costruito su LT-spice, imponendo un assorbimento di 1200 A al generatore di corrente che rappresenta la motrice. Dopo aver lanciato la simulazione, si confrontano i valori di tensione in alcuni nodi significativi e quelli di corrente in diversi rami della rete, considerando cavi positivi, cavi di alimentazione e tratti della linea di contatto.



**Figura 3.9:** posizione della motrice nella zona 16 su TTN-simulator

Di seguito si riportano i punti in cui sono state inserite le motrici e le tabelle che evidenziano il confronto dei risultati tra TTN-simulator e LT-spice nelle tre zone considerate. Per il confronto, il valore più significativo è l'errore percentuale che si riscontra tra i risultati del software da validare e quelli del software preso come riferimento.

### Zona 16

Nella zona 16 la motrice è stata inserita in un nodo della linea aerea vicino al punto di alimentazione derivato dalla botola numero 521. Geograficamente, la motrice è posta nei pressi dell'incrocio tra Via dell'Arsenale e Corso Giacomo Matteotti, nel punto riportato nella Figura 3.9. Il nodo nel modello equivalente su LT-spice è visibile nella Figura 3.10, in cui la motrice è cerchiata in rosso, il nodo in verde e la botola elettricamente più vicina in giallo.

Nella Tabella 3.1 si riportano i valori di tensione, ottenuti dalle simulazioni tramite i due differenti software, per diversi nodi della rete. Nello specifico sono stati considerati il valore di tensione in uscita dalle due SSE, Cittadella e Duca d'Aosta, quello registrato al pantografo e quello nelle botole intermedie 515, 516, 521 e 524. Calcolando l'errore percentuale che emerge dal confronto dei risultati, si può affermare che il software TTN-simulator restituisce risultati affidabili e accurati per i valori di tensione, in caso di assorbimento di una motrice nella zona 16 alimentata dalle SSE Duca d'Aosta e Cittadella in parallelo.

Il confronto dei risultati ottenuti per i valori di corrente nei rami è riportato nella Tabella 3.2, in cui si tengono in considerazione i rami attraversati sia da basse che da elevate correnti e appartenenti alle diverse tipologie di cavi: cavi positivi, cavi di alimentazione e linea di contatto.

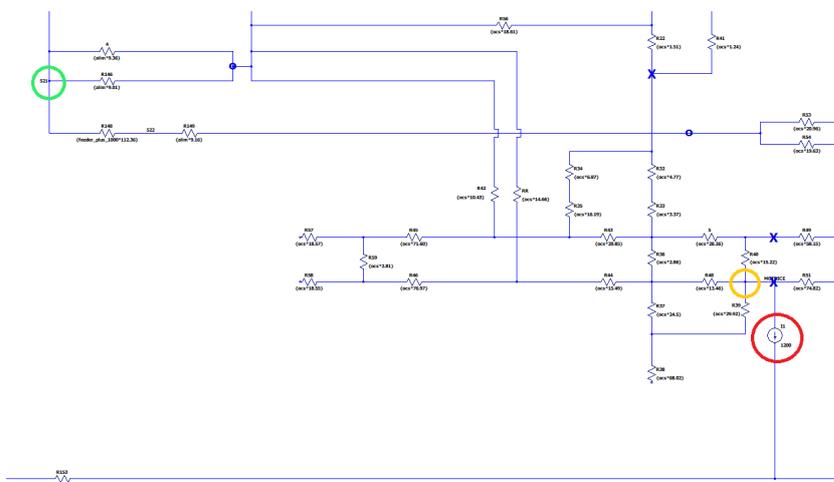


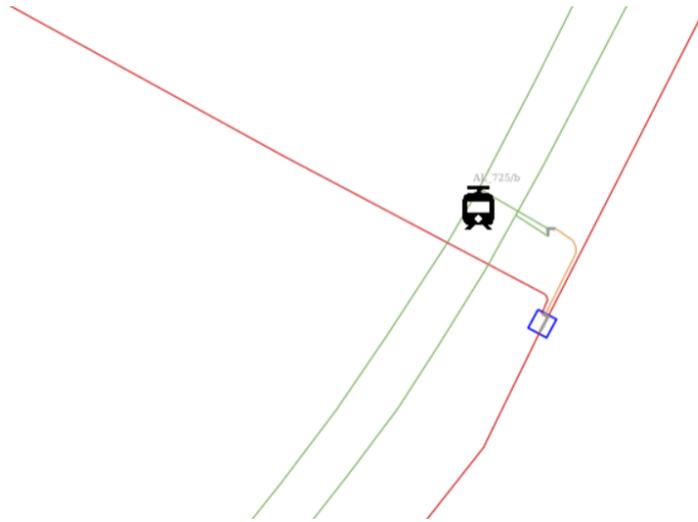
Figura 3.10: Posizione della motrice zona 16 su LT-spice

Tabella 3.1: Confronto tensioni nodali della zona 16. Caso motrice

Tensioni Nodali	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
$V_{SSEduca}$	625,719 V	625,719 V	0,00%
$V_{SSEcitt}$	624,241 V	624,241 V	0,00%
$V_{515}$	622,217 V	622,216 V	0,00%
$V_{516}$	619,982 V	619,980 V	0,00%
$V_{521}$	616,771 V	616,772 V	0,00%
$V_{524}$	618.387 V	618.388 V	0,00%
$V_{MOTRICE}$	613,741 V	613,729 V	0,00%

Tabella 3.2: Confronto correnti nei rami della zona 16 . Caso motrice

Entity Handle	Correnti	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
445AF8	$I_1$	433,129 A	433,001 A	0,03%
9ED8	$I_2$	196,178 A	196,197 A	0,01%
4B7D6E	$I_3$	109,066 A	109,098 A	0,03%
445B14	$I_4$	386,649 A	386,196 A	0,12%
4630B4	$I_5$	187,405 A	187,308 A	0,05%
4630CB	$I_6$	16,655 A	16,661 A	0,04%



**Figura 3.11:** posizione della motrice nella zona 25 su TTN-simulator

Dai risultati riportati nella Tabella 3.2 si può notare come il software TTN-simulator restituisca effettivamente valori affidabili, con un errore percentuale massimo dello 0.12% per i rami considerati. Dal confronto di tensioni e correnti si può confermare l'affidabilità di TTN-simulator per il calcolo dei flussi di potenza nella zona 16 alimentata in parallelo dalle SSE Duca d'Aosta e Cittadella.

### Zona 25

Lo stesso confronto, con lo stesso metodo, si effettua anche per la zona 25 e successivamente per la zona 28. Nella zona 25 la motrice è stata inserita in un nodo della linea aerea vicino al punto di alimentazione derivato dalla botola numero 725. Geograficamente la motrice è posta nei pressi dell'incrocio tra Via Paolo Sacchi e Via Governolo, nel punto riportato nella Figura 3.11. Il nodo nel modello equivalente su LT-spice è visibile nella Figura 3.12, in cui la motrice è cerchiata in rosso, il nodo in verde e la botola elettricamente più vicina in giallo.

Nella Tabella 3.3 si riportano i valori di tensione, ottenuti dalle simulazioni tramite i due software presi in considerazione, per diversi nodi della rete. Nello specifico si riporta il valore di tensione in uscita dalle due SSE, Raffaello e Duca d'Aosta, quello registrato al pantografo e quello nelle botole intermedie 707, 709, 722 e 724. Confrontando i risultati, si calcola l'errore percentuale per valutare l'accuratezza e l'affidabilità del software TTN-simulator per i valori di tensione in caso di assorbimento di una motrice nella zona 25 alimentata dalle SSE Duca d'Aosta e Raffaello in parallelo.

Dopo il confronto delle tensioni, si riportano nella Tabella 3.4 i risultati ottenuti per i valori di corrente, considerando sia rami attraversati da correnti elevate sia

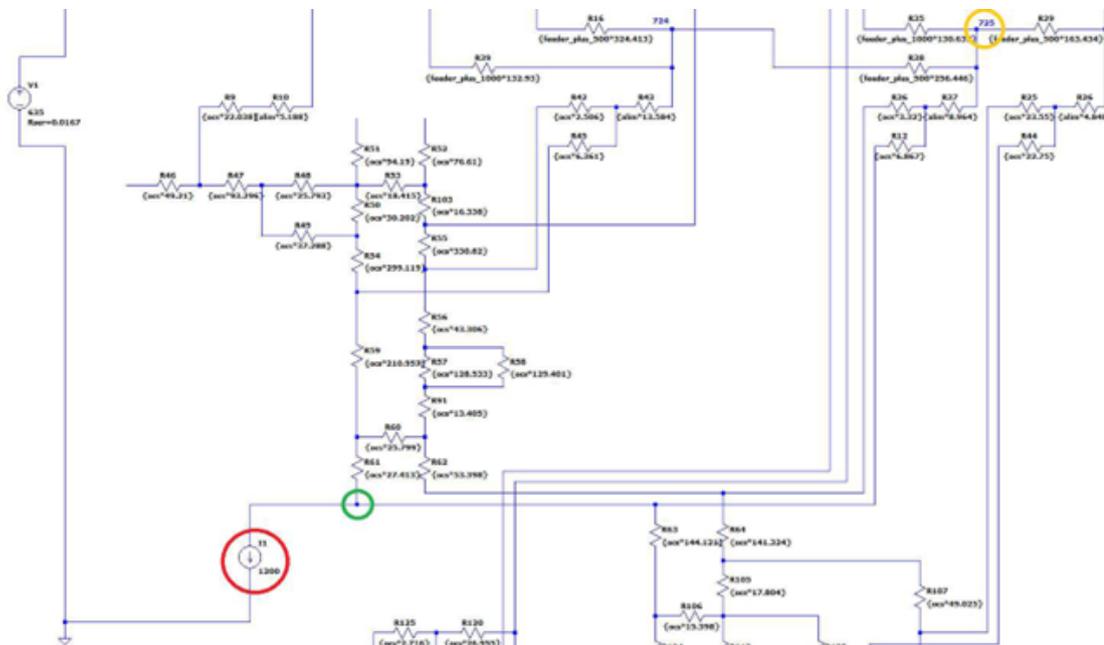


Figura 3.12: Posizione della matrice nella zona 25 su LTspice

Tabella 3.3: Confronto tensioni nodali della zona 25. Caso matrice

Tensioni Nodali [V]	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
$V_{SSEduca}$	624,565	624,565	0,00%
$V_{SSEraff}$	625,395	625,395	0,00%
$V_{707}$	617,850	617,850	0,00%
$V_{709}$	617,352	617,352	0,00%
$V_{722}$	615,406	615,406	0,00%
$V_{724}$	615,250	615,250	0,00%
$V_{MOTRICE}$	612,185	612,185	0,00%

**Tabella 3.4:** Confronto correnti nei rami della zona 25. Caso motrice

Entity Handle	Correnti	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
46343F	$I_1$	956,809 A	956,799 A	0,00%
4B775C	$I_2$	910,392 A	910,382 A	0,00%
4B751B	$I_3$	312,431 A	312,430 A	0,00%
46345B	$I_4$	86,730 A	86,733 A	0,00%
4B75BB	$I_5$	11,947 A	11,948 A	0,01%
4B765C	$I_6$	259,902 A	259.900 A	0,00%

da correnti con basso valore. Come per la zona 16, si valutano le correnti per cavi positivi, cavi di alimentazione e linea di contatto.

Osservando l'errore percentuale, ottenuto da questi risultati, si può sottolineare l'affidabilità del software TTN-simulator per il calcolo dei flussi di potenza nella zona 25 alimentata in parallelo dalle SSE Duca d'Aosta e Raffaello.

### Zona 28

Per completare la validazione del software nel caso di alimentazione di una motrice, si riporta il confronto effettuato per la zona 28, in cui la motrice è stata inserita in un nodo della linea aerea elettricamente vicino alla botola 948. Geograficamente la motrice è localizzata nei pressi dell'incrocio tra Corso Filippo Turati e Corso Lepanto, come si può vedere con maggiore precisione nella Figura 3.13. Nella Figura 3.14 si può invece osservare la posizione della motrice nel modello equivalente creato con LT-spice, in cui la motrice è cerchiata in rosso, il nodo in verde e la botola in giallo.

I valori di tensione da comparare sono riportati nella Tabella 3.5, in cui si considerano i valori di tensione in uscita dalle due SSE, Sebastopoli e Duca d'Aosta, quello registrato al pantografo e quello nelle botole intermedie 713, 901, 938 e 948. L'errore percentuale tra i risultati riportati è praticamente nullo e questo sottolinea l'accuratezza del software TTN-simulator nel calcolo delle tensioni nei nodi.

Per validare il calcolo delle correnti, si considerano ancora una volta cavi di diverso tipo e attraversati da valori molto diversi di corrente, per avere campioni il più diversi possibile. I valori ottenuti sono riportati nella Tabella 3.6, in cui l'errore percentuale non supera lo 0,02%; questo ci permette di definire il software affidabile per tutte le zone considerate nel caso di assorbimento di una motrice all'interno della zona alimentata in parallelo da due sottostazioni.



Figura 3.13: posizione della motrice nella zona 28 su TTN-simulator

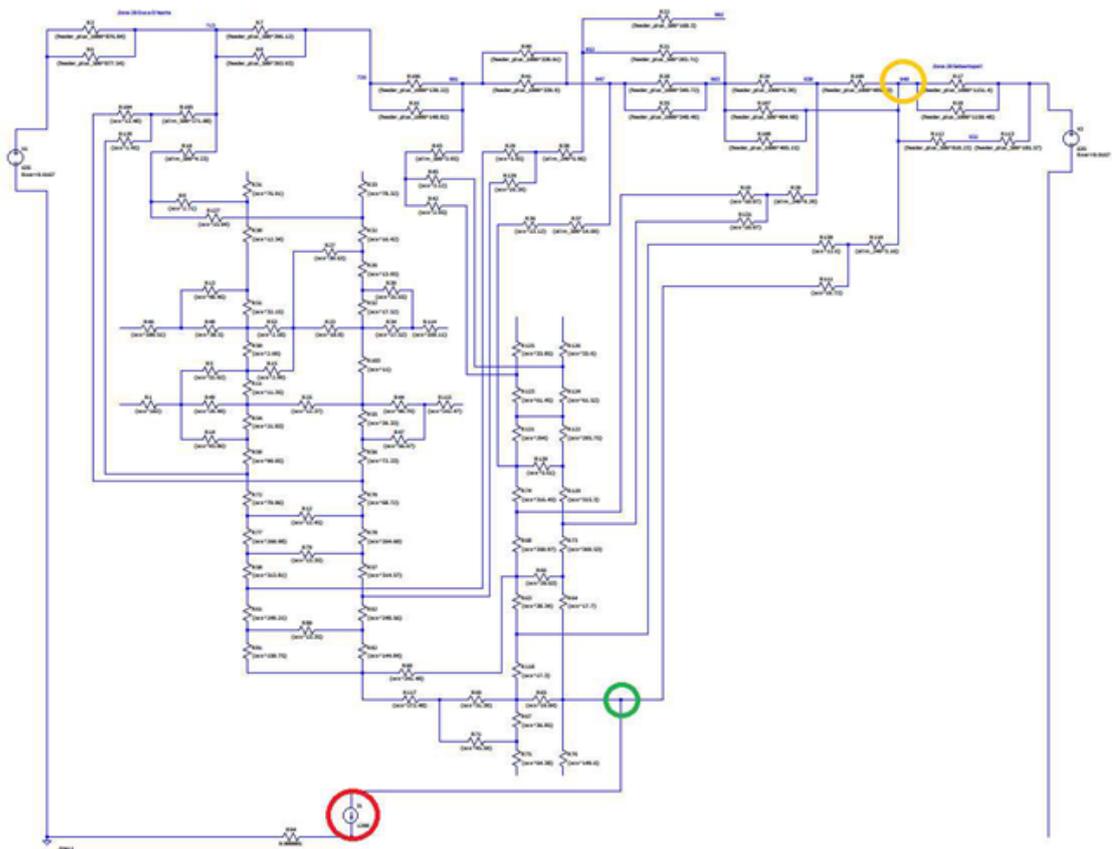


Figura 3.14: Posizione della motrice nella zona 28 su LT-spice

**Tabella 3.5:** Confronto tensioni nodali della zona 28. Caso motrice

Tensioni Nodali [V]	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
$V_{SSEduca}$	627,369	627,369	0,00%
$V_{SSEseb}$	622,591	622,591	0,00%
$V_{713}$	622,881	622,881	0,00%
$V_{901}$	619,895	619,895	0,00%
$V_{938}$	617,880	617,880	0,00%
$V_{948}$	617,007	617,008	0,00%
$V_{MOTRICE}$	614,245	614,245	0,00%

**Tabella 3.6:** Confronto correnti nei rami della zona 28. Caso motrice

Entity Handle	Correnti	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
4454A7	$I_1$	1067,452 A	1067,533 A	0,00%
511	$I_2$	304,702 A	304,696 A	0,00%
4634FD	$I_3$	724,353 A	724,402 A	0,01%
E7A	$I_4$	128,069 A	128,064 A	0,00%
4634CF	$I_5$	196,218 A	196,186 A	0,02%
445512	$I_6$	27,083 A	27,082 A	0,00%

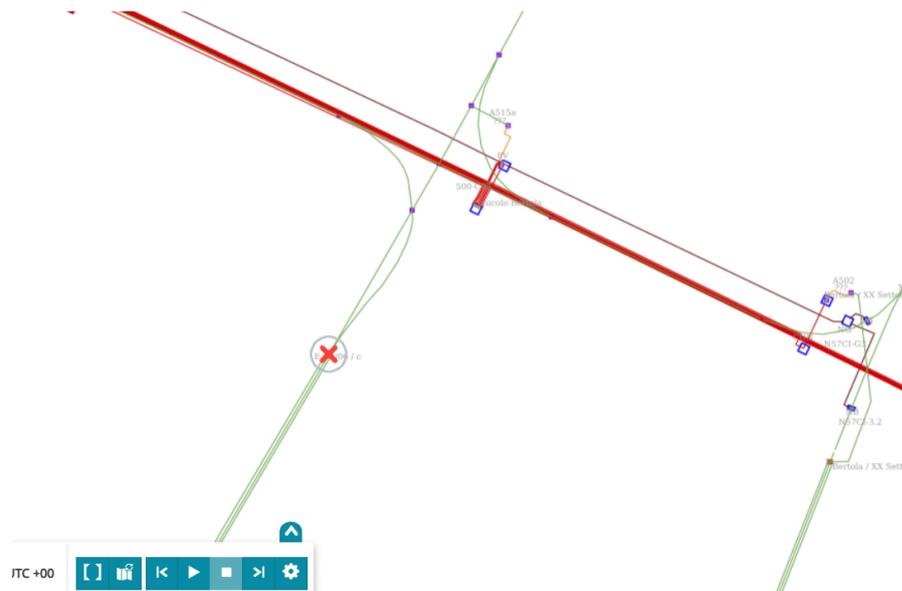


Figura 3.15: posizione del guasto nella zona 16 su TTN-simulator

### 3.3.2 Confronto con guasto

Per terminare la validazione del software non è sufficiente valutare i risultati ottenuti nel caso di assorbimento di una motrice, ma è necessario considerare anche la simulazione effettuata dal software in caso di guasto. Per il confronto si sceglie di considerare un cortocircuito tra linea di contatto e circuito di ritorno, impostando la resistenza di guasto  $R_G = 0\Omega$ . Questa seconda fase di validazione è rilevante perché i risultati ottenuti presentano valori di corrente molto più elevati e valori di tensione più bassi. Il confronto viene effettuato sulle tre zone elettriche di interesse alimentate in parallelo da due sottostazioni elettriche.

#### Zona 16

Nella zona 16 il punto di guasto è stato inserito in un nodo della linea di contatto a metà strada tra i punti di alimentazione derivati dalle botole numero 515 e 516. Geograficamente il guasto è collocato nei pressi dell'incrocio tra Via San Tommaso e Via Antonio Bertola. Nella Figura 3.15 si può vedere il nodo esatto in cui è stato inserito il guasto su TTN-simulator, mentre nella Figura 3.16 il punto di guasto nel circuito equivalente, costruito su LT-spice, è cerchiato in rosso e le botole più vicine in giallo.

Dopo aver effettuato la simulazione su entrambi i software, come descritto in precedenza, otteniamo una corrente di guasto pari a  $34,5kA$ . I valori di tensione sono riportati nella Tabella 3.7 e quelli di corrente nella Tabella 3.8. Per la zona 16 si considerano gli stessi nodi e gli stessi rami valutati nella simulazione



**Tabella 3.7:** Confronto tensioni nodali della zona 16. Caso guasto

Tensioni Nodali [V]	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
$V_{SSEduca}$	423,461	423,467	0,00%
$V_{SSEcitt}$	270,776	270,782	0,00%
$V_{515}$	178,241	178,250	0,01%
$V_{516}$	173,045	173,044	0,00%
$V_{521}$	244,686	244,686	0,00%
$V_{524}$	256,366	256,375	0,00%
$V_{MOTRICE}$	240,414	240,388	0,01%

**Tabella 3.8:** Confronto correnti nei rami della zona 16. Caso guasto

Entity Handle	Correnti	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
445AF8	$I_1$	3130,306 A	3129,870 A	0,01%
9ED8	$I_2$	8968,184 A	8968,908 A	0,00%
4B7D6E	$I_3$	189,748 A	189,427 A	0,17%
445B14	$I_4$	2001,406 A	2000,430 A	0,05%
4630B4	$I_5$	139,340 A	138,764 A	0,41%
4630CB	$I_6$	3121,159 A	3120,962 A	0,01%

con motrice. Infatti, nella Tabella 3.7 il nodo  $V_{MOTRICE}$  si riferisce al nodo in cui era posizionata la motrice nelle simulazioni precedenti. Il confronto tra i risultati ottenuti con TTN-simulator e con LT-spice ci permette di considerare il software in analisi affidabile per il calcolo di tensioni e correnti in caso di guasto nella zona 16 alimentata in parallelo dalle SSE Duca d'Aosta e Cittadella.

### Zona 25

Nella zona 25 il punto di guasto è stato inserito in un nodo della linea di contatto vicino al punto di alimentazione derivato dalla botola numero 724. Geograficamente il guasto è collocato nei pressi dell'incrocio tra Via Paolo Sacchi e Via Pastrengo. Nella Figura 3.17 si può vedere il nodo esatto in cui è stato inserito il guasto su TTN-simulator, mentre nella Figura 3.18 il punto di guasto nel circuito equivalente, costruito su LT-spice, è cerchiato in rosso e la botola più vicina in giallo. In questo punto si registra una corrente di guasto pari a  $33,2kA$  con alimentazione in parallelo.

Per la zona 25 la simulazione in caso di guasto considera gli stessi nodi del caso con assorbimento da motrice, ma rami diversi per il calcolo di correnti con valori variabili da bassi a molto elevati. I valori di tensione ottenuti ai nodi sono riportati nella Tabella 3.9, dove il nodo  $V_{MOTRICE}$  si riferisce al nodo in cui era posizionata

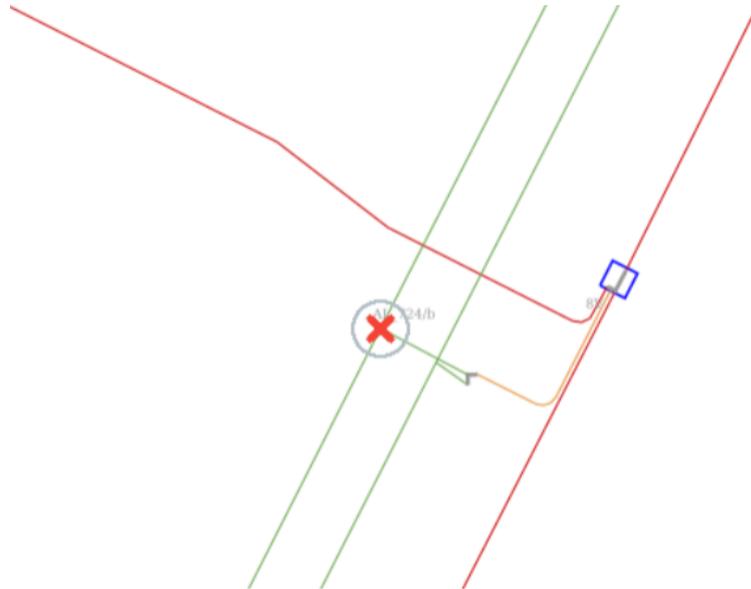


Figura 3.17: posizione del guasto nella zona 25 su TTN-simulator

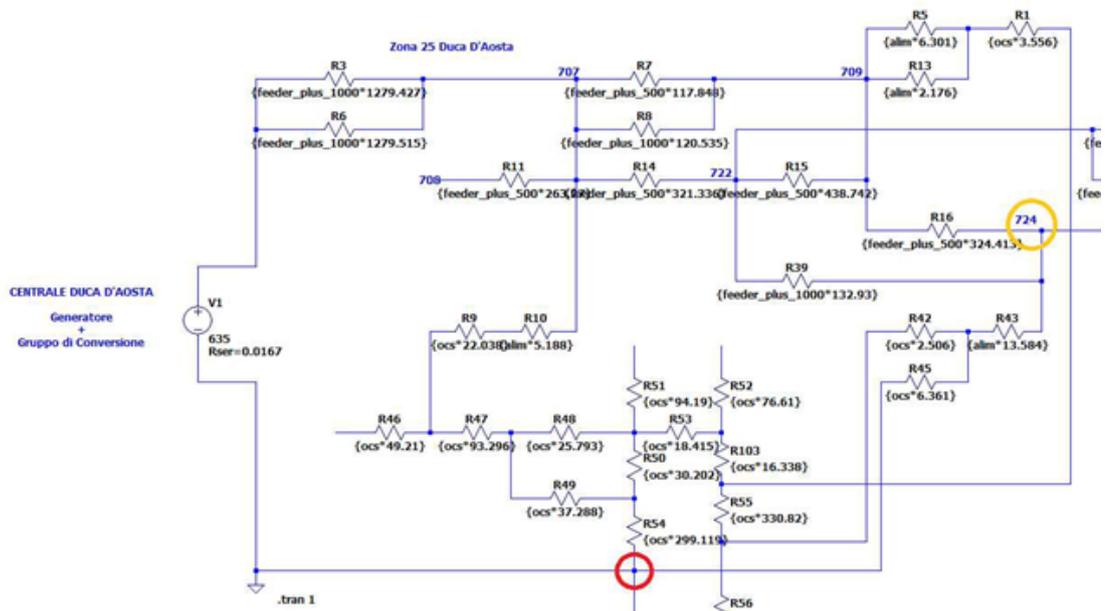


Figura 3.18: Posizione del guasto nella zona 25 su LT-spice

**Tabella 3.9:** Confronto tensioni nodali della zona 25. Caso guasto

Tensioni Nodali [V]	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
$V_{SSEduca}$	330,150	330,159	0,00%
$V_{SSEraff}$	384,584	384,610	0,01%
$V_{707}$	133,959	133,974	0,01%
$V_{709}$	118,082	118,097	0,01%
$V_{722}$	76,554	76,571	0,02%
$V_{724}$	44,783	44,801	0,04%
$V_{MOTRICE}$	86,094	86,111	0,02%

**Tabella 3.10:** Confronto correnti nei rami della zona 25. Caso guasto

Entity Handle	Correnti	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
463459	$I_1$	29252,389 A	29251,290 A	0,00%
4B751B	$I_2$	9127,561 A	9127,300 A	0,00%
4633EF	$I_3$	2308,788 A	2308,950 A	0,01%
4B75B9	$I_4$	1716,142 A	1716,260 A	0,01%
4B7710	$I_5$	5544,895 A	5544,850 A	0,00%
4B7713	$I_6$	224,779 A	224,780 A	0,00%

la motrice nelle simulazioni precedenti. Mentre i valori di corrente sono riportati nella Tabella 3.10. I valori di errore percentuale, calcolati dal confronto dei risultati ottenuti dai due software, permettono di valutare il software in analisi affidabile per il calcolo di tensioni e correnti in caso di guasto nella zona 25 alimentata in parallelo dalle SSE Duca d'Aosta e Raffaello.

### Zona 28

Nella zona 28 il punto di guasto è stato inserito in un nodo della linea di contatto vicino al punto di alimentazione derivato dalla botola numero 952, in cui si registra un valore della corrente di guasto pari a  $30kA$ . Geograficamente il guasto è collocato nei pressi dell'incrocio tra Corso Re Umberto e Corso Carlo e Nelli Rosselli. Nella Figura 3.19 si può vedere il nodo esatto in cui è stato inserito il guasto su TTN-simulator, mentre nella Figura 3.20 il punto di guasto nel circuito equivalente, costruito su LT-spice, è cerchiato in rosso e la botola più vicina in giallo.

Anche per la zona 28 la simulazione in caso di guasto considera gli stessi nodi del caso con assorbimento da motrice, ma rami diversi in modo tale da ottenere sia valori di correnti molto alti sia valori piuttosto bassi. I valori di tensione ottenuti ai nodi sono riportati nella Tabella 3.11, dove il nodo  $V_{MOTRICE}$  si riferisce al nodo in cui era posizionata la motrice nelle simulazioni precedenti. Mentre i valori



Figura 3.19: posizione del guasto nella zona 28 su TTN-simulator

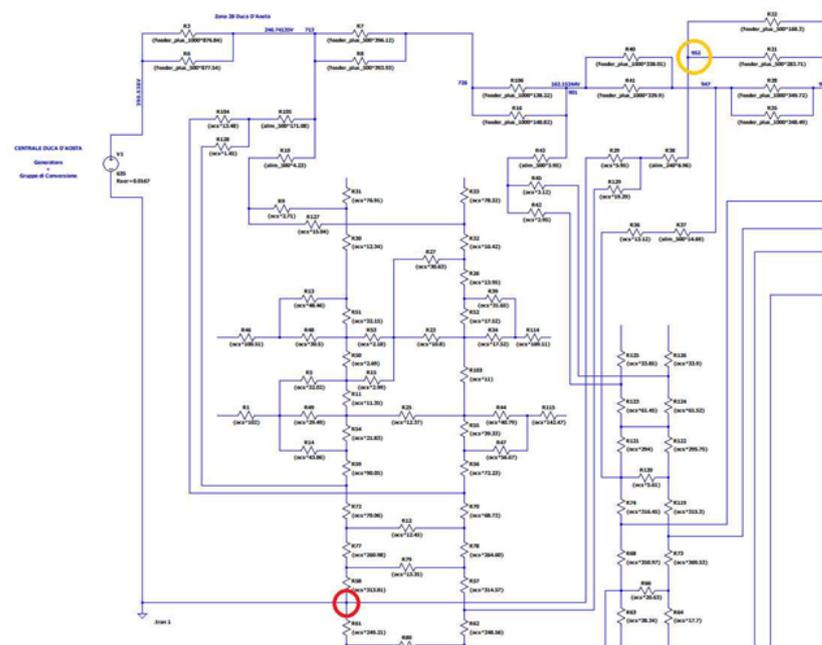


Figura 3.20: Posizione del guasto nella zona 28 su LT-spice

**Tabella 3.11:** Confronto tensioni nodali della zona 28. Caso guasto

Tensioni Nodali [V]	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
$V_{SSEduca}$	433,047	433,053	0,00%
$V_{SSEseb}$	369,810	369,824	0,00%
$V_{713}$	314,255	314,265	0,00%
$V_{901}$	257,189	257,202	0,01%
$V_{938}$	219,210	219,225	0,01%
$V_{948}$	250,490	250,506	0,01%
$V_{MOTRICE}$	243,025	243,039	0,01%

**Tabella 3.12:** Confronto correnti nei rami della zona 28. Caso guasto

Entity Handle	Correnti	TTN-Simulator	LTspice	Errore %
463509	$I_1$	22966,899 A	22966,291 A	0,00%
511	$I_2$	8064,139 A	8063,881 A	0,00%
1CFEB4	$I_3$	3504,860 A	3504,718 A	0,00%
1F9B	$I_4$	3301,625 A	3301,574 A	0,00%
46350B	$I_5$	1895,037 A	1895,034 A	0,00%
3A7DE	$I_6$	8,877 A	8,883 A	0,07%

di corrente sono riportati nella Tabella 3.12. Da questo ultimo confronto si può confermare l'affidabilità del software e affermarne la validità per il calcolo dei flussi di potenza per tutte e tre le zone considerate sia in caso di normale funzionamento, con assorbimento da una motrice, sia in caso di guasto, effettuando le simulazioni con doppia alimentazione in parallelo.

## Capitolo 4

# Confronto per casi semplificati/rappresentativi

Dopo aver aggiornato il modello della zona 16 ed aver validato il software per l'alimentazione in parallelo delle tre zone considerate, possiamo utilizzare il software per studiare le differenze del comportamento delle zone elettriche in due diverse condizioni di alimentazione:

- alimentazione proveniente da una singola sottostazione elettrica per le singole zone, ovvero il tipo di alimentazione usata attualmente per la rete tranviaria torinese;
- alimentazione proveniente da due sottostazioni in parallelo per ogni zona. In particolare le tre zone considerate sono alimentate da una sottostazione in comune che le collega elettricamente a livello della sbarra comune in uscita dalla SSE Duca d'Aosta.

Il modello della rete a nostra disposizione, nonostante presenti alcune semplificazioni, ci permette di ottenere risultati indicativi delle differenze tra le due configurazioni di alimentazione. È importante abbinare i ragionamenti teorici ai risultati delle simulazioni perché, a causa della complessa magliatura della rete tranviaria, è difficile prevedere con precisione i risultati relativi a tensioni e correnti e quindi il software ci permette di fare valutazioni più accurate. Per le prime valutazioni sulle differenze che si ottengono dai due tipi di alimentazione, è utile effettuare alcune simulazioni applicate a casi semplificati, ma comunque rappresentativi. In questo capitolo vengono analizzati quattro aspetti interessanti nel confronto tra i due tipi di alimentazione, riferendoci a quattro casi semplificati:

1. confronto di profilo di tensione e perdite a pari assorbimento nella stessa zona e nello stesso punto della rete;

2. possibilità di aumento del traffico grazie alla presenza di due sottostazioni che teoricamente potrebbero erogare il doppio della corrente su una zona;
3. ricerca del punto con corrente minima di cortocircuito con doppia alimentazione e confronto del valore con quello a singola alimentazione;
4. recupero di energia in frenata e tensione al pantografo della motrice in frenatura con una rete più ricettiva.

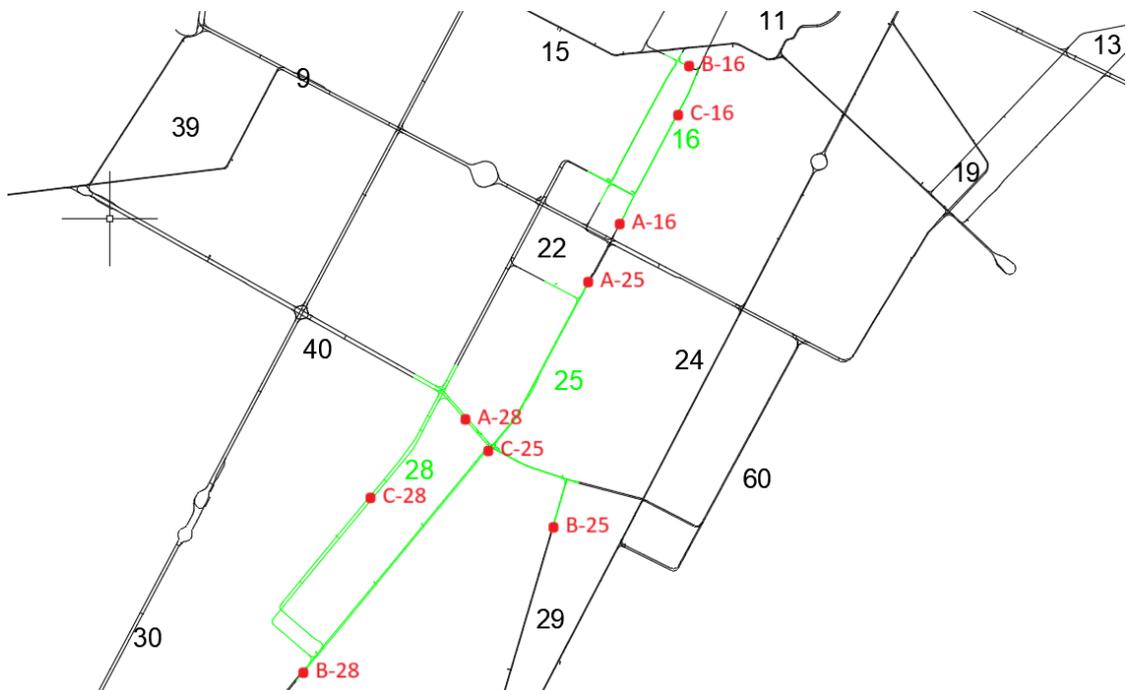
## 4.1 Confronto profilo di tensione e perdite

Esaminiamo un caso semplificato di assorbimento, posizionando un tram, rappresentato da un generatore di corrente di 1200 A, in un punto all'interno di una zona. Analizziamo quindi i valori delle tensioni ai nodi e quelli delle correnti e delle perdite nei rami della rete, confrontando tre scenari: alimentazione da una prima sottostazione, da una seconda sottostazione e, infine, da entrambe in parallelo. Per avere valori variabili e ottenere un confronto più consistente, ripetiamo questo procedimento posizionando il tram in tre punti diversi della zona considerata. Punti di particolare interesse sono i due punti in cui l'impedenza è massima rispettivamente per una e per l'altra delle due SSE considerate. Questi sono i punti in cui la caduta di tensione è massima all'interno della zona in caso di alimentazione da una sola sottostazione. Quindi, queste sono le due circostanze in cui si possono ottenere i maggiori vantaggi in termini di tensione al pantografo grazie all'alimentazione in parallelo. Il terzo punto in cui viene posizionato il tram è un punto intermedio, tra i due precedenti, per analizzare una condizione il più possibile differente dalle due precedenti. Queste simulazioni e analisi vengono effettuate prima per la zona 16 e successivamente si ripetono tutti i passaggi anche per le zone 25 e 28, ottenendo risultati simili e rappresentativi del comportamento della rete.

Il software TTN-simulator permette di effettuare una simulazione, che restituisce come risultato la posizione dei punti di guasto con corrente di cortocircuito minima,  $I_{cc,min}$ , all'interno della zona selezionata e quindi i due punti con impedenza massima rispetto alle due sottostazioni che possono alimentare la zona. Una volta ottenuti questi risultati possiamo definire due delle tre posizioni dei tram di prova e la terza viene selezionata di conseguenza. Le posizioni considerate per ogni zona sono riportate qui di seguito e visibili nella Figura 4.1.

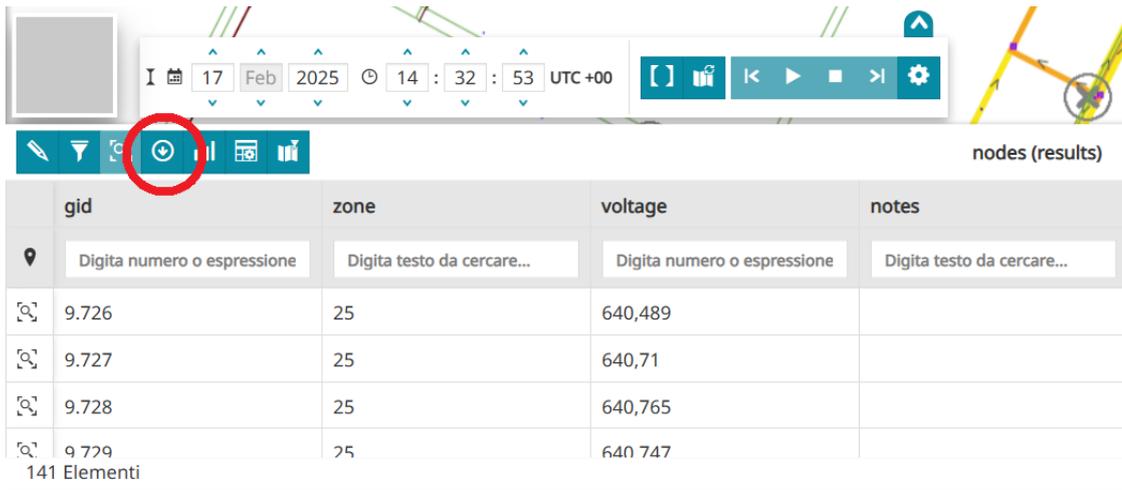
- Per la zona 16: punto (A-16) con  $I_{cc,min}$  rispetto alla SSE Cittadella, nei pressi dell'incrocio tra Via XX Settembre e Corso Vittorio Emanuele II; punto (B-16) con  $I_{cc,min}$  rispetto alla SSE Duca d'Aosta, nei pressi dell'incrocio tra Via XX Settembre e Via Antonio Bertola; e un punto (C-16) intermedio tra i due precedenti.

- Per la zona 25: punto (A-25) con  $I_{cc,min}$  rispetto alla SSE Raffaello, nei pressi dell'incrocio tra Via Paolo Sacchi e Via Assietta; punto (B-25) con  $I_{cc,min}$  rispetto alla SSE Duca d'Aosta, nei pressi di Piazza Nizza; e un punto (C-25) intermedio tra i due precedenti.
- Per la zona 28: punto (A-28) con  $I_{cc,min}$  rispetto alla SSE Sebastopoli, nei pressi dell'incrocio tra Via San Secondo e Corso Sommeiller; punto (B-28) con  $I_{cc,min}$  rispetto alla SSE Duca d'Aosta, lungo Corso Unione Sovietica tra l'incrocio con Via Tommaso de Cristoforis e quello con Corso Lepanto; e un punto (C-28) intermedio tra i due precedenti.



**Figura 4.1:** Posizioni dei tram considerati nelle simulazioni per il confronto di perdite e tensioni

Per ogni simulazione esportiamo tutti i valori di tensione nei nodi come file *.csv*, che poi elaboriamo in ambiente excel per poter confrontare i profili di tensione e i valori di tensione al pantografo. L'esportazione dei dati è possibile grazie all'apposito comando presente nella tabella degli attributi, cerchiato in Figura 4.2. Successivamente, esportiamo anche i risultati relativi ai rami della rete, che comprendono i valori di corrente e le perdite per ogni ramo. Dopo aver spiegato brevemente le modalità di simulazione e di esportazione dei dati, ora si considerano separatamente il calcolo delle perdite sulla rete e l'analisi dei profili di tensione,



The screenshot shows a software interface with a top navigation bar containing a date (17 Feb 2025), time (14:32:53 UTC+00), and various control icons. Below the navigation bar is a toolbar with several icons, one of which is circled in red. The main area displays a table with the following data:

	gid	zone	voltage	notes
	<input type="text" value="Digita numero o espressione"/>	<input type="text" value="Digita testo da cercare..."/>	<input type="text" value="Digita numero o espressione"/>	<input type="text" value="Digita testo da cercare..."/>
	9.726	25	640,489	
	9.727	25	640,71	
	9.728	25	640,765	
	9.729	25	640.747	
	141 Elementi			

**Figura 4.2:** Comando per esportare i dati dalla tabella degli attributi

confrontando i risultati ottenuti con alimentazione da singola SSE e quelli ottenuti con alimentazione in parallelo per i diversi casi di assorbimento.

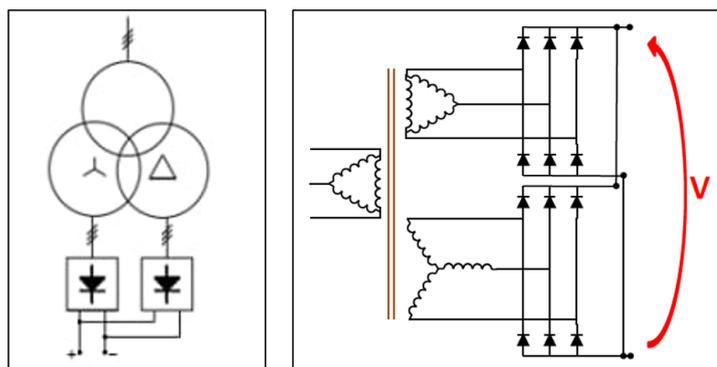
#### 4.1.1 Calcolo e confronto delle perdite

Il calcolo delle perdite dovuto all'assorbimento di un tram all'interno di una zona elettrica prevede il calcolo di due componenti:

- le perdite all'interno del gruppo di conversione;
- le perdite Joule nei rami della rete.

Per calcolare le **perdite nel gruppo di conversione** si considera una resistenza equivalente rappresentativa delle perdite in funzione del valore di corrente continua erogata in uscita dal convertitore. Siccome analizziamo assorbimenti con alti valori di corrente, si trascurano le perdite a vuoto e si considerano esclusivamente le perdite Joule dovute al passaggio di corrente. Teoricamente, la resistenza equivalente da utilizzare per il calcolo delle perdite,  $R_{eq,p}$ , è differente da quella che si utilizza per il calcolo della caduta di tensione,  $R_{eq,t}$ , ma nei passaggi successivi si dimostrerà che per i nostri risultati è possibile approssimare e considerarle uguali.

La resistenza equivalente ai fini del calcolo della caduta di tensione rappresenta la caduta di tensione del gruppo di conversione in funzione della corrente continua in uscita dal convertitore, rappresentando sia la caduta resistiva sia quella induttiva del trasformatore, che non può essere modellizzata con un'induttanza all'interno del circuito equivalente in corrente continua. Questo significa che, se utilizzassimo  $R_{eq,t}$  per il calcolo delle perdite, otterremmo più perdite di quelle reali,



**Figura 4.3:** Schemi gruppo di conversione [8]

perché considereremmo come resistiva anche la quota di caduta induttiva, ma se consideriamo il carico come sola potenza attiva otteniamo che  $R_{eq,p} = R_{eq,t}$ , come riportato in seguito. Si osserva che l'approssimazione di un carico puramente attivo è verosimile visto che il circuito a valle è puramente resistivo. Prima dei calcoli che hanno portato a valutare come corretta questa approssimazione, si riporta in Figura 4.3 uno schema rappresentativo della struttura del gruppo di conversione, che è composto da un trasformatore trifase con doppio secondario, uno a stella e uno a triangolo, seguito da un convertitore a 12 impulsi.

Facendo riferimento alla norma CEI 50328 [9], il rapporto, tra la tensione di fase alternata all'ingresso del convertitore e quella continua in uscita, è riportato nell'equazione 4.1.

$$V_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} V_{ac} \quad (4.1)$$

Nelle equazioni 4.2 e 4.3 si definiscono le potenze in ingresso e in uscita del convertitore che, a meno del rendimento e considerando il carico puramente attivo, devono essere uguali. Uguagliando le due potenze e tenendo conto del rapporto tra le tensioni, si ottiene l'espressione della corrente efficace di fase al secondario, riportata nell'equazione 4.4. Si osserva che, trattandosi di un trasformatore con doppio secondario, sono presenti 6 avvolgimenti.

$$P_{ac} = 6 \cdot V_{ac} \cdot I_{ac,rms} \quad (4.2)$$

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc} \quad (4.3)$$

$$I_{ac,rms} = \frac{I_{dc}}{\pi \cdot \sqrt{2}} \quad (4.4)$$

Conoscendo queste espressioni è possibile calcolare la resistenza equivalente ai fini della caduta di tensione e quella rappresentativa delle perdite:

- Per il calcolo della caduta di tensione si devono sommare la componente dovuta al raddrizzatore, considerata puramente resistiva, e quella dovuta al trasformatore, definita come la caduta di tensione industriale di fase, preceduta dal fattore moltiplicativo che riporta da lato AC a lato DC del convertitore. Sommando queste componenti si ottiene l'espressione 4.5.

$$\Delta V = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} (R_{cc} \cdot I_{ac,rms} \cdot \cos \varphi + X_{cc} \cdot I_{ac,rms} \cdot \sin \varphi) + R_c \cdot I_{dc} \quad (4.5)$$

Considerando il carico puramente attivo,  $\cos \varphi = 1$  e  $\sin \varphi = 0$ , e sostituendo l'espressione della corrente alternata con quella dell'equazione 4.4, otteniamo l'espressione della caduta di tensione in funzione di  $I_{dc}$ , definita nell'equazione 4.6, da cui si ricava la resistenza equivalente riportata nell'equazione 4.7.

$$\Delta V = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot R_{cc} \cdot \frac{I_{dc}}{\pi \cdot \sqrt{2}} + R_c \cdot I_{dc} \quad (4.6)$$

$$R_{eq,t} = \frac{3}{\pi^2} \cdot R_{cc} + R_c \quad (4.7)$$

- Per il calcolo delle perdite, sommiamo le perdite nel convertitore alle perdite del trasformatore, calcolate a secondario con  $R_{cc}$  che comprende anche la resistenza in serie del primario riportata a secondario. Dall'espressione della perdite nell'equazione 4.8, sostituendo l'espressione di  $I_{ac,rms}$ , ricaviamo la resistenza equivalente per il calcolo della potenza in funzione di  $I_{dc}$ , riportata nell'equazione 4.9.

$$Perdite = 6 \cdot R_{cc} \cdot I_{ac,rms}^2 + R_c \cdot I_{dc}^2 \quad (4.8)$$

$$R_{eq,p} = \frac{3}{\pi^2} \cdot R_{cc} + R_c \quad (4.9)$$

Dalle due espressioni 4.7 e 4.9, si può notare che abbiamo ottenuto la stessa espressione per le due resistenze equivalenti. Per questo motivo, nel calcolo delle perdite della rete tranviaria si userà lo stesso valore di resistenza che il software usa per calcolare la caduta di tensione in uscita dalla sottostazione elettrica.

Il calcolo delle **perdite Joule nei rami della rete** consiste nella somma delle perdite di ogni singolo ramo. Questo procedimento è facilitato dalla tabella degli attributi relativa al livello *links*, che oltre al valore di corrente nei rami, restituisce anche la caduta di tensione e le perdite sul singolo ramo, come si può vedere nella Figura 4.4. Esportando questi dati, è sufficiente sommare tutte le componenti di perdita per ottenere le perdite totali dei rami. Dopo aver calcolato le perdite nel gruppo di conversione, per le quali è necessario conoscere la corrente erogata, e su tutti i rami, è sufficiente sommare queste due componenti per ottenere le perdite

Layer	EntityHandle	zone	length	current	voltage_drop	power	notes
CAVI_POSITIVI	6AF	16	1,570,279	163,367	4,31	704,07	
CAVI_POSITIVI	6B0	16	1,570,525	163,342	4,31	703,959	
CAVI_POSITIVI	6B4	16	112,356	47,161	0,089	4,198	
CAVI_POSITIVI	285F	16	111,358	66,665	0,249	16,629	
CAVI_POSITIVI	2861	16	317,041	166,912	1,778	296,776	
CAVI_POSITIVI	28C9	16	99,694	84,999	0,142	12,1	

Figura 4.4: Tabella degli attributi *links*

Tabella 4.1: Confronto delle perdite nella zona 16

Zona 16	Perdite [kW]		
	SSE CITT	SSE in parallelo	Differenza
$R_{max}(CITT)$	65,25	47,92	17,33
$R_{max}(DUCA)$	49,46	39,17	10,29
Intermedio	37,78	24,57	13,21

totali del sistema.

Il confronto tra le perdite che si hanno tra la configurazione di alimentazione con una sola SSE e con due SSE in parallelo conferma la riduzione delle perdite con la seconda configurazione. Per l'alimentazione da una singola SSE si considera la SSE con  $I_{cc,min}$  maggiore, che è la SSE effettivamente utilizzata nell'attuale funzionamento della rete; in questo modo il confronto è più rilevante. Nella Tabella 4.1 sono riportati i valori delle perdite nella zona 16 per le tre diverse posizioni del tram e per ogni posizione si riportano i valori in caso di alimentazione da singola SSE, quelli in caso di alimentazione in parallelo e infine la differenza tra le due configurazioni. Questa differenza rappresenta la potenza risparmiata grazie all'alimentazione in parallelo. Nella tabella le posizioni sono quelle descritte all'inizio del capitolo:  $R_{max}(SSE)$ , in cui SSE è sostituito con l'abbreviazione della sottostazione a cui si riferisce, indica il punto con impedenza maggiore rispetto a quella SSE e quindi il punto con  $I_{cc,min}$ .

Nelle Tabelle 4.2 e 4.3, si riportano le perdite relative rispettivamente alle zone 25 e 26 con lo stesso formato della tabella riferita alla zona 16.

Da queste prove è possibile calcolare un valore medio del risparmio di potenza fra le casistiche considerate che è pari a  $22,44kW$ . Considerando che il valore medio delle perdite con alimentazione da singola SSE è pari a  $72,11kW$  per queste prove, otteniamo un valore medio del risparmio di potenza percentuale pari al 30,85%.

**Tabella 4.2:** Confronto delle perdite nella zona 25

Zona 25	Perdite [kW]		
Posizione	SSE RAFF	SSE in parallelo	Differenza
$R_{max}(RAFF)$	90,22	55,02	35,20
$R_{max}(DUCA)$	82,81	61,26	21,55
Intermedio	65,05	39,65	25,40

**Tabella 4.3:** Confronto delle perdite nella zona 28

Zona 28	Perdite [kW]		
Posizione	SSE DUCA	SSE in parallelo	Differenza
$R_{max}(SEB)$	88,81	72,79	16,02
$R_{max}(DUCA)$	98,43	63,00	35,43
Intermedio	78,25	52,48	25,77

**Tabella 4.4:** Confronto del rendimento tra la condizione di alimentazione da una sola SSE e da due SSE in parallelo

Zona	Rendimento		
	Singola SSE	SSE in parallelo	Differenza
16	93%	95%	2%
25	90%	93%	4%
28	88%	92%	3%

Per una migliore comprensione di questi risultati, è stato calcolato il rendimento per tutti i casi di assorbimento considerati per il confronto delle perdite. Nella Tabella 4.4 si riporta il rendimento medio dei tre casi per ogni zona. Da questa tabella è possibile calcolare un rendimento medio del 90% in caso di alimentazione da una singola sottostazione e un rendimento medio del 93% in caso di alimentazione da due sottostazioni in parallelo, con un aumento pari al 3%.

Questi risultati sottolineano il risparmio, in termini di energia persa nella rete, che si ha sostituendo la singola alimentazione con l'alimentazione in parallelo di una singola zona con due sottostazioni.

#### 4.1.2 Analisi e confronto dei profili di tensione

Anche per l'analisi dei profili di tensione che si ottengono con l'alimentazione da una singola sottostazione o da due sottostazioni in parallelo, si utilizzano i dati ottenuti dalle simulazioni riferite a tre differenti posizioni del tram per ogni zona. Per comodità di scrittura si definiscono i tre casi come segue.

- caso A: il tram è posizionato nel punto a impedenza maggiore rispetto alla SSE Cittadella per la zona 16, Raffaello per la zona 25 e Sebastopoli per la zona 28;
- caso B: il tram è posizionato nel punto a impedenza maggiore rispetto alla SSE Duca d'Aosta per tutte e 3 le zone;
- caso C: il tram è posizionato in un punto intermedio tra i due punti precedenti.

Nelle Figure 4.5, 4.6 e 4.7, si possono osservare i profili di tensione ottenuti nella zona 16 per i tre casi sopra elencati. Gli andamenti dei profili di tensione dei casi applicati alle zone 25 e 28 hanno le stesse caratteristiche di quelli riportati per la zona 16; per questo le osservazioni e le analisi fatte sui profili di tensione della zona 16 sono valide anche per le altre due zone.

In tutte e tre le figure sono presenti tre profili di tensione che si riferiscono a tre diverse configurazioni di alimentazione:

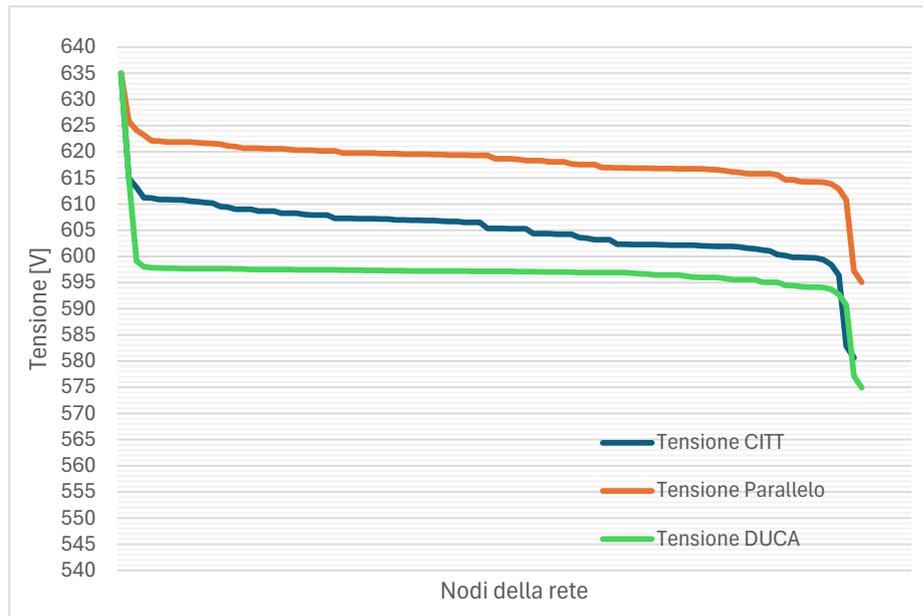


Figura 4.5: Profili di tensione per il caso A applicato alla zona 16

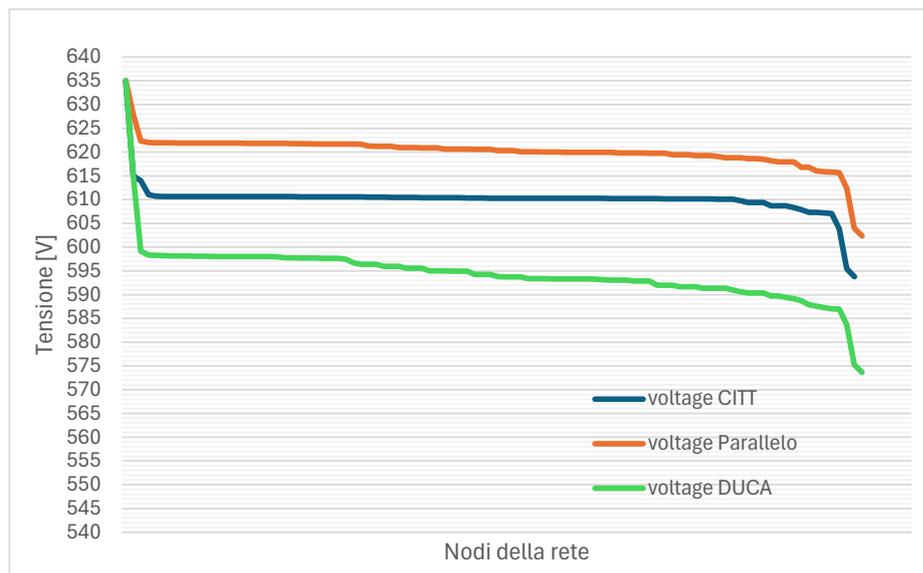
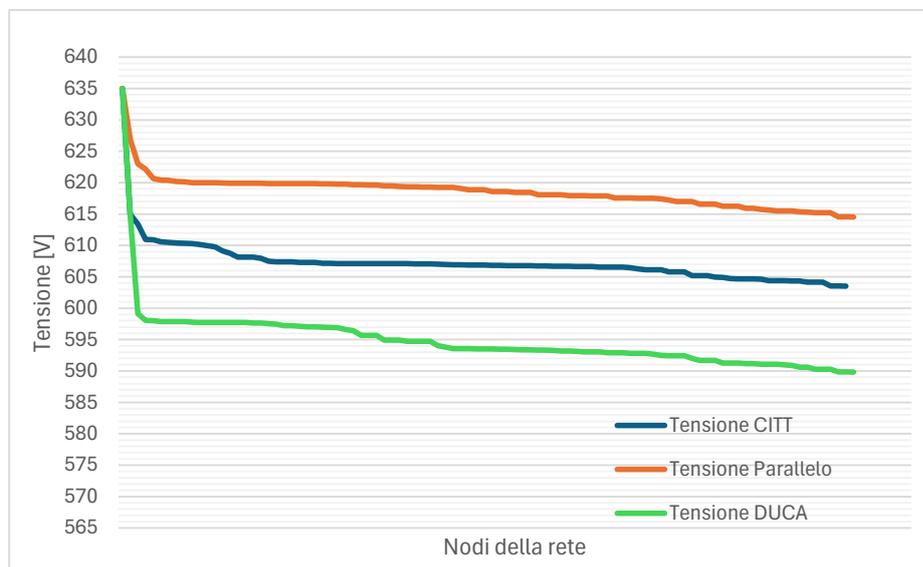


Figura 4.6: Profili di tensione per il caso B applicato alla zona 16



**Figura 4.7:** Profili di tensione per il caso C applicato alla zona 16

**Tabella 4.5:** Tensioni minime zona 16 nei tre casi analizzati

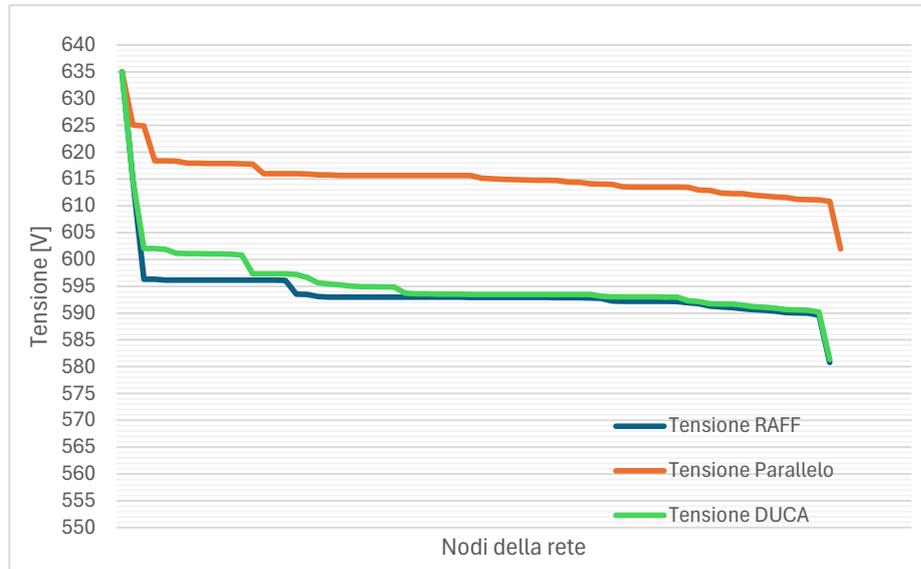
Alimentazione da ->	Tensione minima [V]		
	Cittadella	Duca d'Aosta	Parallelo
Caso A	580,63	574,92	595,07
Caso B	593,78	573,64	602,36
Caso C	603,52	589,82	614,53

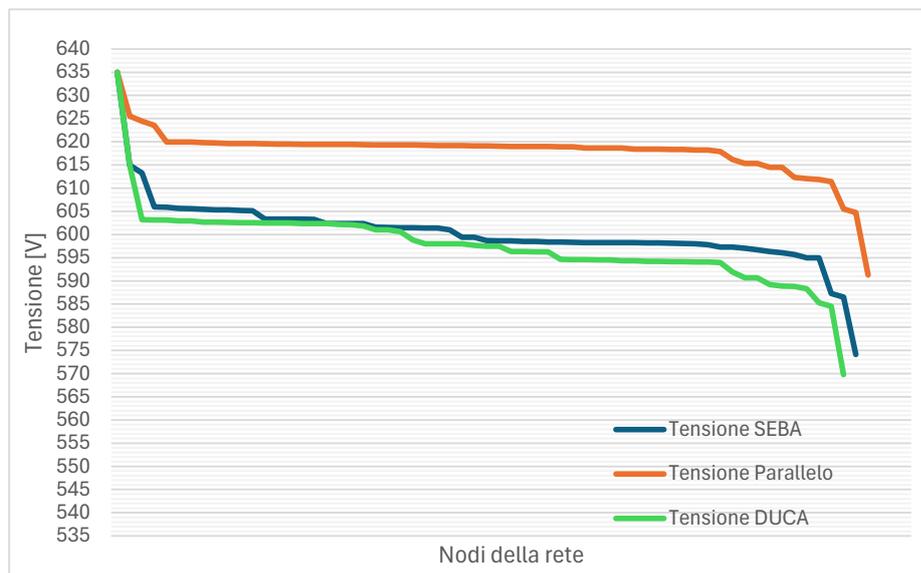
- in blu il profilo di tensione in caso di alimentazione dalla SSE Cittadella, che è quella elettricamente più lontana dal tram nel caso A;
- in verde il profilo di tensione in caso di alimentazione dalla SSE Duca d'Aosta, che è quella elettricamente più lontana dal tram nel caso B;
- in arancione il profilo di tensione in caso di alimentazione in parallelo di entrambe le sottostazioni.

Osservando i tre grafici, si può subito notare che il profilo ottenuto con l'alimentazione in parallelo riduce le cadute di tensione restituendo un profilo di tensione migliore. Questo risultato è in linea con i risultati ottenuti per il confronto delle perdite lungo la rete. Un profilo di tensione migliore, oltre a implicare minori perdite, implica una tensione maggiore al pantografo e quindi una migliore qualità dell'alimentazione. Nella Tabella 4.5 sono riportati i valori di tensione minima registrata nella zona 16 nei tre casi considerati per le tre diverse configurazioni di alimentazione, da cui si conferma quanto appena detto. Inoltre si può notare che la differenza di tensione, tra i casi con singola SSE e quelli con doppia alimentazione, ha valori compresi tra  $8,58V$  e  $28.72V$ . Le differenze sono più elevate con la SSE elettricamente più lontana e per i casi più lontani dalla SSE che alimenta.

Nelle Figure 4.5 e 4.6 si possono notare due tratti con elevata pendenza, uno nella parte iniziale e uno nella parte finale. Queste cadute di tensione particolarmente elevate nel tratto iniziale sono legate alla caduta di tensione sul gruppo di conversione sommata a quella nei primi cavi in uscita dalla sottostazione, percorsi da correnti elevate, mentre nel tratto finale sono legate alla caduta sul tratto finale della linea di contatto, che per il caso A e il caso B è a sbalzo. Il tratto pendente finale non è visibile invece nella Figura 4.7, perché il punto intermedio, che è stato scelto, si trova su un nodo della rete magliata, che, proprio grazie alla magliatura, riduce considerevolmente la caduta di tensione. Infatti, i valori di tensione minima per il caso C, riportati nella Tabella 4.5, sono maggiori di quelli degli altri casi.

La differenza di tensione tra le singole alimentazioni e l'alimentazione in parallelo è principalmente dovuta ai tratti iniziali del circuito, nei quali abbiamo una rilevante riduzione di corrente, quasi dimezzata per una SSE e più che dimezzata per l'altra. Anche le differenze tra l'alimentazione da Cittadella e quella da Duca d'Aosta sono





<b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS</b>			<b>RECTIFIER RA6455G</b>	
TYPE OF CONNECTION	n.8 tb.4 EN 50328		<b>CONVENTIONAL POWER</b>	<b>1500 KW</b>
NOMINAL VOLTAGE	V	750	<b>NOMINAL VOLTAGE</b>	<b>750 V</b>
IDEAL NO LOAD VOLTAGE	V	795	<b>STD.EN 50163</b>	
INSULATION TEST VOLTAGE	KV	8	<b>NOMINAL CURRENT</b>	<b>2500 A</b>
FREQUENCY	Hz	50/60		
NOMINAL CURRENT	A	2500		
OVERLOAD CURRENT 2h	A	3750		
OVERLOAD CURRENT 1min	A	5000		
SHORT CIRCUIT CURRENT 200msec	KA	20,5		
SHORT CIRCUIT PEAK CURRENT	KA	33		
DIODE TYPE		AR2004P24		
SINGLE DIODE $V_{rrm}$	V	2400		
MAX JUNCTION TEMPERATURE	°C	175		
NUMBER OF ARMS		6		
DIODES IN SERIES PER ARM		1		
DIODES IN PARALLEL PER ARM		4		
MAX CURRENT DIODES UNBALANCE	%	20		
TOTAL DIODES QUANTITY		24		
TYPE OF REDUNDANCY		1 DIODE REDUNDANT		
DIODE FAILURE MONITORING		AVAILABLE		
			<b>REFERENCE APPLICATION</b>	
			Energy traction supply for tramway line	

**Figura 4.10:** Dati relativi al convertitore usato per il gruppo di conversione

portata dei cavi e dalla posizione dei tram in assorbimento, che potrebbero saturare l'assorbimento da una SSE prima dell'altra.

In questa sezione non si valuta il primo punto, ma si considerano solo gli effetti e i limiti dell'aumento del traffico in una singola zona alimentata in parallelo. Valutando solo questo aspetto, non si tiene conto dell'aumento di potenza richiesta a una sottostazione nelle altre zone a cui è connessa, ma si considera l'interruttore extra-rapido come unico limite all'erogazione di corrente dalla SSE.

Nella Figura 4.10 sono riportati i dati forniti da InfraTo riguardo a un singolo convertitore all'interno delle sottostazioni; considerando queste informazioni, si può concludere che la corrente massima erogabile dal gruppo di conversione per un minuto è pari a  $10kA$ . Si conferma che il limite di  $4000A$  dell'interruttore extra-rapido è quello che terremo in considerazione per le nostre valutazioni. Si potrebbe quindi considerare il comportamento della rete per un massimo teorico di  $8000A$ , somma delle correnti massime delle due SSE, ma in realtà non è possibile raggiungere questo valore, a meno che ci si trovi nel perfetto baricentro elettrico della rete tra le due SSE. Infatti, in qualsiasi altro punto si richiederebbero  $4000A$  a una SSE, saturandone l'erogazione, prima dell'altra, ottenendo quindi un'erogazione di corrente minore di  $8000A$ . Per questo motivo è particolarmente interessante avere un'idea indicativa della corrente massima che si può effettivamente richiedere alle due sottostazioni.

### 4.2.1 Valutazioni sulla corrente massima erogabile dalle SSE in parallelo

Per ottenere un valore indicativo delle correnti massime che si possono effettivamente richiedere alle due sottostazioni in parallelo, si riproduce un caso di assorbimento distribuito all'interno della zona elettrica, inserendo un tram alla volta fino a saturare l'assorbimento di una SSE. Quando la prima delle due sottostazioni raggiunge i 4000A erogati, l'altra SSE erogherà meno corrente, ma non è possibile aggiungere altri tram per sfruttare al massimo la seconda SSE, perché altrimenti la prima supererebbe la soglia massima. Quindi, una volta saturata la prima SSE, o quasi, ci si trova nella condizione di assorbimento massimo.

All'interno della zona 16 sono stati inseriti sette tram, distanziati il più equamente possibile, per ottenere una distribuzione verosimile della potenza richiesta. Dopo alcune prove, con valori differenti di assorbimento, abbiamo ottenuto i valori riportati nella Tabella 4.6, per un caso di assorbimento con quattro tram da 1200A, uno da 1100A e uno da 800A. A fronte di uno sfruttamento quasi massimo della sottostazione Cittadella, alla sottostazione Duca d'Aosta è richiesto circa il 70% dei 4000A massimi erogabili. Per questo motivo, l'assorbimento massimo totale è risultato di 6700A, circa l'85% dell'assorbimento teorico massimo di 8000A limitato dagli interruttori extra-rapidi. Tramite lo stesso procedimento, si effettua una prova

**Tabella 4.6:** Assorbimento massimo per la zona 16 con SSE in parallelo

	CITT	DUCA	TOT
I [A]	3945,2	2754,8	6700
Sfruttamento %	98,63	68,87	83,75

simile nella zona 25, ma in questa zona, per raggiungere l'assorbimento massimo, sono stati inseriti cinque tram da 1200A e due da 800A, per un totale di 7600A. Si raggiunge un valore maggiore di corrente totale erogabile, perché la seconda sottostazione, Raffaello, è sfruttata al 90%. I risultati riportati nella Tabella 4.7 evidenziano quanto appena descritto, mostrando come l'assorbimento dalla SSE Raffaello sia molto vicino all'assorbimento massimo.

**Tabella 4.7:** Assorbimento massimo per la zona 25 con SSE in parallelo

	DUCA	RAFF	TOT
I [A]	3989,3	3610,7	7600
Sfruttamento %	99,73	90,27	95,00

Nella zona 28 l'assorbimento massimo, riscontrato dai risultati riportati nella Tabella 4.8, si riduce rispetto al caso della zona 25, ma rimane maggiore del caso della zona 16; infatti, alla seconda sottostazione viene richiesto circa l'80% della corrente massima.

**Tabella 4.8:** Assorbimento massimo per la zona 28 con SSE in parallelo

	SEB	DUCA	TOT
I [A]	3971,1	3228,9	7200
Sfruttamento %	99,28	80,72	90

Dai risultati ottenuti, si può sottolineare che l'assorbimento totale è più alto quando è ben bilanciato tra le due SSE. Quando le impedenze tra le due SSE e i carichi sono confrontabili, le correnti richieste dai carichi si spartiscono quasi equamente tra le due SSE, come accade per la zona 25. Mentre nella zona 16 l'impedenza tra la SSE Duca d'Aosta e i carichi è significativamente maggiore rispetto a quella verso la SSE Cittadella e per questo le correnti si spartiscono in quota maggiore verso quest'ultima SSE. Queste osservazioni sono in linea con quanto emerso nell'analisi dei profili di tensione nella sezione precedente di questo capitolo: infatti, per la zona 16 i profili di tensione, ottenuti alimentando prima con una SSE e poi con l'altra, presentano una differenza significativa, mentre per la zona 25 sono quasi sovrapponibili, come si può notare dalle Figure 4.7 e 4.8, che si riferiscono al caso C in cui il tram è posizionato in un punto centrale della zona interessata.

## 4.2.2 Cavi più sollecitati dall'aumento di traffico

L'aumento del traffico all'interno di una zona implica inevitabilmente una maggiore sollecitazione dei cavi. Per questo motivo è necessario valutare con attenzione quali rami della rete siano percorsi da valori particolarmente elevati di corrente rispetto alla condizione di traffico con alimentazione da singola SSE. Per effettuare questo confronto si utilizzano i risultati ottenuti nelle condizioni di massimo assorbimento appena analizzate.

Nella Tabella 4.9 si riportano i valori di corrente più elevati rilevati nella zona 16 nella condizione di aumento del traffico con assorbimento massimo dalle due sottostazioni, affiancati dall'*Entity Handle* che rappresenta il cavo e dal valore di sezione del cavo. Questi valori vengono confrontati con i valori di corrente più elevati presenti nella Tabella 4.10, ottenuti con la massima erogazione di corrente da una singola SSE.

Si riportano tabelle analoghe anche per la zona 25 e la zona 28: la Tabella 4.11 si riferisce alla condizione di aumento di traffico nella zona 25 e va confrontata con

**Tabella 4.9:** Cavi più sollecitati con aumento traffico, zona 16

<b>Aumento traffico in parallelo zona 16</b>			
Layer	EntityHandle	Corrente [A]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
CAVI_ALIMENTAZIONE	3A601	1964,8	500
LA_16	4630AC	1964,8	95
CAVI_POSITIVI	9ED8	1403,0	1000
CAVI_POSITIVI	6AF	1377,5	1000
CAVI_POSITIVI	6B0	1377,3	1000
CAVI_POSITIVI	9EEF	1354,9	1000
CAVI_POSITIVI	445AF9	1349,6	1000
CAVI_POSITIVI	445AF8	1348,4	1000
LA_16	4630CC	1341,2	95
LA_16	4630BB	1200,0	95

**Tabella 4.10:** Cavi più sollecitati alimentazione da SSE Cittadella, zona 16

<b>Alimentazione da singola SSE zona 16</b>			
Layer	EntityHandle	Corrente [A]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
CAVI_ALIMENTAZIONE	3A601	1532,6	500
LA_16	4630AC	1532,6	95
CAVI_POSITIVI	9ED8	1351,0	1000
CAVI_POSITIVI	2861	1344,3	500
CAVI_POSITIVI	9EB9	1344,3	1000
CAVI_POSITIVI	9EEF	1304,7	1000
LA_16	4630BB	1200,0	95
LA_16	4630D1	1200,0	95
LA_16	4630DC	1200,0	95
LA_16	4630CC	972,8	95

**Tabella 4.11:** Cavi più sollecitati con aumento traffico, zona 25

<b>Aumento traffico in parallelo zona 25</b>			
Layer	EntityHandle	Corrente [A]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
CAVI_POSITIVI	4B765D	3610,7	1000
CAVI_POSITIVI	4B751B	1994,7	1000
CAVI_POSITIVI	4B751C	1994,6	1000
CAVI_POSITIVI	4B756D	1753,9	1000
LA_25	4633EF	1487,8	95
CAVI_ALIMENTAZIONE	4B775C	1356,0	500
LA_25	463435	1200,0	95
LA_25	4B790D	1200,0	95
LA_25	46340B	1200,0	95
LA_25	46343F	1177,5	95

**Tabella 4.12:** Cavi più sollecitati alimentazione da SSE Duca d'Aosta, zona 25

<b>Alimentazione da singola SSE zona 25</b>			
Layer	EntityHandle	Corrente [A]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
CAVI_POSITIVI	4B751B	2000,1	1000
CAVI_POSITIVI	4B751C	1999,9	1000
CAVI_POSITIVI	4B756D	1667,7	1000
CAVI_POSITIVI	4B756C	1298,4	1000
LA_25	46340B	1200,0	95
CAVI_POSITIVI	4B770F	1078,1	1000
CAVI_POSITIVI	4B75BA	1058,5	1000
LA_25	46345A	1055,8	95
LA_25	46345B	970,8	95
CAVI_ALIMENTAZIONE	4B7767	970,7	1000

la Tabella 4.12, mentre la Tabella 4.13 riporta i valori più elevati di corrente nel caso di aumento di traffico nella zona 28 e va confrontata con la Tabella 4.14. Confrontando i valori ottenuti con la massima erogazione dalle due sottostazioni con quelli ottenuti con la massima erogazione da una singola sottostazione, si possono evidenziare variazioni diverse per cavi positivi e per cavi di alimentazione e linea aerea di contatto.

- Cavi positivi: aumentando il traffico, non subiscono grandi variazioni di corrente, perché sono i cavi più vicini alle singole SSE e quindi sono meno condizionati dalle correnti erogate dall'altra SSE. Si noti che il cavo 4B765D nella zona 25 è il cavo in uscita dalla SSE Raffaello, che avrebbe questo valore

**Tabella 4.13:** Cavi più sollecitati con aumento traffico, zona 28

<b>Aumento traffico in parallelo zona 28</b>			
Layer	EntityHandle	Corrente [A]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
CAVI_ALIMENTAZIONE	4454A7	2913,3	240
CAVI_POSITIVI	511	2153,2	1000
LA_28	4634FD	1789,3	95
CAVI_POSITIVI	17D1	1543,8	1000
CAVI_POSITIVI	DC7	1542,6	1000
LA_28	4634CE	1200,0	95
LA_28	4634E0	1200,0	95
CAVI_ALIMENTAZIONE	11B2B8	1190,8	500
LA_28	4634FE	1123,9	95
CAVI_POSITIVI	44550A	1098,7	500

**Tabella 4.14:** Cavi più sollecitati alimentazione da SSE Sebastopoli, zona 28

<b>Alimentazione da singola SSE zona 28</b>			
Layer	EntityHandle	Corrente [A]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
CAVI_POSITIVI	17D1	1555,1	1000
CAVI_POSITIVI	DC7	1553,8	1000
CAVI_ALIMENTAZIONE	4454A7	1520,9	240
LA_28	4634	1200,0	95
CAVI_POSITIVI	17DE	996,3	1000
CAVI_POSITIVI	E7A	984,4	1000
CAVI_ALIMENTAZIONE	11B2B8	947,6	500
LA_28	4634FD	933,7	95
CAVI_POSITIVI	DBB	891,1	500
CAVI_POSITIVI	4B7A55	891,1	500

di corrente anche nel caso di erogazione da singola SSE.

- Cavi di alimentazione e linea aerea di contatto: con l'aumento del traffico le correnti che percorrono questi rami possono subire variazioni importanti a causa della sovrapposizione degli effetti delle due SSE.

Siccome i cavi positivi subiscono variazioni lievi e la linea di contatto è un conduttore nudo che non sollecita il materiale isolante, componente che patisce di più le sovratemperature, i cavi per i quali risulta particolarmente interessante valutare gli effetti dell'aumento del traffico sono i cavi di alimentazione. Nel caso di aumento del traffico si consiglia un intervento sul cavo 4454A7 nella zona 28 per aumentarne la portata, visto che si tratta di un cavo attraversato da valori di corrente molto elevati con una sezione di  $240\text{mm}^2$ . Per valutare se la sezione degli altri cavi di alimentazione sia adatta, si analizza il transitorio termico di due cavi, presi come esempi rappresentativi per tutti gli altri. I cavi analizzati sono il cavo di alimentazione 3A601 nella zona 16 e il cavo di alimentazione 4454A7 nella zona 28, considerando però una sezione di  $500\text{mm}^2$ .

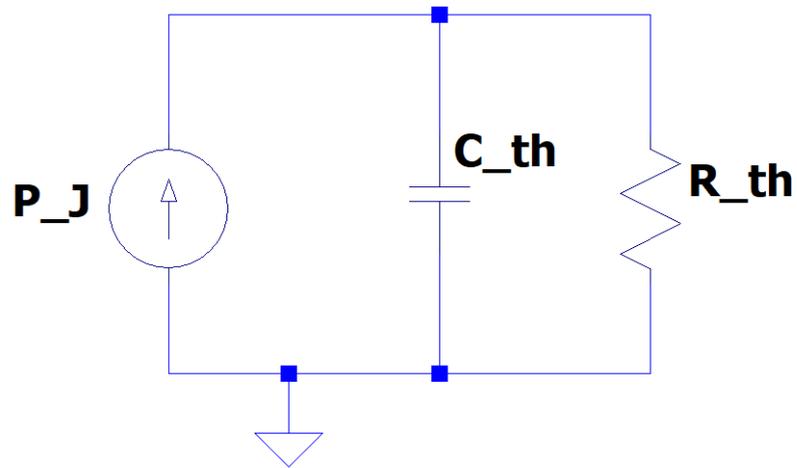
Siccome gli assorbimenti dei tram non sono costanti, ma presentano un profilo di assorbimento molto variabile, non si può considerare la portata fornita dal costruttore come limite massimo per la corrente nel cavo. Se valutassimo esclusivamente la portata, dovremmo sovradimensionare le sezioni dei cavi in modo inaccettabile. Inoltre, è difficile far rientrare i profili di assorbimento in quelli ciclici standard proposti nelle norme CEI EN 50343 [10] e CEI 20-42 [11] e per questo risulta necessario calcolare il transitorio termico dei cavi sottoposti alle correnti del caso specifico considerato. In questo modo possiamo valutare se la sovratemperatura dei cavi superi o meno i valori accettabili riportati dal costruttore.

Per questi calcoli dobbiamo innanzitutto definire i parametri del modello termico del cavo, rappresentato tramite l'analogia con il mondo elettrico su LT-spice, come riportato in Figura 4.11, in cui  $P_J$  rappresenta le perdite Joule del cavo,  $C_{th}$  la capacità termica del conduttore in rame e  $R_{th}$  la resistenza termica tra il cavo e l'ambiente. In questo circuito equivalente la corrente rappresenta il flusso di calore, mentre la tensione ai capi del parallelo tra capacità e resistenza rappresenta la differenza di temperatura tra il conduttore e l'ambiente.

I parametri di questo circuito vengono calcolati a partire dalle informazioni fornite da ARISTONCAVI nella scheda tecnica del cavo RG7H1E-1,8/3kV [12]. I dati di nostro interesse sono le caratteristiche elettriche del cavo abbinate ai valori di temperatura ammissibile, riportati nella Tabella 4.15.

Partendo dal valore di temperatura massima accettata per il cavo da  $500\text{mm}^2$   $\theta_{maz,c} = 83.1\text{ }^\circ\text{C}$  e considerando la temperatura ambiente  $\theta_a$  pari a  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , possiamo ricavare la variazione di temperatura ammissibile per il conduttore, come descritto nell'equazione 4.10.

$$\Delta\theta_c = \theta_{maz,c} - \theta_a \quad (4.10)$$



**Figura 4.11:** Modello termico semplificato del cavo

**Tabella 4.15:** Caratteristiche elettriche cavi RG7H1E-1,8/3kV

Sezione nominale	Resistenza elettrica	Portata di corrente	Temperatura sulla superficie del cavo
$[mm^2]$	$[ohm/km]$	$[A]$	$[^{\circ}C]$
500	0.0366	879	83,1
1000	0.0177	1265	83,6

Da questa equazione ricaviamo un valore di  $\Delta\theta_c$  pari a  $53^\circ\text{C}$ . Dopo aver ottenuto questo valore, per calcolare la resistenza termica equivalente per il cavo per unità di lunghezza, è necessario calcolare le perdite Joule del cavo nelle condizioni di portata continuativa massima del cavo tramite l'equazione 4.11, in cui il valore di resistenza elettrica è quello riportato nella Tabella 4.15 ed è approssimato costante al variare della temperatura. In questo modo otteniamo un valore di  $P_J$  pari a  $28.28\text{W}/\text{m}$ .

$$P_J = R \cdot I^2 \quad (4.11)$$

Conoscendo i valori di  $\Delta\theta_c$  e  $P_J$ , possiamo ora calcolare la resistenza termica equivalente per unità di lunghezza  $R_{th}$  come riportato nell'equazione 4.12, da cui ricaviamo un valore pari a  $1,87\frac{\text{K}}{\text{W}}\text{m}$ .

$$R_{th} = \frac{\Delta\theta_c}{P_J} \quad (4.12)$$

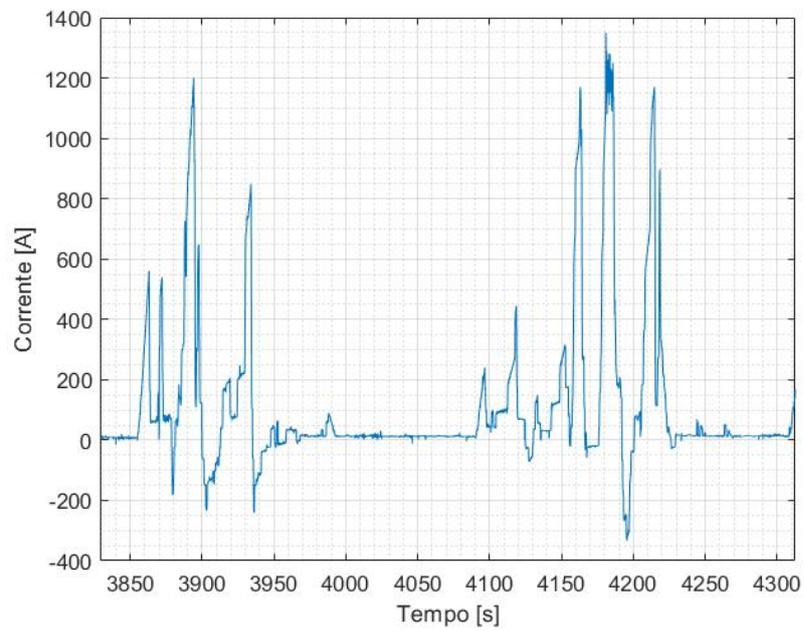
Per completare il calcolo dei parametri per il modello termico equivalente, è necessario calcolare la capacità termica per unità di lunghezza,  $C_{th}$ , del conduttore, senza considerare quella del materiale isolante, visto che è sufficiente che il conduttore superi la temperatura ammissibile per rovinare il materiale isolante circostante. Come per la resistenza termica, consideriamo un cavo lungo  $1\text{m}$  anche per il calcolo della capacità termica, che si può calcolare moltiplicando il valore del calore specifico del rame,  $c_{cu}$ , pari a  $380\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ , per la massa del conduttore,  $m_c$ . Per il calcolo della massa si considera il conduttore con sezione  $500\text{mm}^2$  e lungo  $1\text{m}$ , ottenendo un valore pari a  $4,48\text{kg}$ . Dal calcolo mostrato nell'equazione 4.13 otteniamo un valore di  $C_{th}$  pari a  $1702,4\frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{m}}$ .

$$C_{th} = c_{cu} \cdot m_c \quad (4.13)$$

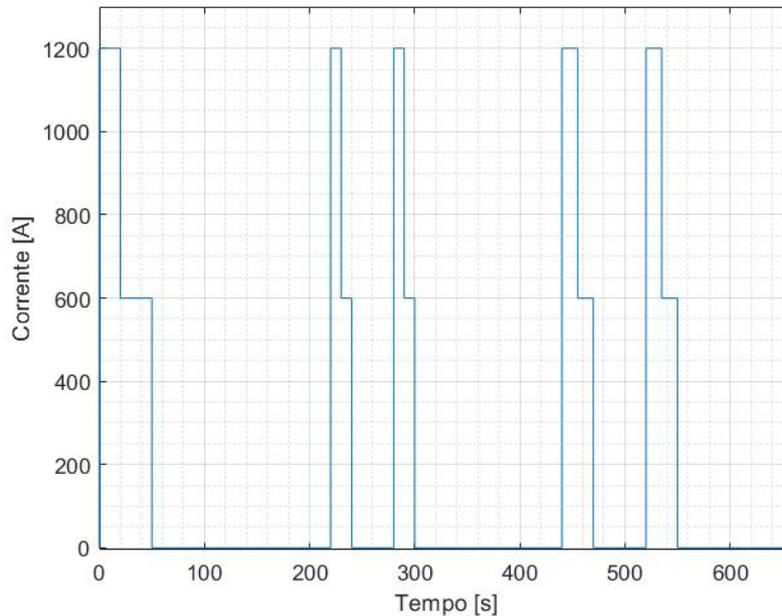
Dopo aver calcolato i parametri del modello termico, dobbiamo definire l'andamento delle perdite che scaldano il cavo. Per fare ciò vengono fatte alcune semplificazioni cautelative e quindi a favore della sicurezza. Si considera il caso peggiore e quindi si ipotizza che tutti i tram all'interno della zona siano sincronizzati e si approssima l'assorbimento dei tram come un susseguirsi di tre fasi: accelerazione, coasting e fase di rallentamento senza frenata rigenerativa, perché la rete non è ricettiva se i tram sono sincronizzati.

L'andamento delle perdite dipende dall'andamento delle correnti, che definiamo a partire da un profilo di corrente ottenuto da misure reali per una motrice serie 6000, di cui si riporta una porzione nella Figura 4.12.

Un andamento di questo tipo è difficile da valutare per il calcolo del transitorio termico dei cavi sotto analisi, quindi si preferisce definire un profilo equivalente, ma rappresentativo dell'andamento delle perdite reali. Il profilo che viene definito è



**Figura 4.12:** Andamento delle correnti assorbite dalla motrice serie 6000



**Figura 4.13:** Andamento equivalente della corrente assorbita dai tram

composto da tratti di accelerazione massima seguiti da un breve tratto di coasting e una fase più o meno lunga di decelerazione e fermata.

A partire dalle misure reali si ricrea un profilo che consideri il traffico cittadino e quindi composto da accelerazioni prolungate per la ripartenza da fermate o semafori e accelerazioni più brevi in caso di rallentamenti dovuti semplicemente al traffico. Considerando queste semplificazioni e mantenendo un assorbimento maggiore di quello del profilo reale, per un calcolo cautelativo, si ottiene il profilo di corrente riportato nella Figura 4.13, che si ripete ciclicamente per i nostri calcoli. Da questo andamento delle correnti, si ottiene un profilo di perdite come quello riportato nella Figura 4.14. Si osservi che i valori assoluti di questi profili dipendono dal cavo considerato e quindi dal valore massimo di corrente da cui è attraversato. Per calcolare il transitorio termico di un cavo sollecitato da perdite con questo andamento, si crea un circuito equivalente su LT-spice in cui si sfrutta l'analogia con il mondo elettrico.

Il circuito equivalente è come quello riportato in Figura 4.15 in cui si utilizzano cinque diversi generatori di corrente, che rappresentano le perdite, con impulsi ciclici per ricreare il profilo desiderato. Dopo aver completato la costruzione del modello termico, è possibile effettuare le simulazioni per i cavi di alimentazione percorsi da correnti maggiori nella zona 16 e 28.

Per la zona 16 si valuta il cavo di alimentazione 3A601, percorso da una corrente

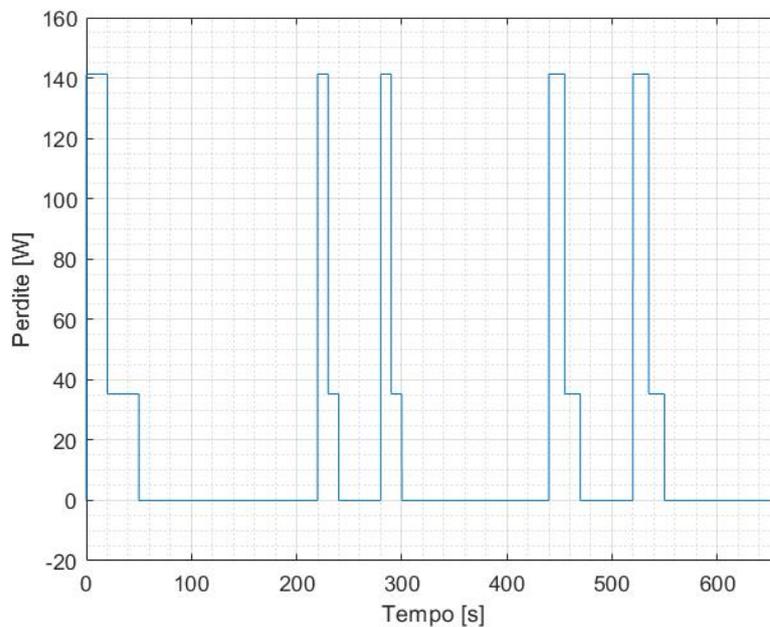


Figura 4.14: Andamento equivalente delle perdite nei cavi considerati

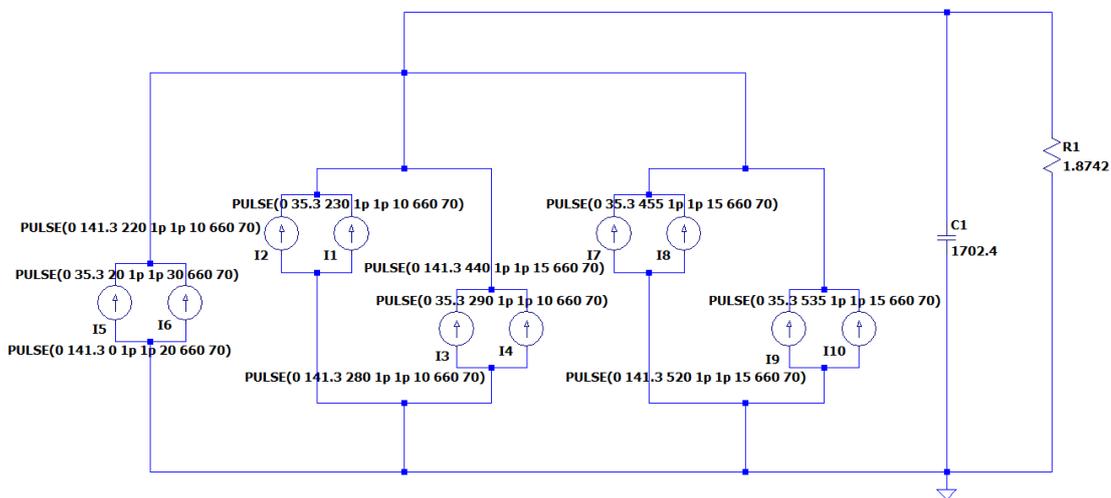
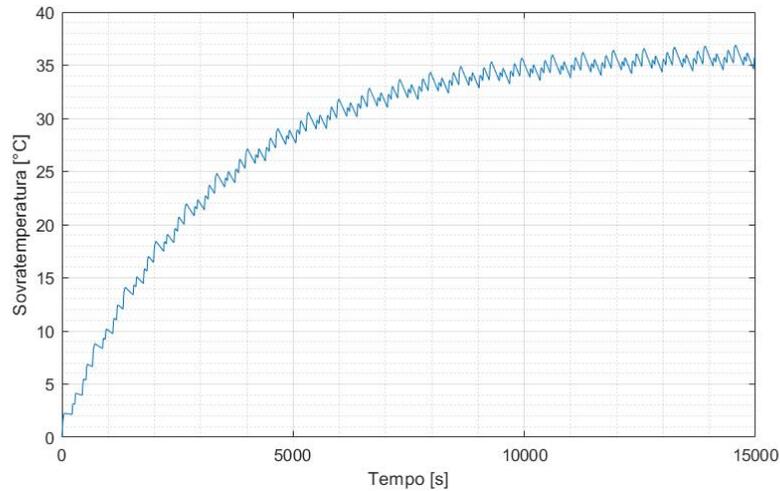


Figura 4.15: Circuito equivalente del modello termico cavo

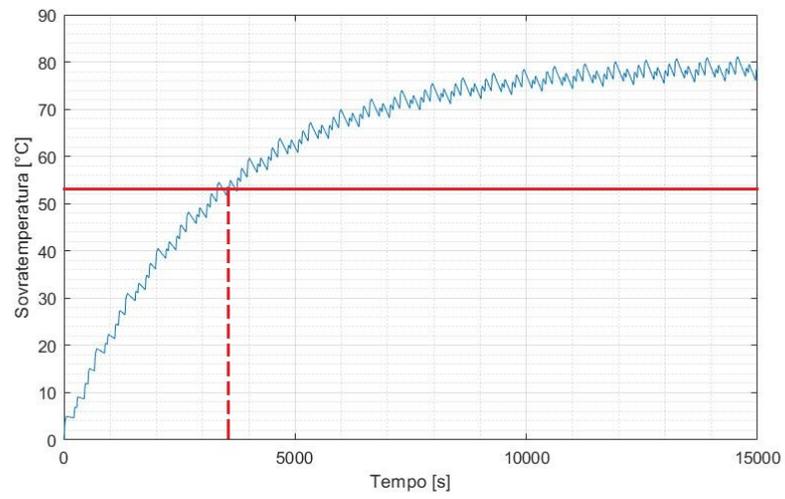


**Figura 4.16:** Transitorio sovratemperatura cavo 3A601, zona 16

massima di 1964,8A, a cui corrisponde una potenza dissipata di 141,3W. Nella fase di coasting si considera una corrente corrispondente alla metà di quella massima, a cui corrisponde una potenza dissipata di 35,3W. Applicando questi valori al profilo di perdite trattato in precedenza, che utilizziamo come input per il calcolo del transitorio termico per il cavo, otteniamo i risultati riportati nella Figura 4.16. Analizzando i risultati si può sottolineare come questi valori di corrente siano accettabili, perché il valore di sovratemperatura non supera il valore massimo ammissibile pari a 53 °C.

Seguendo la stessa procedura, si calcola il transitorio termico per il cavo di alimentazione 4454A7 nella zona 28. In questo caso la corrente massima che transita nel conduttore ha un valore pari a 2913A, a cui corrispondono 310,6W di potenza dissipata. Dimezzando la corrente in fase di coasting, si ottengono 77,6W di corrispondente potenza dissipata dal cavo. Questa condizione provoca una sollecitazione termica maggiore per il cavo: infatti, dal transitorio termico riportato nella Figura 4.17, si può notare che la sovratemperatura supera il valore massimo ammissibile pari a 53 °C. Il cavo raggiunge la sovratemperatura massima dopo circa 3300 secondi, che equivalgono a 55 minuti.

Questo non implica con certezza che la sezione del cavo non sia adatta all'aumento di corrente dovuto all'aumento del traffico, perché la condizione analizzata porta a una valutazione conservativa. È altamente improbabile che tutti i tram presenti nella zona accelerino in contemporanea e ancora più improbabile è che lo facciano per 55 minuti consecutivi, che corrispondono alla ripetizione di circa 15 cicli di accelerazione-coasting-fermata. In ambito tranviario, il particolare tipo di assorbimento ed erogazione di corrente complica questo tipo di calcoli teorici, ma



**Figura 4.17:** Transitorio sovratemperatura cavo 4454A7, zona 28

**Tabella 4.16:** Tabella dei valori di corrente di cortocircuito per la Zona 16

Zona 16	$I_{guasto}$ [kA]	$I_{CITT}$ [kA]	$I_{DUCA}$ [kA]	$I_{cc,min,max}$ [kA]
Icc_min_CITT (16)	19,082	10,333	8,749	10,333
Icc_min 3 (16)	20,343	10,914	9,429	10,914
Icc_min 1 (16)	24,334	13,015	11,319	13,015
Icc_min_DUCA (16)	23,345	15,096	8,249	15,096
Icc_min 7 (16)	24,929	16,027	8,902	16,027
Icc_min 4 (16)	29,263	16,729	12,534	16,729
Icc_min 5 (16)	29,219	16,795	12,424	16,795
Icc_min 2 (16)	31,423	18,669	12,754	18,669
Icc_min 6 (16)	32,441	21,069	11,372	21,069

questi risultati permettono di individuare i cavi per i quali si reputa necessario un monitoraggio più attento nel caso di un aumento delle correnti erogate su una singola zona.

### 4.3 Corrente minima di cortocircuito

La corrente minima di cortocircuito,  $I_{cc,min}$ , è un parametro di grande importanza per valutare la sicurezza elettrica del sistema. Un'elevata corrente di cortocircuito implica una più facile distinzione tra le correnti di guasto e le correnti di elevati assorbimenti in normale funzionamento. Per la taratura dei relè DIA-IGTv le correnti di guasto più difficili da rilevare sono quelle con valore minore, che si instaurano in caso di guasto nei punti della rete che hanno impedenza maggiore rispetto alla SSE che alimenta la zona. Connettendo una seconda SSE alla zona, in parallelo alla SSE principale, il punto di guasto con  $I_{cc,min}$  può cambiare e sicuramente cambiano i valori della corrente nel punto di guasto e di quella erogata dalle sottostazioni.

Il software TTN-simulator permette di localizzare il punto con  $I_{cc,min}$  rispetto a una singola SSE, ma non calcola questo punto in caso di alimentazione in parallelo, quindi la ricerca viene effettuata manualmente e non in modo automatico. Per fare ciò, per ogni zona si inserisce un guasto nei punti di  $I_{cc,min}$  per le singole sottostazioni e poi in altri punti significativi lungo la rete. I guasti vengono simulati singolarmente, con le zone alimentate da due SSE in parallelo e si confrontano i valori di corrente che si ottengono. Questo confronto è riportato nella Tabella 4.16 per la zona 16, nella Tabella 4.17 per la zona 25 e nella Tabella 4.18 per la zona 28.

In tutte e tre le tabelle, nella prima colonna i guasti sono identificati con lo stesso nome utilizzato sul software TTN-simulator, con un maggiore dettaglio

**Tabella 4.17:** Tabella dei valori di corrente di cortocircuito per la Zona 25

Zona 25	$I_{guasto}$ [kA]	$I_{RAFF}$ [kA]	$I_{DUCA}$ [kA]	$I_{cc,min,max}$ [kA]
Icc_min_DUCA (25)	14,953	8,002	6,951	8,002
Icc_min_RAFF (25)	16,62	6,77	9,85	9,85
Icc_min 1 (25)	20,751	10,724	10,027	10,724
Icc_min 2 (25)	21,888	10,87	11,018	11,018
Icc_min 5 (25)	19,973	8,49	11,483	11,483
Icc_min 3 (25)	24,325	12,01	12,315	12,315
Icc_min 6 (25)	22,104	8,77	13,334	13,334
Icc_min 4 (25)	26,749	12,953	13,796	13,796

**Tabella 4.18:** Tabella dei valori di corrente di cortocircuito per la Zona 28

Zona 28	$I_{guasto}$ [kA]	$I_{SEB}$ [kA]	$I_{DUCA}$ [kA]	$I_{cc,min,max}$ [kA]
Icc_min_SEB (28)	12,506	5,207	7,299	7,299
Icc_min_DUCA (28)	14,514	8,987	5,527	8,987
Icc_min 2 (28)	18,119	8,712	9,407	9,407
Icc_min 6 (28)	16,352	8,819	9,533	9,533
Icc_min 1 (28)	18,641	10,743	7,898	10,743
Icc_min 4 (28)	20,799	11,103	9,696	11,103
Icc_min 5 (28)	27,041	14,151	13,25	14,151
Icc_min 3 (28)	30,519	17,913	12,606	17,913

**Tabella 4.19:** Riduzione di  $I_{cc,min}$  per alimentazione in parallelo

		$I_{cc,min}$ [kA] alim. singola	$I_{cc,min}$ [kA] in parallelo
Zona 16	CITT	14,01	10,33
	DUCA	12,65	8,75
Zona 17	RAFF	11,04	8,01
	DUCA	10,18	6,95
Zona 18	SEB	8,74	5,21
	DUCA	10,26	7,29

per i due punti in cui si verificava la corrente di cortocircuito minima per le singole alimentazioni. Nelle colonne successive invece sono riportati i valori delle correnti nel punto di guasto, in uscita dalla prima SSE e in uscita dalla seconda. Nell'ultima colonna si evidenzia il valore maggiore di  $I_{cc,min}$  tra quelli delle due SSE; questo valore è quello che ci interessa di più, perché, in caso di interblocco tra gli interruttori, è il valore di riferimento come  $I_{cc,min}$  per la taratura del relè DIA-IGTv. Si può notare che nelle tabelle i guasti sono posti in ordine crescente per il valore di corrente di guasto e per il valore di  $I_{cc,min}$  nella SSE principale. Questo confronto ci permette di individuare il punto con  $I_{cc,min}$  per alimentazione in parallelo, che in tutti e tre i casi coincide con il punto di  $I_{cc,min}$  rispetto a una delle due SSE. Questo non implica che per tutte le zone otterremmo questo risultato, ma generalmente i punti di  $I_{cc,min}$  si trovano agli estremi di tratti di linea di contatto a sbalzo, che rappresentano un'elevata quota della resistenza equivalente della rete; quindi è probabile che il punto che stiamo cercando si trovi in corrispondenza di uno dei primi due.

Dopo aver ottenuto il valore di  $I_{cc,min}$  nelle sottostazioni per alimentazione in parallelo, calcoliamo la  $I_{cc,min}$  per l'alimentazione con singola SSE. Per un confronto immediato dei valori si fa riferimento alla Tabella 4.19, in cui si può notare che le correnti erogate dalle SSE in presenza di guasto si riducono nel caso di alimentazione in parallelo. La corrente di guasto complessiva aumenta, ma nelle sottostazioni i relè rivelano valori di corrente di guasto minori e questo implica una condizione peggiorativa per la sicurezza elettrica, di cui si deve tenere conto nella gestione delle protezioni contro i guasti sulla rete. Senza interblocco tra gli interruttori delle due SSE, la situazione sarebbe estremamente peggiorativa e quindi questo evidenzia la necessità di comunicazione tra i due interruttori. Infatti, grazie all'interblocco tra i due interruttori, basterebbe l'intervento di un relè per comandare l'apertura di entrambi gli interruttori extrarapidi.

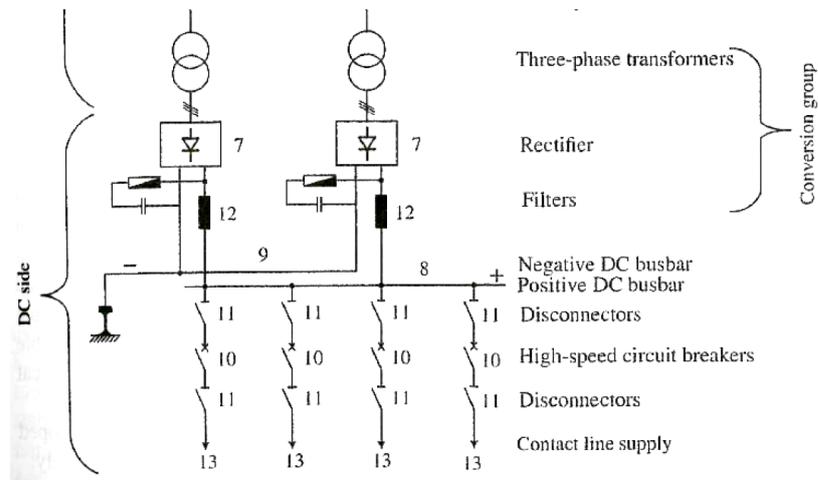


Figura 4.18: Esempio sbarra comune a valle del gruppo di conversione [8]

## 4.4 Recupero energia in frenata

Nel caso di alimentazione in parallelo di più zone elettriche, le SSE coinvolte si troverebbero connesse a più zone rispetto al caso di alimentazione con singola SSE. In questo modo si aumenta la ricettività della rete, perché, aumentando le zone connesse, aumenta anche la probabilità che ci sia assorbimento nella rete mentre un tram sta frenando. In caso di frenata di un tram, se questo immette corrente nella rete, si ha un aumento di tensione al pantografo, ma questo aumento non è accettabile nel caso di rete non ricettiva e quindi una quota di energia viene dissipata nei reostati. Se, invece, altri tram stanno assorbendo corrente mentre uno frena, l'aumento di tensione è ridotto a valori accettabili e l'energia della frenata viene recuperata immettendola nella rete.

Per valutare questo vantaggio tramite l'utilizzo del software TTN-simulator, si pone un tram in frenata in una zona e si effettua la frenata senza la presenza di altri tram in accelerazione e in seguito si effettua la stessa simulazione con un tram in accelerazione in una zona diversa dalla prima, ma interconnessa tramite una SSE in comune. La connessione tra le due zone è possibile grazie alla sbarra comune a valle del gruppo di conversione, come si può apprezzare nella Figura 4.18.

Effettuando questa simulazione sul software, si ottiene in entrambi i casi lo stesso valore di tensione al pantografo. Analizzando meglio i dati, si nota che il software restituisce due valori distinti di tensione in uscita dalla SSE comune. Questo significa che il software non modella correttamente la sbarra in uscita dal convertitore, da cui si derivano le partenze per le diverse zone, ma attivare lo *switch* di una zona equivale a inserire un generatore di tensione con resistenza in serie distinto per ogni zona che è alimentata dalla SSE. Tutti i risultati ottenuti

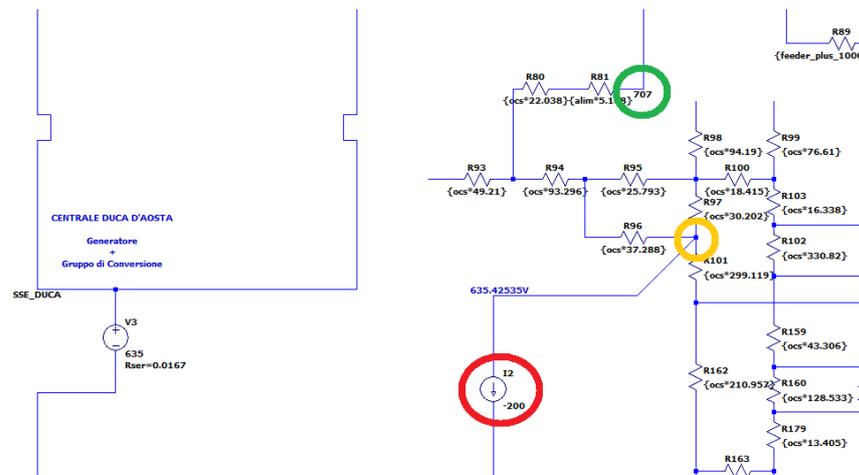


Figura 4.19: Posizione tram in frenata su LT-spice, zona 25

in precedenza non perdono di validità, ma allo stato attuale del software non è possibile effettuare simulazioni su più zone interconnesse tramite una SSE in comune.

Per conferma, si effettua la simulazione descritta in questa sezione nel circuito equivalente su LT-spice, ponendo una motrice in frenata che inietta 200A nella rete della zona 25, nei pressi dell'incrocio tra Via Paolo Sacchi e Corso Stati Uniti, e una motrice che assorbe 800A nella zona 16, nei pressi dell'incrocio tra Via dell'Arsenale e Corso Giacomo Matteotti. I punti in cui sono inseriti i tram nel circuito equivalente sono riportati nelle Figure 4.19 e 4.20, in cui la motrice è cerchiata in rosso, il nodo in verde e la botola elettricamente più vicina in giallo. Simuliamo alimentando la zona 25 in parallelo con SSE Duca d'Aosta e Raffaello, ma con l'interruttore della SSE Duca aperto verso la zona 16. Da questa simulazione otteniamo un valore di tensione al pantografo del tram in frenata pari a 639,72V, ma questo valore non è corretto, perché il generatore ideale di tensione si comporta come un convertitore bidirezionale, mentre il gruppo di conversione nelle SSE non lo è. Se chiudiamo l'interruttore verso la zona 16, la tensione al pantografo scende a 635,42V. Questo risultato evidenzia il trasferimento di energia dal tram in frenata a quello in accelerazione, ma non permette un confronto realistico delle tensioni nei due casi. Questo caso da solo non è significativo, ma conferma l'errore presente sul software TTN-simulator e porta un esempio di riduzione di tensione al pantografo di un tram in caso di rete ricettiva. Questa è una condizione che si verifica già nella condizione attuale della rete, perché una sottostazione alimenta più zone, ma, in caso di connessione in parallelo delle zone elettriche, le stesse sottostazioni sarebbero connesse a un maggior numero di zone, aumentando la possibilità di scambio di energia tra tram in frenata e tram in accelerazione.

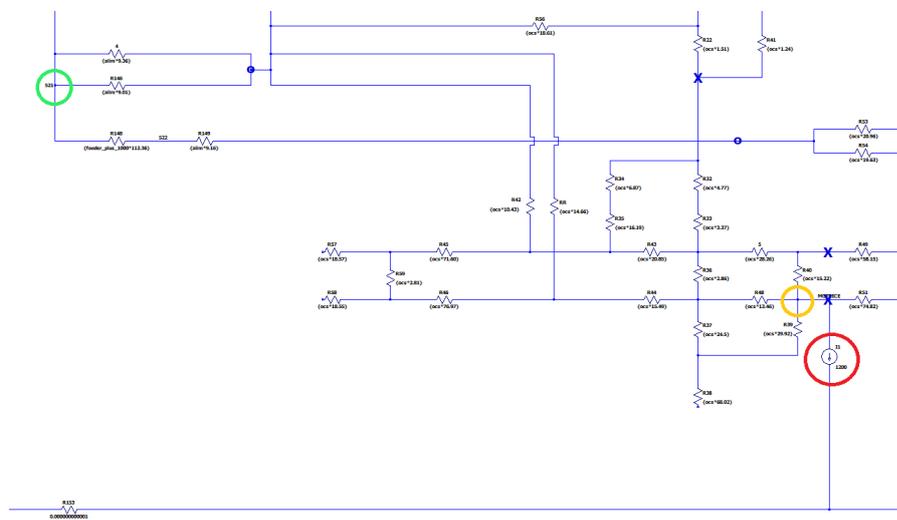


Figura 4.20: Posizione del tram in assorbimento su LT-spice, zona 16

## Capitolo 5

# Confronto di tensioni e perdite per un caso di traffico reale

Uno scenario di traffico reale permetterebbe di ottenere risultati più significativi. In particolare, nel confronto tra i due tipi di alimentazione, si valutano il miglioramento del profilo di tensione e la riduzione delle perdite per tre scenari di traffico reale per ogni zona aggiornata. Si considerano tre scenari ravvicinati nel tempo durante un orario caratterizzato da traffico intenso. In questo modo, oltre alle tensioni e alle perdite nei singoli istanti, si può valutare indicativamente il loro andamento nel tempo. I dati sul traffico tranviario sono stati raccolti grazie al portale *mato*, *Muoversi a Torino*, un servizio che permette di visualizzare in tempo reale tutti i mezzi di trasporto nella città di Torino [13].

In questo capitolo si riportano prima le scelte fatte per ricreare scenari di traffico reale su TTN-simulator, a partire dai dati sul traffico tranviario, e successivamente i risultati ottenuti per i profili di tensione e le perdite nelle diverse condizioni operative considerate.

### 5.1 Elaborazione dei dati sul traffico tranviario

I dati sul traffico tranviario considerati si riferiscono a febbraio 2024, nello specifico si analizzano quelli dell'8 febbraio 2024. Per poter valutare istanti di tempo con il numero maggiore possibile di tram in una stessa zona elettrica, si deve prendere come riferimento un orario trafficato. In questo caso specifico, gli istanti di tempo considerati sono compresi tra le 8:25 e le 8:40 del mattino di giovedì 8 febbraio

2024. Il file, che si ottiene esportando i dati da *mato*, contiene cinque informazioni di nostro interesse per ogni posizione nel tempo:

- un codice identificativo per la linea a cui appartiene il veicolo;
- la latitudine a cui si trova il veicolo;
- la longitudine, che completa l'informazione delle coordinate;
- un codice identificativo specifico per ogni veicolo, che fornisce anche informazioni sul tipo di motrice: serie 2800, 5000 o 6000;
- l'istante in cui è stata registrata la posizione, nel formato *aaaa-mm-gg hh:mm:ss*.

Gli istanti, in cui vengono registrate le posizioni dei diversi tram, non sono sincronizzati e per questo non è possibile conoscere esattamente la posizione di ogni tram allo stesso istante di tempo. Una volta scelto l'istante da valutare, è possibile conoscere con esattezza la posizione di un solo tram, mentre per definire quelle degli altri veicoli si definisce una posizione intermedia tra due istanti di tempo attorno a quello considerato.

I dati esportati da *mato*, riportati in un file *.xlsx*, contengono informazioni sulla posizione di tutti i tram presenti nella rete torinese con un tempo di campionamento medio di 2 minuti. Questo significa che in una giornata sono raccolte moltissime informazioni, che devono essere filtrate per poter arrivare a definire la posizione dei tram nelle zone e negli istanti di tempo di nostro interesse.

- Innanzitutto è stato selezionato un arco temporale di circa 20 minuti attorno alle 8:30.
- Successivamente, per considerare solo i tram nelle zone di interesse, sono stati definiti un massimo e un minimo per latitudine e longitudine per ogni zona. Questi limiti relativi alle coordinate devono essere leggermente più ampi di quelli effettivi della zona per poter valutare meglio lo spostamento dei veicoli che si trovano agli estremi delle zone negli istanti di tempo considerati.
- Infine, l'arco temporale è stato ridotto per limitare i dati a quelli strettamente necessari.

Questo procedimento è stato seguito per ogni zona, ottenendo un file *excel* con un numero limitato di veicoli e istanti di tempo. Per poter valutare visivamente le posizioni dei veicoli contenute in questo file, si è utilizzato lo strumento My Maps [14] di Google Maps. Importando su My Maps il file excel, contenente latitudine e longitudine di ogni punto, si visualizzano tutte le posizioni dei tram sulla mappa. Se il file contiene altre informazioni per ogni punto, è possibile scegliere una di queste informazioni per nominare la posizione e le altre informazioni, come l'orario,

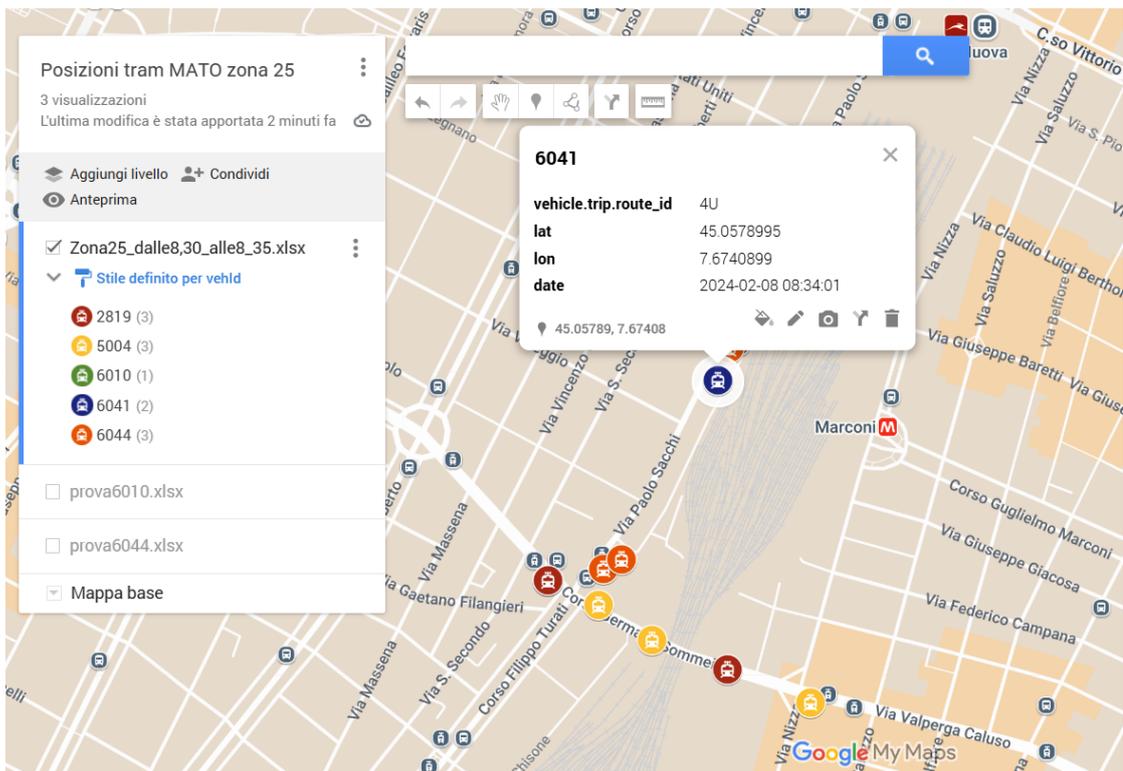
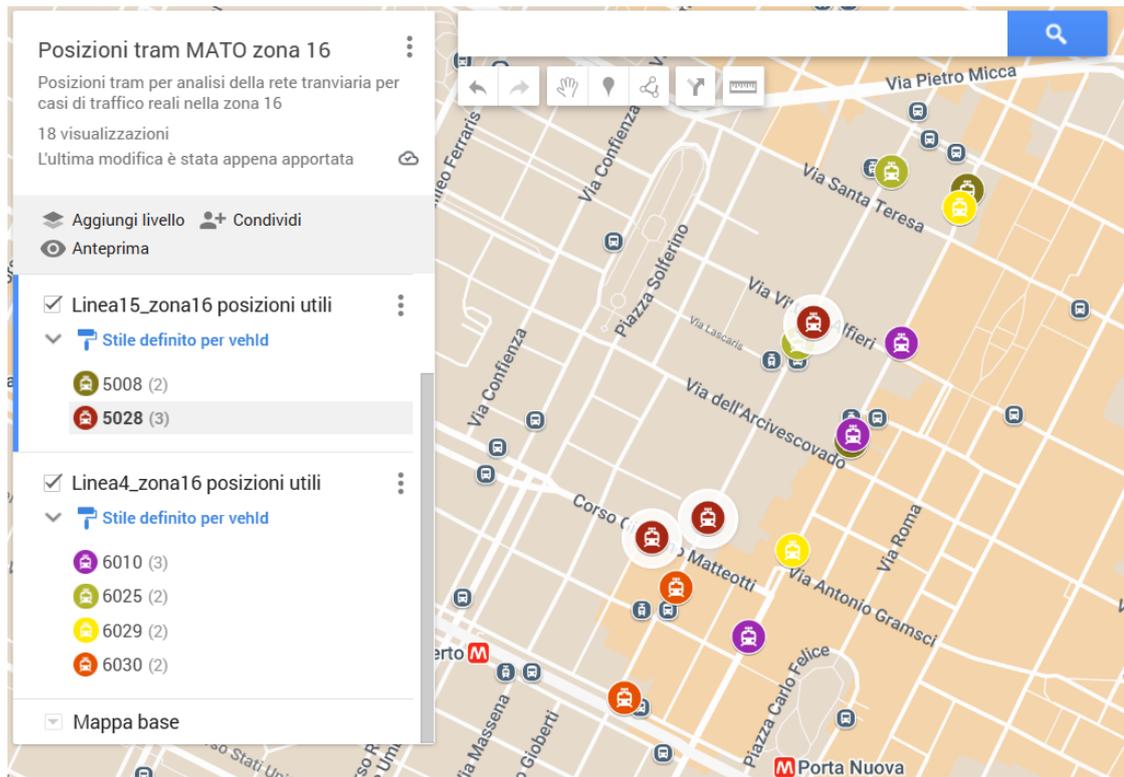


Figura 5.1: Visualizzazione delle posizioni dei tram su My Maps



**Figura 5.2:** Posizioni dei tram per il traffico reale nella zona 16

appaiono quando si seleziona una posizione specifica, come si può osservare nella Figura 5.1.

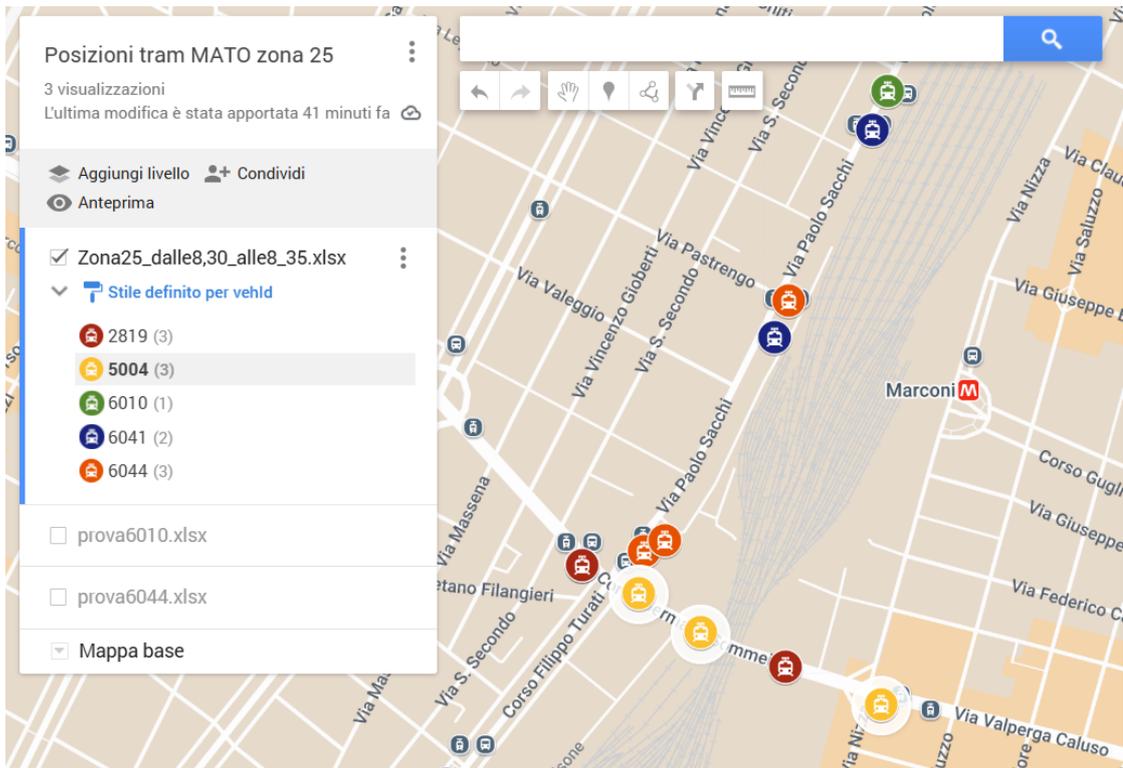
I tre istanti di tempo considerati per ogni zona, sono stati scelti selezionando un veicolo che si trovasse nella zona per tre istanti di tempo consecutivi. In questo modo si conosce la posizione esatta di un tram in questi 3 istanti. Le posizioni degli altri tram si definiscono a partire dalle posizioni esatte nell'istante precedente e in quello successivo.

Per la zona 16 è stato preso come riferimento il veicolo 5028 della linea 15 nei seguenti istanti di tempo:

- 08/02/2024 08:35:36
- 08/02/2024 08:36:35
- 08/02/2024 08:37:34

Nella figura 5.2 si possono vedere le posizioni esatte del veicolo 5028 e le posizioni degli altri tram utili per definire i punti esatti.

Per la zona 25 è stato preso come riferimento il veicolo 5004 della linea 16 CD nei seguenti istanti di tempo:



**Figura 5.3:** Posizioni dei tram per il traffico reale nella zona 25

- 08/02/2024 08:31:57
- 08/02/2024 08:32:48
- 08/02/2024 08:33:48

Nella figura 5.3 si possono vedere le posizioni esatte del veicolo 5004 e le posizioni degli altri tram utili per definire i punti esatti.

Per la zona 28 è stato preso come riferimento il veicolo 6044 della linea 4 nei seguenti istanti di tempo:

- 08/02/2024 08:27:47
- 08/02/2024 08:28:41
- 08/02/2024 08:30:41

Nella figura 5.4 si possono vedere le posizioni esatte del veicolo 6044 e le posizioni degli altri tram utili per definire i punti esatti.

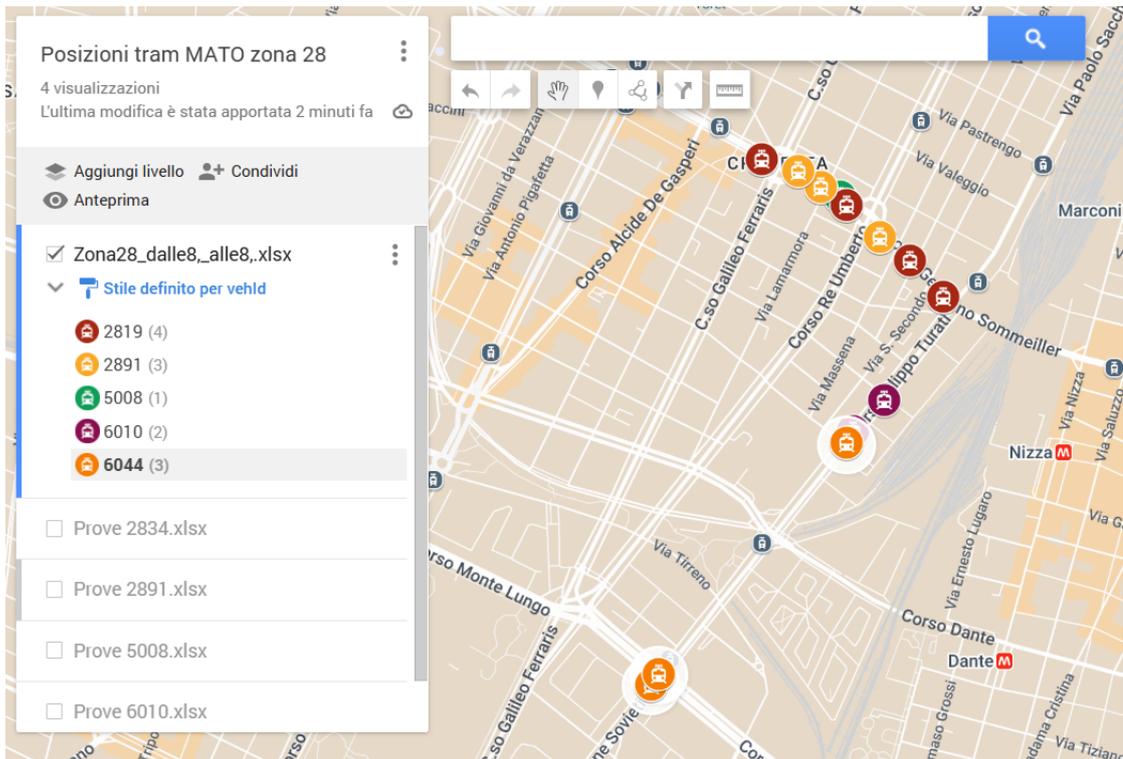


Figura 5.4: Posizioni dei tram per il traffico reale nella zona 28

## 5.2 Assorbimento dei tram in base a posizione e serie

Una volta definita la posizione dei tram, si procede inserendoli nella mappa del software TTN-simulator. Per fare ciò non è sufficiente conoscere la posizione del tram, ma è necessario impostare la corrente assorbita. Questa viene definita in base al tipo di motrice e alla posizione del tram, che ne caratterizza lo stato. Infatti, per i nostri calcoli, un tram può trovarsi in quattro diverse condizioni.

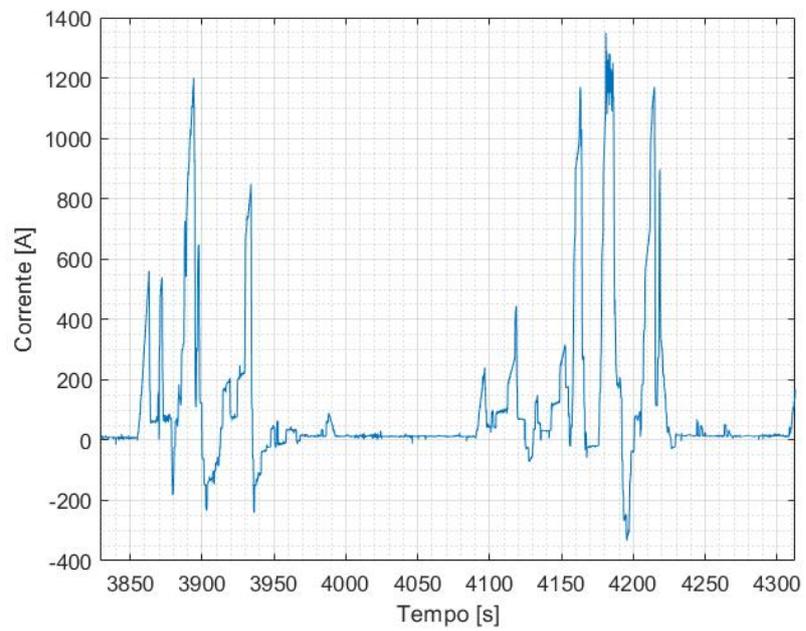
- Un tram sta accelerando se si trova poco dopo una fermata o un semaforo o nei pochi tratti in salita presenti nella città.
- Un tram è in fase di coasting se si trova in tratti rettilinei e sufficientemente distante da semafori o fermate o se il semaforo è ipotizzato verde.
- Un tram sta frenando se si trova poco prima di un semaforo o di una fermata o nei pochi tratti in discesa presenti nella città.
- Infine un tram può essere anche fermo e quindi può avere assorbimento praticamente nullo se si trova esattamente in corrispondenza di fermate o semafori.

Si evidenzia che la maggior parte delle posizioni è stata definita a partire da due punti vicini nel tempo. La distanza tra questi punti, sia nel tempo che nello spazio, ci permette di ipotizzare se un tram si è dovuto fermare o meno a un semaforo. Per questo, in alcune circostanze, si è ipotizzato che un tram fosse in fase di coasting anche nei pressi di un semaforo, se questo era probabilmente verde.

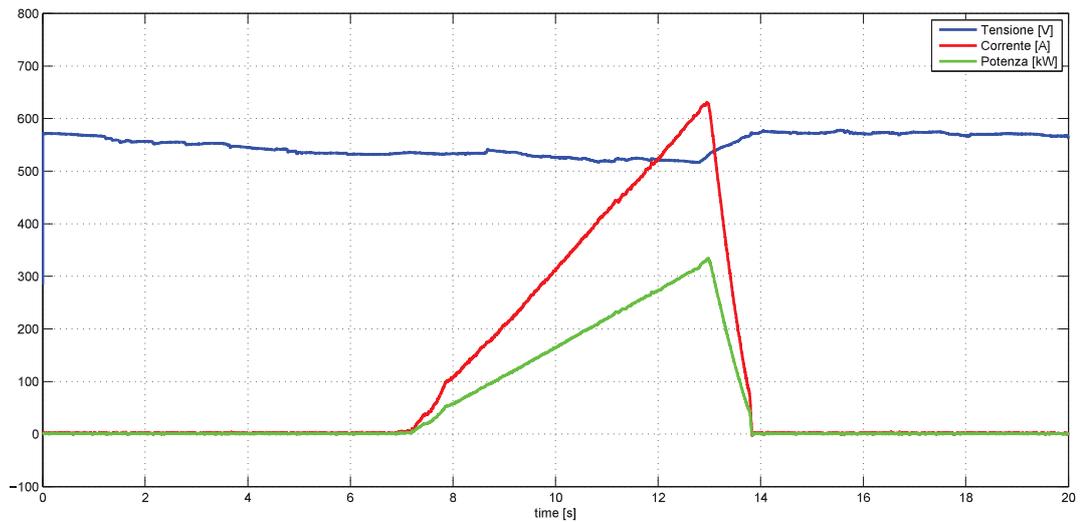
In fase di accelerazione, coasting o frenata la corrente assorbita o erogata varia in base al tipo di motrice e quindi alla serie. Per definire i valori di corrente utilizzati per le simulazioni sono state prese come riferimento alcune misure effettuate su motrici dello stesso tipo di quelle considerate.

Per le motrici serie 6000 si prende come riferimento il profilo di corrente riportato nella Figura 5.5. Per le simulazioni effettuate sul software TTN-simulator sono necessarie alcune semplificazioni.

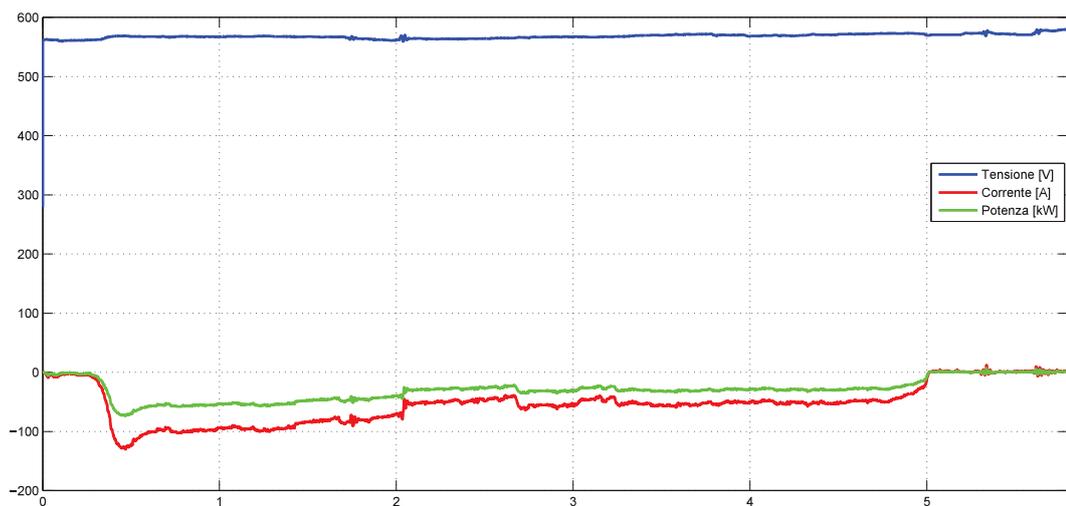
- Per la corrente in fase di accelerazione si sceglie un valore prossimo al picco massimo registrato durante le prove sperimentali, pari a  $1200A$  per la serie 6000.
- In fase di coasting l'assorbimento risulta a impulsi variabili, ma per comodità si è scelto un valore di corrente pari alla metà di quello di picco, ovvero  $600A$ .
- Infine, per la corrente di frenata, si è scelto un valore prossimo al picco negativo registrato, pari a  $-200A$ .



**Figura 5.5:** Profilo della corrente assorbita da una motrice serie 6000



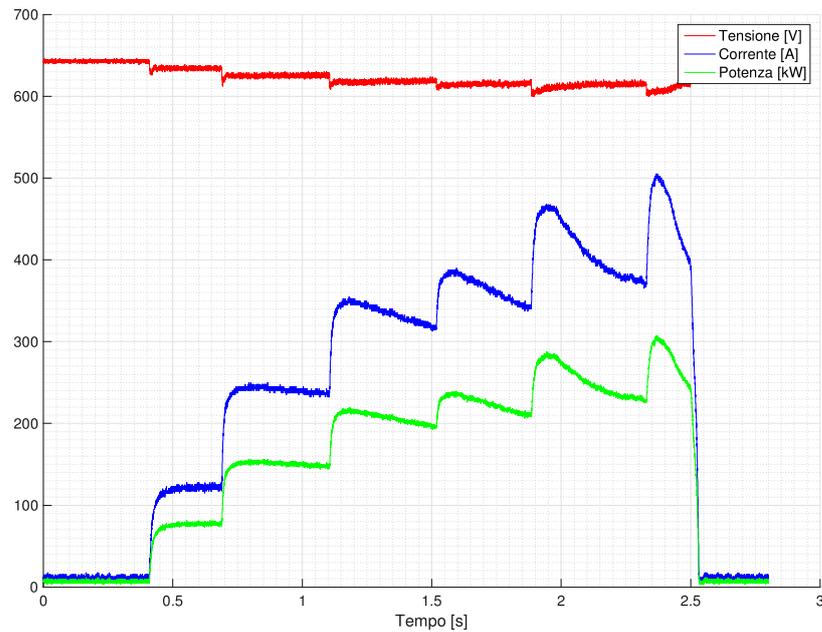
**Figura 5.6:** Corrente di una motrice serie 5000 in accelerazione [15]



**Figura 5.7:** Corrente di una motrice serie 5000 in recupero [15]

Per le motrici serie 5000 si considerano separatamente due prove: una in fase di accelerazione, Figura 5.6, e una in fase di recupero, Figura 5.7. Per definire i valori di corrente assorbita da una motrice serie 5000, si applicano le stesse approssimazioni utilizzate per la serie 6000. In questo modo si definisce una corrente di 650A in fase di accelerazione e di 300A in fase di coasting. Durante la frenata rigenerativa si utilizza un valore pari a  $-100A$ .

Infine, per le motrici serie 2800, si prende come riferimento il risultato della



**Figura 5.8:** Corrente di una motrice serie 2800 in accelerazione [16]

**Tabella 5.1:** Correnti utilizzate nelle simulazioni per ogni tipo di motrice

Serie	Accelerazione	Coasting	Frenata
6000	1200 A	600 A	-200 A
5000	650 A	300 A	-100 A
2800	500 A	250 A	0 A

prova riportato nella Figura 5.8, ma solo per definire i valori di corrente in fase di accelerazione e coasting, rispettivamente pari a 500A e 250A. La frenata delle motrici serie 2800 non è rigenerativa e quindi non viene iniettata corrente nella rete, ma viene dissipata nei reostati a bordo del veicolo.

Nella Tabella 5.1 si riassumono i valori di corrente utilizzati nelle simulazioni per le diverse serie di motrici.

### 5.3 Perdite e profilo di tensione per casi di traffico reale

Dopo aver inserito i tram nelle zone interessate e dopo averne definito gli assorbimenti per i diversi scenari di traffico reale, si può procedere alla simulazione.

**Tabella 5.2:** Confronto delle perdite per la zona 16

Alimentazione	Perdite [kW]		
	Perdite rete	Perdite $R_s$	Perdite tot
Cittadella	71,49	155,35	226,84
Parallelo	63,87	81,33	145,20
Differenza	7,62	74,02	81,65

Per ogni zona si valutano tre scenari di traffico successivi nel tempo e per ogni scenario si effettua una simulazione con alimentazione dalla sottostazione principale e con alimentazione in parallelo. Per ogni zona si riportano solo i risultati dello scenario più significativo, ovvero quello con traffico maggiore.

- Per la zona 16, il caso più significativo comprende due tram serie 6000 e un tram serie 5000 in accelerazione e un tram serie 5000 fermo.
- Per la zona 25 si riportano i risultati ottenuti da uno scenario che comprende un tram serie 6000 e uno serie 2800 in accelerazione, a cui si aggiungono un tram serie 6000 e uno serie 5000 in frenata.
- Infine, per la zona 28 lo scenario più significativo include una motrice serie 6000 e una serie 2800 in accelerazione, una serie 6000 in coasting e una serie 2800 in frenata.

### 5.3.1 Confronto delle perdite nella rete

Il procedimento usato per il calcolo delle perdite è lo stesso esposto nel capitolo 4. Quindi, per ottenere il valore totale delle perdite, si sommano le perdite Joule di ogni singolo ramo a quelle dovute alla resistenza in serie al generatore ideale di tensione, che rappresenta le perdite del gruppo di conversione.

Nella Tabella 5.2 si riportano i risultati ottenuti calcolando le perdite nella zona 16 per lo scenario di traffico più significativo. La tabella contiene il valore delle perdite totali, ma anche quello della quota dovuta alla rete e di quella dovuta alla resistenza in serie. Nella tabella si riporta anche la differenza tra le perdite in caso di alimentazione dalla sola sottostazione principale e quelle in caso di alimentazione in parallelo da due sottostazioni. Nelle Tabelle 5.3 e 5.4 si riportano gli stessi risultati rispettivamente per la zona 25 e per la zona 28 per gli scenari di traffico più significativi.

Come per i casi semplificati, questi risultati mostrano che in caso di alimentazione in parallelo le perdite si riducono anche considerando condizioni di traffico reale. La differenza tra le perdite rappresenta la potenza risparmiata grazie alla configurazione della rete alimentata da due SSE in parallelo. Questo risparmio è particolarmente

**Tabella 5.3:** Confronto delle perdite per la zona 25

Alimentazione	Perdite [kW]		
	Perdite rete	Perdite $R_s$	Perdite tot
Duca d'Aosta	49,45	32,73	82,18
Parallelo	31,61	16,37	47,98
Differenza	17,84	16,36	34,21

**Tabella 5.4:** Confronto delle perdite per la zona 28

Alimentazione	Perdite [kW]		
	Perdite rete	Perdite $R_s$	Perdite tot
Duca d'Aosta	109,67	88,34	198,01
Parallelo	51,29	44,59	95,88
Differenza	58,38	43,75	102,13

**Tabella 5.5:** Confronto del rendimento tra la condizione di alimentazione da una sola SSE e da due SSE in parallelo in condizioni di traffico reale

Zona	Rendimento		
	Singola SSE	SSE in parallelo	Differenza
16	88%	93%	4%
25	91%	95%	4%
28	86%	93%	7%

evidente per la zona 28, in cui la configurazione in parallelo riduce di molto le perdite sulla rete oltre a quelle sulle resistenze in serie ai generatori. In questo caso il valore delle perdite si riduce del 51%, mentre per il caso in cui la variazione delle perdite è meno significativa si ha una riduzione del 36%, che è comunque una differenza rilevante. Per la zona 28 è particolarmente significativa anche la variazione di rendimento tra alimentazione con singola SSE e SSE in parallelo, come si può notare dalla Tabella 5.5, in cui sono riportati i rendimenti calcolati nelle tre zone per i casi più significativi.

Con questi risultati si sottolinea nuovamente quanto l'alimentazione in parallelo di una zona elettrica permetterebbe di ridurre le perdite nella rete tranviaria e nel gruppo di conversione.

### 5.3.2 Confronto dei profili di tensione

Per analizzare i profili di tensione in condizioni di traffico reale, si riportano i risultati degli stessi scenari valutati per il confronto delle perdite. Il confronto riguarda il profilo di tensione ottenuto con alimentazione dalla sola sottostazione principale e quello ottenuto alimentando la zona elettrica con due sottostazioni in parallelo.

Nelle Figure 5.9, 5.10 e 5.11, sono riportati i profili di tensione rispettivamente della zona 16, 25 e 28.

In questi tre grafici si possono evidenziare alcune caratteristiche comuni.

- Si evidenzia un tratto con pendenza elevata nella parte iniziale dei grafici, che rappresenta la caduta di tensione sulla resistenza in serie e sui primi cavi positivi percorsi da elevate correnti.
- Si può notare un altro tratto a pendenza elevata nella parte finale, dovuto alla caduta di tensione sugli ultimi tratti di linea aerea nei pressi delle motrici in accelerazione. Questi tratti sono caratterizzati da elevate correnti e sezioni ridotte.



Figura 5.9: Profili di tensione per traffico reale nella zona 16

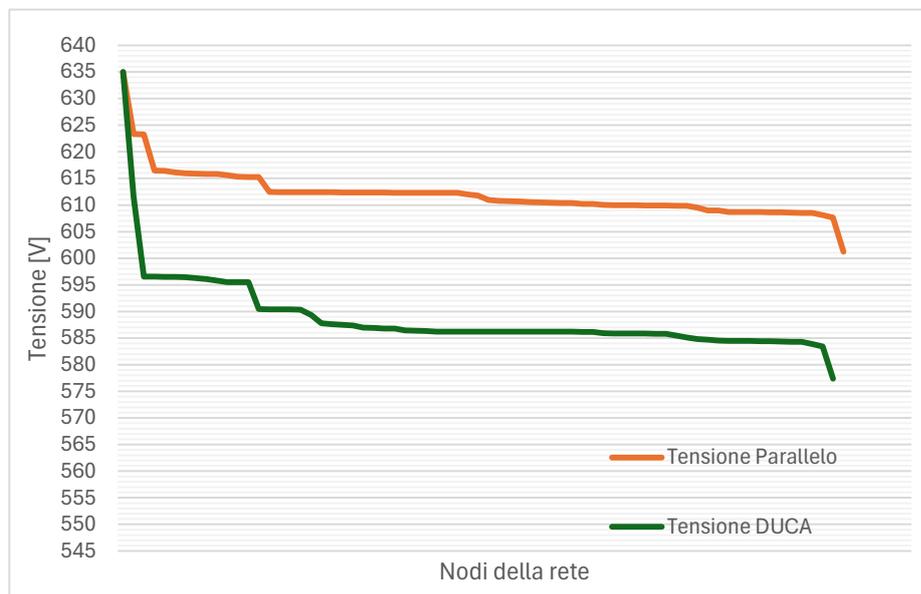
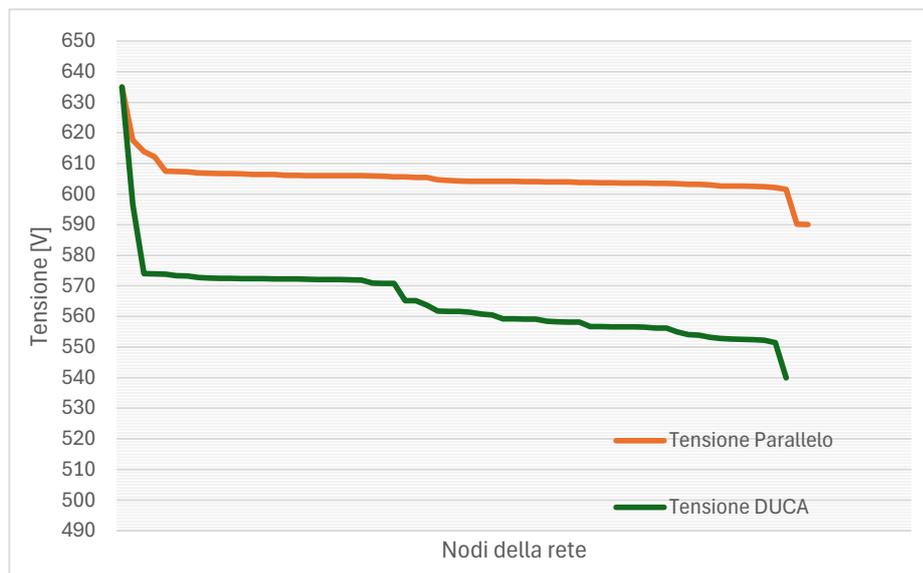


Figura 5.10: Profili di tensione per traffico reale nella zona 25



**Figura 5.11:** Profili di tensione per traffico reale nella zona 28

**Tabella 5.6:** Tensioni minime zona per condizioni di traffico reali

	<b>Tensione minima [V]</b>		
	Singola SSE	SSE in parallelo	Differenza
Zona 16	556,42	584,90	28,48
Zona 25	577,38	601,23	24,85
Zona 28	539,94	590,06	50,12

- La considerazione principale è che anche per casi di traffico reale il profilo di tensione è sensibilmente migliore grazie all'alimentazione in parallelo con una seconda sottostazione.

Confrontando i profili di tensione con alimentazione in parallelo e quelli con alimentazione singola, i differenti valori sono dovuti principalmente alle diverse cadute di tensione nei tratti iniziali della rete. In questi tratti l'effetto della partizione delle correnti tra le due SSE è più evidente: la resistenza in serie al generatore e i primi cavi in uscita dalle SSE sono percorsi da circa la metà della corrente in caso di alimentazione in parallelo.

Si osserva però che nella zona 28 i due profili di tensione si discostano anche in un tratto successivo. Questo è in linea con i risultati ottenuti in precedenza nel confronto delle perdite: infatti per la zona 28 la configurazione in parallelo riduce maggiormente le perdite e nei circuiti resistivi le cadute di tensione sono rappresentative anche delle perdite. Questa differenza tra i due profili si evidenzia anche nel confronto tra le tensioni minime registrate e riportate nella Tabella 5.6. L'analisi dei risultati, ottenuti per condizioni di traffico reali, permette di sottolineare nuovamente che l'alimentazione di una singola zona con due SSE in parallelo implica l'aumento delle tensioni nei nodi della rete, che equivale a un miglioramento della qualità dell'alimentazione delle motrici.

## Capitolo 6

# Telecomunicazione fra interruttori extrarapidi

L'alimentazione di una zona elettrica con due SSE in parallelo richiede di fare alcune considerazioni per la sicurezza del sistema e delle persone. In particolare è importante valutare il comportamento degli interruttori extrarapidi, presenti nel lato BT delle SSE, in caso di guasto sia nella fase di apertura sia in quella di richiusura.

Per comprendere al meglio le criticità riguardo l'intervento degli interruttori extrarapidi in caso di guasto, che causa una corrente di cortocircuito con impedenza molto bassa o quasi nulla tra linea di contatto e rotaie, si deve prima capire il funzionamento dei relè connessi agli interruttori. Questi dispositivi non possono utilizzare strumenti di tipo differenziale visto che il percorso delle correnti di guasto è lo stesso di quelle normalmente assorbite dai carichi. Nel sistema tranviario le correnti di guasto possono non essere molto diverse da quelle di normale funzionamento, visti gli assorbimenti elevati dei tram, e ancora meno diverse dalle correnti che si instaurano durante il cambio zona di un tram. Per questo è necessario utilizzare dei relè in grado di intervenire al meglio per le correnti di guasto, distinguendole da quelle dovute a assorbimenti elevati, migliorando l'affidabilità e la continuità del sistema. Sarebbe inaccettabile interrompere l'alimentazione di una zona per ogni assorbimento elevato di corrente dovuto a cambi di zona o a partenze contemporanee di più tram, ma questo significa avere meno margine tra la curva di corrente di sicuro intervento e quella di sicuro non intervento del relè, che quindi non considera solo la corrente di picco come parametro per l'intervento, ma anche la variazione transitoria e la derivata di corrente.

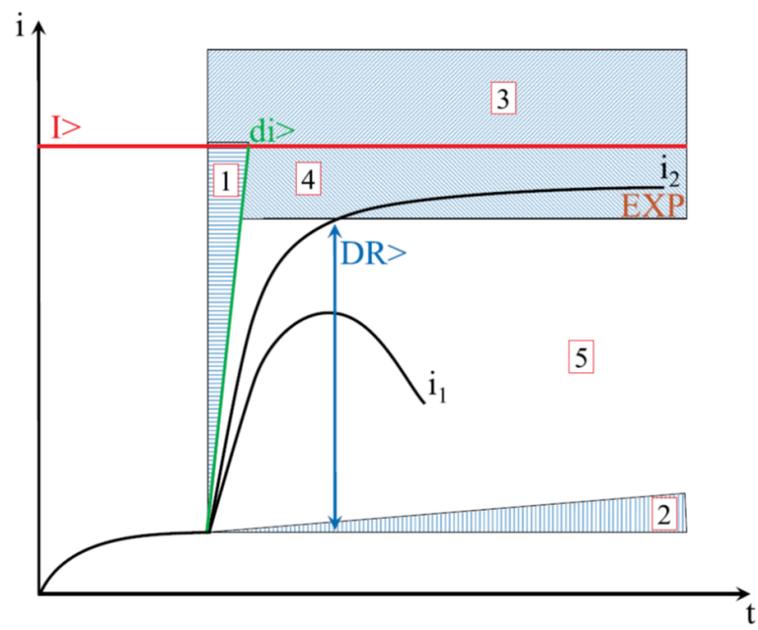


Figura 6.1: Campi di intervento relè DIA-IGTv [17]

La figura 6.1 rappresenta i campi di intervento di un relè DIA-IGTv con il confronto tra un esempio di corrente di avviamento  $i_1$  e una corrente di guasto  $i_2$ . Nello specifico sono presenti le seguenti zone di intervento:

1. campo di intervento per gradiente massimo che permette un rapido intervento per derivate elevate di corrente;
2. campo di non intervento delimitato dalla derivata minima per il riconoscimento di una discontinuità;
3. campo di intervento per massima corrente totale per proteggere i cavi;
4. campo di intervento per massima variazione di corrente transitoria che permette di riconoscere i guasti lontani con alta  $\tau$  e valore di picco ridotto;
5. campo in cui viene analizzato il transitorio di corrente.

In caso di guasto, il cortocircuito si può verificare a distanze diverse dalle due SSE e quindi con un circuito equivalente diverso interposto tra le SSE e il guasto. Questo implica differenti valori di picco, costanti di tempo e quindi derivate, causando un intervento non contemporaneo dei rispettivi interruttori extrarapidi o, in casi particolari, l'intervento di un solo interruttore. Per questi motivi può risultare necessario che i due interruttori siano interconnessi tramite telecomunicazione in fibra ottica che permetta un coordinamento per l'apertura e chiusura degli interruttori.

## 6.1 Studio normativo

Per avere un quadro normativo utile a comprendere la necessità dell'interconnessione tra i due interruttori, è necessario fare riferimento ad alcune norme preparate dal comitato tecnico CEI CT 9, *sistemi e componenti elettrici ed elettronici per trazione*. Questa famiglia di norme riguarda il materiale rotabile, gli impianti fissi, i sistemi di gestione delle reti ferroviarie, le reti di trasporto urbane (comprese le metropolitane, i tram, i filobus e i sistemi di trasporto completamente automatizzati) e i sistemi di trasporto a levitazione magnetica.

Come riporta la norma CEI EN 50388 [18]: *"Per i sistemi in corrente continua, la selettività quando si verifica un cortocircuito tra due sottostazioni di alimentazione è definita nella Norma EN 50633 che prevede l'apertura di entrambi gli interruttori della sottostazione per impedire l'alimentazione a distanza del guasto"*. All'interno della norma CEI EN 50633 [19] sono presenti riferimenti alla necessità di un'apertura coordinata degli interruttori presenti nelle due SSE, che alimentano una stessa zona, e accenni alla modalità di interblocco di questi interruttori. Infatti, nello specifico,

la norma riporta che: *"i sistemi di protezione di circuiti alimentati da più di una sorgente devono essere coordinati"* e che: *"nei casi in cui la condizione di guasto possa continuare ad essere alimentata da altre sorgenti, lo schema di protezione deve avviare anche la disconnessione della condizione di guasto proveniente da queste sorgenti"*, sottolineando come la condizione di guasto in un circuito alimentato da più sorgenti richieda la disconnessione simultanea, o quasi, da tutti i punti di alimentazione. Come riportato nella norma, per ottenere l'intervento coordinato si considerano applicazioni in cui *"il sistema di protezione può essere associato ad uno o più sistemi di comando per costituire uno schema/disposizione integrata di protezione e di comando. Questo potrebbe assumere la forma di schemi di protezione ad ampio raggio con comunicazioni dedicate tra le sottostazioni"*. Questo sarebbe proprio il metodo utilizzabile per il caso in analisi, implementando una telecomunicazione in fibra ottica tra i relè degli interruttori extrarapidi.

A sostegno di ciò si riporta un passaggio della guida applicativa della norma CEI EN 50123-7-1 [20] in cui si definisce l'applicazione dello sgancio reciproco (trascinamento): *"Lo sgancio reciproco è usato tra interruttori ai due capi di sezioni di linea di contatto alimentati all'inizio e alla fine. Quando l'interruttore ad un capo sgancia per un guasto provoca l'interruzione al capo opposto. Questo è considerato essenziale quando la rilevazione del guasto distante è difficile"*. L'applicazione in analisi rappresenta proprio il caso in cui la rilevazione del guasto lontano presenta delle difficoltà e delle differenze rispetto alla rilevazione che può fare la SSE più vicina al guasto e quindi si conferma che risulta essenziale che l'intervento dei due interruttori extrarapidi sia coordinato.

La comunicazione tra i due sistemi di protezione è necessaria non solo per l'intervento in caso di guasto, ma anche per la fase di richiusura. Una lunga interruzione di alimentazione al trasporto pubblico è inammissibile se l'intervento dell'interruttore non è stato causato da un cortocircuito; per questo, in ogni SSE è presente un dispositivo di prova linea (DPL) per ogni zona. Questo dispositivo verifica automaticamente l'assenza di cortocircuiti nella linea e, in caso di verifica positiva, comanda l'auto-richiusura dell'extrarapido. Per effettuare questa verifica, il dispositivo applica una tensione di prova tra linea e circuito di ritorno misurando la corrente che circola, che deve essere inferiore a una soglia preimpostata per poter comandare l'auto-richiusura dell'interruttore. Come riportato nella norma CEI EN 50123-7-1, *"il dispositivo di prova di linea può essere reso inefficace dal fatto che la linea sia già in tensione per mezzo dell'interruttore all'altra estremità della sezione"* e questo implica che il DPL di una sola SSE effettua la verifica e comanda la richiusura automatica agli interruttori di entrambe le SSE attraverso una comunicazione in fibra ottica.

## 6.2 Valutazioni per sicurezza del sistema

Per i relè connessi agli interruttori, i guasti più difficili da rilevare sono quelli lontani, a fondo linea, con bassa derivata e basso valore di picco. Per rilevare questi guasti è necessaria un'attenta taratura del relè DIA-IGTv, avendo a disposizione uno scarso margine tra le correnti di normale funzionamento e quelle di guasti lontani. Come visto nel capitolo 4, l'alimentazione in parallelo di una zona aumenta la corrente di guasto complessiva rispetto alla configurazione con singola SSE, ma la corrente in uscita da ciascuna delle due SSE in parallelo si riduce. I relè non possono rilevare la corrente nel punto di guasto, ma sono tarati per rilevare il guasto misurando le correnti in uscita dalle singole SSE; questo significa che l'alimentazione in parallelo rappresenta una condizione peggiorativa per la sicurezza e la continuità del sistema, per il quale risulta più difficile distinguere le correnti di guasto da quelle di elevati assorbimenti in normale funzionamento. Facendo sempre riferimento ai risultati ottenuti nel capitolo 4 e in particolare alla Tabella 4.19, si può notare che tra la  $I_{cc,min}$  della SSE principale, con alimentazione singola, e la  $I_{cc,min}$  della seconda sottostazione connessa in parallelo la riduzione è particolarmente elevata. Allo stesso tempo, è sostanziale anche la differenza di  $I_{cc,min}$  tra le due SSE in parallelo e questo significa che l'interruttore in una SSE può rilevare guasti, che la seconda SSE non può riconoscere, rendendo quindi ancora più importante la comunicazione tra i due interruttori.

Si può concludere sottolineando che nel caso di alimentazione di una singola zona da due SSE in parallelo, l'interconnessione degli interruttori è indispensabile per ridurre la criticità legata alla rilevazione di questi guasti: infatti, salvo configurazioni in cui le due SSE si trovino particolarmente vicine, un guasto lontano per una SSE è probabilmente un guasto più vicino all'altra SSE, che quindi può rilevare il guasto con maggiore facilità e comandare l'apertura di entrambi gli interruttori. Questo permette un intervento più rapido in caso di guasto e una maggiore affidabilità nella distinzione tra guasti e elevate correnti di normale funzionamento, aumentando la sicurezza e la continuità di servizio del sistema.

Una volta determinata la necessità di una telecomunicazione tra le protezioni delle due SSE in parallelo, si può affermare che questa condizione porterebbe a un chiaro vantaggio in termini di sicurezza rispetto al caso di mancata comunicazione tra gli interruttori. Nonostante ciò, a causa della riduzione delle correnti di cortocircuito erogate dalle singole sottostazioni, in caso di alimentazione in parallelo risulta più difficile rilevare le correnti di guasto, distinguendole da quelle di normale erogazione per gli assorbimenti dei tram.

## Capitolo 7

# Conclusioni e lavori futuri

Questa tesi ha esaminato i principali vantaggi e le criticità più rilevanti che si possono riscontrare alimentando una singola zona tranviaria con due sottostazioni in parallelo. Per fare ciò, è stato utilizzato il software di calcolo TTN-simulator, per cui è stata aggiornata una porzione della rete usata come input ed è stata valutata la validità di calcolo per l'alimentazione in parallelo.

Il processo di aggiornamento della mappa relativa a una zona elettrica ha fatto emergere diverse modifiche sostanziali subite dalla rete nel tempo. Per questo, si sottolinea che l'aggiornamento delle mappe è fondamentale nel processo che mira a creare un gemello digitale della rete tranviaria. Per la generazione di un corretto modello elettrico, non è sufficiente aggiornare le mappe usate come input, ma sarà necessario anche modificare l'algoritmo che genera le sottostazioni elettriche per rappresentare correttamente la sbarra comune in uscita dalla sottostazione stessa.

Gli effetti dell'alimentazione in parallelo di una zona elettrica sono stati valutati tramite simulazioni rappresentative di casi critici e di casi reali. Dai risultati ottenuti sono emersi vantaggi e criticità rilevanti. Sia le simulazioni fatte per casi semplificati, sia quelle fatte per casi reali, hanno evidenziato come l'alimentazione in parallelo di una zona elettrica permetterebbe di ridurre le perdite lungo la rete elettrica e di migliorare i profili di tensione, ottenendo tensioni maggiori ai pantografi dei tram. Questo implica una maggiore qualità dell'alimentazione fornita alle motrici o la possibilità di aumentare il traffico all'interno di una zona elettrica, richiedendo correnti maggiori alle sottostazioni, ma con cadute di tensione limitate.

A fianco di questi vantaggi, la configurazione della rete con l'alimentazione in parallelo implica alcune criticità. L'aumento del traffico tranviario all'interno di una singola zona non provocherebbe un aumento delle correnti erogate dalle singole sottostazioni e quindi non sovraccaricherebbe i principali cavi positivi, ma a causa della magliatura della rete si avrebbe un aumento significativo delle correnti su alcuni cavi di alimentazione. I cavi sovraccaricati cambiano a seconda della disposizione e dell'assorbimento dei tram all'interno della zona. Questo aumento

delle correnti non corrisponde a un sicuro sovraccarico dei cavi, ma richiede un monitoraggio attento dei cavi più sollecitati.

La criticità principale riguarda la sicurezza elettrica del sistema. In caso di alimentazione in parallelo, è necessario l'intervento di due interruttori extrarapidi per disalimentare il sistema. Le norme preparate dal comitato CEI CT9 richiedono il coordinamento delle protezioni per i sistemi elettrici alimentati da più sorgenti se l'intervento simultaneo di queste protezioni non è garantito dalla natura del circuito elettrico. I risultati riportati in questa tesi sottolineano che le correnti erogate dalle sottostazioni in caso di guasto possono avere valori significativamente diversi, provocando l'intervento di un interruttore prima dell'altro. Inoltre, le simulazioni hanno evidenziato una riduzione delle correnti erogate dalle sottostazioni in caso di guasto con alimentazione in parallelo. Questo rende più difficile rilevare le correnti di guasto distinguendole da quelle di normale erogazione per gli assorbimenti dei tram, ma il coordinamento degli interruttori ridurrebbe gli svantaggi legati a questa criticità.

Questa tesi ha permesso di sottolineare le potenzialità dell'alimentazione in parallelo di una singola zona elettrica, mettendo in luce le principali sfide per garantire la sicurezza elettrica del sistema tranviario.

# Bibliografia

- [1] E. Pons e R. Rizzoli. *Introduzione ai sistemi di trazione elettrica*. Slide del corso di Impianti elettrici e sicurezza, Politecnico di Torino. Consultato a novembre 2024. 2024 (cit. alle pp. 1, 4).
- [2] InfraTO. *Sito ufficiale di InfraTO*. Consultato a novembre 2024. 2024. URL: <https://infrato.it/#> (cit. a p. 1).
- [3] Francesco Barlocco. «A web-based georeferenced modelling tool for the Turin tramway network electrification system». Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino, 2021 (cit. alle pp. 2, 10, 24).
- [4] Davide Speciale. «Aggiornamento del Modello della Rete Tranviaria Torinese e Validazione del Software di Calcolo». Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino, 2023 (cit. alle pp. 3, 7, 10, 23, 24).
- [5] Google Maps. *Google Maps*. Ultimo accesso: 4 dicembre 2024. 2024. URL: <https://www.google.com/maps> (cit. a p. 14).
- [6] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Norma CEI EN 50123-7-1 Valutazione della conformità - Principi generali e requisiti per gli organismi di validazione e verifica*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 2020 (cit. a p. 23).
- [7] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Norma CEI EN 50641-2 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Prescrizioni per la validazione di strumenti di simulazione usati per la progettazione di sistemi di alimentazione per la trazione elettrica*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 2024 (cit. a p. 24).
- [8] E. Pons. *Sottostazioni Elettriche di conversione (SSE)*. Slide del corso di Impianti elettrici e sicurezza, Politecnico di Torino. Consultato a novembre 2024. 2024 (cit. alle pp. 51, 78).
- [9] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Norma CEI EN 50328 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Convertitori elettronici di potenza per sottostazioni*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 2003 (cit. a p. 51).

- 
- [10] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Materiale rotabile - Regole per l'installazione del cablaggio*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 2024 (cit. a p. 67).
- [11] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Calcolo delle portate dei cavi elettrici Regime di carico ciclico per cavi con tensione inferiore o uguale a 18/30 (36) kV*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 1998 (cit. a p. 67).
- [12] AristonCavi. *Scheda tecnica del cavo RG7H1E-1,8/3kV*. Documento tecnico. Disponibile su richiesta presso AristonCavi. Ott. 2000 (cit. a p. 67).
- [13] Muoversi a Torino. *Muoversi a Torino - Informazioni sui trasporti*. Ultimo accesso: febbraio 2025. 2025. URL: <https://www.muoversiatorino.it/it/> (cit. a p. 81).
- [14] Google. *Google My Maps*. Ultimo accesso: marzo 2025. 2025. URL: <https://www.google.com/intl/it/maps/about/mymaps/> (cit. a p. 82).
- [15] P. Colella, E. Pons e R. Sinatra. *Analisi della potenza assorbita dalla motrice 5051 durante la marcia*. Rapp. tecn. Politecnico di Torino, nov. 2017 (cit. a p. 89).
- [16] P. Colella e E. Pons. *Analisi della potenza assorbita dalle motrici serie 2800 durante la marcia*. Rapp. tecn. Politecnico di Torino, ott. 2017 (cit. a p. 90).
- [17] E. Pons. *Riconoscimento delle correnti di guasto e sovratensioni*. Slide del corso di Impianti elettrici e sicurezza, Politecnico di Torino. Consultato a novembre 2024. 2024 (cit. a p. 98).
- [18] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Norma CEI EN 50388 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi e materiale rotabile - Criteri tecnici per il coordinamento tra sistemi di alimentazione per trazione elettrica e materiale rotabile per ottenere l'interoperabilità*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 2023 (cit. a p. 99).
- [19] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Norma CEI EN 50633 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Principi per la protezione di sistemi di trazione elettrica in corrente alternata ed in corrente continua*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 2023 (cit. a p. 99).
- [20] Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). *Norma CEI EN 50123-7-1 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua. Parte 7: Apparecchi di misura, comando e protezione per uso specifico in sistemi di trazione a corrente continua*. Rapp. tecn. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano, 2023 (cit. a p. 100).