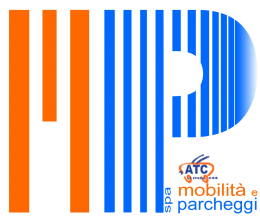


ATC Mobilità e Parcheggi S.p.A.

Intervento per la realizzazione di nuove linee filoviarie e estensione di linee esistenti per il potenziamento del servizio nel Comune della SPEZIA, in attuazione del Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (C.U.P.: G47C20000100001)
1.2.a – FILOVIA (C.U.P.:D47J18000290001)



**INTERVENTO PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVE LINEE FILOVIARIE ED
ESTENSIONE DELLE LINEE ESISTENTI PER IL POTENZIAMENTO DEL
SERVIZIO DEL COMUNE DELLA SPEZIA, IN ATTUAZIONE DEL PIANO
URBANO DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILE**

SUBINTERVENTO 1.2.a FILOVIA (C.U.P: G47J18000290001):

**potenziamento dell'infrastruttura dell'impianto filoviario urbano della
Spezia**

PROGETTO DEFINITIVO

10.1 – Relazione tecnico specialistica calcolo Cadute di Tensione impianto filoviario di progetto

SOGGETTO BENEFICIARIO: COMUNE DELLA SPEZIA

SOGGETTO ATTUATORE: ATC Mobilità e Parcheggi S.p.A.

Finanziato con il Fondo di cui all'articolo 1, comma 140, della legge 11 dicembre 2016, n. 232, destinate al Trasporto Rapido di Massa



UNIVERSITÀ DI PISA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'ENERGIA DEI SISTEMI DEL
TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI
(DESTEC)**

**Studio commissionato da ATC per potenziamento filovia di
La Spezia
protocollo 57/U/21**

Fase 1

Valutazioni finalizzate all'accertamento dei requisiti di idoneità
(ex Circ. Min. 21/11 2003 n. 19, comma 4, punto 3)

**Report 1: Analisi della rete elettrica per la trazione filoviaria e calcolo delle
tensioni in linea**

Autori: Sami Barmada, Luca Sani

Revisione 1.1

Data 02/07/2021

Pagine: 27

PAGINA LASCIATA INTENZIONALMENTE BIANCA

INDICE

1	PREMESSA E SCOPO	4
2	DOCUMENTI MESSI A DISPOSIZIONE DA ATC.....	4
3	ALTRI RIFERIMENTI.....	5
4	DATI DI PROGETTO.....	7
4.1	DESCRIZIONE DELLA RETE	7
4.2	CARATTERISTICHE ELETTRICHE DELLA RETE	8
5	METODO DI CALCOLO DELLE TENSIONI IN LINEA	12
5.1	METODO DELLE TENSIONI NODALI.....	12
5.2	VALORE DELLE RESISTENZE DI OGNI TRATTA	13
5.3	PIATTAFORMA UTILIZZATA PER IL CALCOLO	13
6	RISULTATI.....	13
6.1	SEZIONE CA1	14
6.2	SEZIONE CB1 (CONFIGURAZIONE RIPORTATA IN [24])	16
6.3	SEZIONE CB1 (CONFIGURAZIONE RIPORTATA IN [27])	17
6.4	SEZIONE CB2	19
6.5	SEZIONE CB3 (CONFIGURAZIONE RIPORTATA IN [24])	21
6.6	SEZIONE CC1	23
6.7	SEZIONE CC2	25
7	CONSIDERAZIONI SUI VALORI DI CDT	26

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1	Diagramma di trazione filobus 12m.....	9
Figura 2	Diagramma di trazione filobus 18m.....	10
Figura 3	Scrittura equazioni con il metodo dei nodi.....	12
Figura 4	Sezione CA1	14
Figura 5	Sezione CB1	16
Figura 6	Variazione della topologia sezione CB1	18
Figura 7	Sezione CB2	19
Figura 8	Sezione CB3	21
Figura 9	Sezione CC1	23
Figura 10	Sezione CC2	25

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1	Grandezze caratteristiche della Sezione CA1	15
Tabella 2	CDT della Sezione CA1	15
Tabella 3	Grandezze caratteristiche della sezione CB1	17
Tabella 4	CDT della sezione CB1	17
Tabella 5	Grandezze caratteristiche della sezione CB1	18
Tabella 6	CDT della sezione CB1	18
Tabella 7	Grandezze caratteristiche della sezione CB2.....	20
Tabella 8	CDT della sezione CB2	20
Tabella 9	Grandezze caratteristiche della sezione CB3.....	21
Tabella 10	CDT della sezione CB3	22
Tabella 11	Grandezze caratteristiche della sezione CC1.....	24
Tabella 12	CDT della sezione CC1	24

Tabella 13 Grandezze caratteristiche della sezione CC2..... 26

1 Premessa e scopo

Questo rapporto sintetizza lo stato delle attività svolte nell'ambito dello studio commissionato da ATC MOBILITA' E PARCHEGGI S.p.A. (nel seguito ATC) al Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni dell'Università di Pisa (nel seguito DESTEC), prot. n. 57/U/21 sulla base della convenzione in essere fra i due Enti.

Lo studio, che nasce dall'esigenza di potenziamento del servizio di trasporto elettrico nell'area urbana della città di La Spezia, ha come obiettivo di fornire il necessario supporto alle aziende di trasporto della città (ATC MOBILITA' E PARCHEGGI S.p.A. e ATC ESERCIZIO S.p.A.) per la predisposizione della documentazione tecnica e contrattuale di gara per i necessari interventi di adeguamento della rete e per le inerenti forniture.

In particolare ATC MOBILITA' E PARCHEGGI S.p.A. deve occuparsi del potenziamento delle infrastrutture (che prevede l'ampliamento e l'eventuale rinnovo dell'impianto filoviario, incluso il passaggio della tensione nominale della linea di contatto da 600 V a 750 V, nonché la realizzazione di una nuova SSE funzionale all'ampliamento della rete e l'adeguamento completo delle due SSE attualmente in servizio), mentre ATC ESERCIZIO S.p.A. della fornitura e messa in esercizio dei nuovi veicoli filoviari.

Lo studio condotto dall'Università sarà essenzialmente finalizzato alla verifica delle soluzioni individuate da ATC sulla base dei requisiti di idoneità tecnica vigenti per gli impianti elettrici della trazione filoviaria e per la messa in servizio e la circolazione dei nuovi veicoli filoviari, anche eventualmente proponendo differenti soluzioni tecnologiche o progettuali.

Oggetto di valutazione e di definizione saranno anche alcuni fra i dati di targa dei principali componenti delle tre SSE (la nuova e le due da adeguare), così da poter fissare le specifiche per la predisposizione del capitolato di appalto e la valutazione delle offerte relative alla fornitura dei componenti elettrici delle 3 SSE.

Nel presente rapporto sono descritte alcune delle attività svolte nell'ambito dello studio, in particolare:

- la classificazione e l'analisi della documentazione messa a disposizione da ATC;
- l'individuazione delle principali norme tecniche EN e della regolamentazione vigente in ambito nazionale;
- la definizione di un modello della rete filoviaria e la sua implementazione su due diverse piattaforme software per il calcolo delle grandezze elettriche di interesse per lo studio;
- i risultati ottenuti.

2 Documenti messi a disposizione da ATC

- [1] LetteraAUI-Canaletto
- [2] LetteraAUI-Milano-taratura
- [3] Relazione tecnica relativa all'impianto di alimentazione della filovia di La Spezia rev 02
- [4] SSE CN 2014
- [5] Relazione tecnica fase 2
- [6] Relazione tecnica fase 2 bis
- [7] All 4.1 PROGETTO FATT. RELAZIONE
- [8] All 4.2 Relazione tecnologia utilizzata
- [9] All 4.4 Progetto di esercizio assi e rete connessa

- [10] FILOVIA SP planimetria impianto stato di progetto 2018 MIT REV.0 03.12.2018
- [11] All 4.2.5 Schema unifilare SSE
- [12] All 4.2.1 Sistema di telecontrollo
- [13] All 4.2.2 SSE Parma
- [14] All 4.2.3 Layout SSE Parma
- [15] All 4.2.4 Tecnologia Ammodernamento SSE Canaletto Milano
- [16] interventi SSE CANALETTO E VIA MILANO
- [17] TAV. 5.25 Completamento infrastruttura SSE CANALETTO e VIA MILANO particolari progetto
- [18] SSE Via Milano rev.1 02.03.2020
- [19] TAVOLA 01 Lay out impianto filoviario rev.3 08.02.21
- [20] Caratteristiche e polimetriche linee rev.1 del 23.02.21
- [21] FILOVIA SP planimetria 2 CIRCOLARI rev.1 del 01.03.21
- [22] FILOVIA SP planimetria linee 1 2 3 12 progetto MIT rev.1 del 01.03.21
- [23] TAV 01 - Planimetria impianto filoviario e 2 circolari alternative proposte
- [24] schema imp filoviario per cdt rev.6 08.03.2021 spostamento isolatore di zona in Via Veneto Via XIV Maggio
- [25] Tabelle C.d.T. tratte impianto filoviario- Rev.2 08.03.21
- [26] nuova SSE Piazza Baratta rev.3 30.03.2021
- [27] Filovia SP_2022
- [28] TAVOLA DI PROGETTO realizzazione nuova SSE Piazza Baratta Via Parma rev.3 30.03.2021
- [29] Diagrammi filobus nuovi del 07.05.21

3 Altri riferimenti

- [A] Norma CEI EN 50119, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Linee aeree di contatto per trazione elettrica, 2021-01
- [B] Norma CEI EN 50119/A1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Linee aeree di contatto per trazione elettrica, 2'14-11
- [C] Norma CEI EN 50122-1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno Parte 1: Provvedimenti di protezione contro lo shock elettrico, 2012-08
- [D] Norma CEI EN 50122-1/A2, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno Parte 1: Provvedimenti di protezione contro lo shock elettrico, 2016-10

- [E] Norma CEI EN 50122-1/A3/A4, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno Parte 1: Provvedimenti di protezione contro lo shock elettrico, 2017-04
- [F] Norma CEI EN 50123-1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 1: Generalità, 2003-09
- [G] Norma CEI EN 50123-2, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 2: Interruttori a corrente continua, 2003-10
- [H] Norma CEI EN 50123-3, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 3: Sezionatori, interruttori di manovra-sezionatori e sezionatori di terra a corrente continua per interno, 2003-10
- [I] Norma CEI EN 50123-3/A1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 3: Sezionatori, interruttori di manovra-sezionatori e sezionatori di terra a corrente continua per interno, 2016-10
- [L] Norma CEI EN 50123-4, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 4: Sezionatori, interruttori di manovra - sezionatori e sezionatori di terra a corrente continua per esterno, 2003-10
- [M] Norma CEI EN 50123-4/A1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 4: Sezionatori, interruttori di manovra - sezionatori e sezionatori di terra a corrente continua per esterno, 2014-02
- [N] Norma CEI EN 50123-6, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 6: Apparecchiatura preassemblata a corrente continua, 2003-10
- [O] Norma CEI EN 50123-6/A1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua Parte 6: Apparecchiatura preassemblata a corrente continua, 2015-12
- [P] 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 Sezione 1: Guida applicativa, 2003-11
- [Q] Norma CEI EN 50123-7-2, 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 - Sezione 2: Trasduttori di corrente isolanti e altri apparecchi di misura della corrente, 2003-11
- [R] Norma CEI EN 50123-7-3, 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 Sezione 3: Trasduttori di tensione isolanti e altri apparecchi di misura della tensione, 2003-11
- [S] Norma CEI EN 50163, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Tensioni di alimentazione dei sistemi di trazione, 2006-10
- [T] Norma CEI EN 50163/A1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Tensioni di alimentazione dei sistemi di trazione, 2008-02
- [U] Norma CEI EN 50163/EC, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Tensioni di alimentazione dei sistemi di trazione, 2019-03

- [V] Norma CEI EN 50163/A2, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Tensioni di alimentazione dei sistemi di trazione, 2020-12
- [Z] Norma CEI EN 50328, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Convertitori elettronici di potenza per sottostazioni, 2003-11
- [AA] Norma CEI EN 50329, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Trasformatori di trazione, 2003-11
- [AB] Norma CEI EN 50329/A1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Trasformatori di trazione, 2011-10
- [AC] Norma CEI EN 50526-1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Scaricatori di sovratensione e limitatori di tensione in corrente continua Parte 1: Scaricatori di sovratensione, 2013-04
- [AD] Norma CEI EN 50526-2, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Scaricatori di sovratensione e limitatori di tensione in corrente continua Parte 2: Limitatori di tensione, 2014-11
- [AE] Norma CEI EN 50526-3, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Scaricatori di sovratensione e limitatori di tensione in corrente continua Parte 3: Guida di applicazione, 2017-01
- [AF] Norma CEI EN 60909-0, Correnti di corto circuito nei sistemi trifase in corrente alternata Parte 0: calcolo delle correnti, 2016-12
- [AG] Circuiti Elettrici, C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku, Mc Graw Hill
- [AH] Norma CEI EN 50125-2, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Condizioni ambientali per gli equipaggiamenti. Parte 2: Impianti elettrici fissi, 2003-04
- [AI] Norma CEI EN 50125-2/EC, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Condizioni ambientali per gli equipaggiamenti. Parte 2: Impianti elettrici fissi, 2019-03
- [AL] Norma CEI EN 60721-2-1, Classificazione delle condizioni ambientali. Parte 2-1: Condizioni ambientali presenti in natura - Temperatura e umidità, 2015-05

4 Dati di progetto

4.1 Descrizione della rete

Si tratta di un sistema a linea aerea di contatto flessibile, posta al di sopra della sagoma dei veicoli, divisa in sezioni; ogni sezione è separata dalle sezioni a essa contigue da isolatori di sezione [A] ed è normalmente alimentata da una specifica sottostazione elettrica (SSE) tramite alimentatori trasversali [24] [27].

Il circuito di ritorno esteso è parte del circuito di trazione elettrica e riporta la corrente di ritorno di trazione alla SSE; se è continuo per l'intera rete è connesso a terra in una sola SSE, altrimenti se le sezioni sono fra di esse separate è connesso a terra in ciascun SSE.

I due conduttori (di alimentazione e di ritorno) costituenti il circuito di trazione sono di rame con sezione di 100 mm² ciascuno e distanti uno dall'altro circa 60 cm [8].

Nelle tratte in cui più linee di trazione corrono adiacenti l'una all'altra i fili di contatto e anche i fili di ritorno delle stesse sono connessi fra di loro mediante collegamenti equipotenziali funzionali.

4.2 Caratteristiche elettriche della rete

I dati necessari per il calcolo delle cadute di tensione sono i seguenti:

1. Suddivisione della rete in rami (indicati con il nome di “tratte” secondo i documenti forniti da ATC) e nodi;
2. Valore delle resistenze di ogni tratta;
3. Valore delle correnti assorbite dai filobus;
4. Posizionamento dei filobus sulla rete;
5. Valore della tensione di alimentazione fornita dalle SSE.

4.2.1 Suddivisione della rete in rami e nodi

Nel linguaggio tecnico utilizzato per la descrizione dei circuiti elettrici, una rete è definita topologicamente da un insieme di rami e di nodi, con le seguenti definizioni:

- nodo: un punto di confluenza fra 2 o più conduttori;
- ramo: qualunque parte di una rete compresa tra due nodi.

Nei documenti forniti da ATC [24], la rete è divisa in “tratte”, ognuna con la propria lunghezza e sezione, e le terminazioni (ai due estremi) di ogni tratta sono identificate con un numero. Questa è di fatto una suddivisione della rete in nodi e rami, pertanto non è necessaria una nuova denominazione o numerazione. Per motivi di chiarezza ed uniformità con la documentazione ATC, in questo report verranno utilizzate le denominazioni di “nodo” e “tratta”.

Come descritto in 4.1 la rete è gestita in modo tale che ogni sezione sia alimentata da una sola SSE grazie alla presenza di sezionatori; ciò consente l’analisi “a blocchi” della rete stessa.

Il documento [27] propone una diversa disposizione dei conduttori di alimentazione (feeders) dalla SSE Milano rispetto al documento [24]. Questa differenza non è sostanziale, però le due diverse disposizioni sono analizzate entrambe per quanto riguarda la sezione CB1.

4.2.2 Valori delle correnti assorbite dai filobus

I diagrammi di trazione forniti da ATC [29] sono relativi ai filobus Trollino di 12m e di 18m che andranno ad essere utilizzati in aggiunta o in sostituzione dei filobus attualmente esistenti. Tali diagrammi di trazione sono riferiti a pendenze comprese fra lo 0% ed il 9% e riferiti a velocità di marcia stabilite dal costruttore per un funzionamento ottimale del filobus.

Ponendosi nella condizione più gravosa dal punto di vista dell’assorbimento di corrente, si considerano i seguenti valori (relativi alla pendenza del 5%): $I_{12} = 145 A$ ed $I_{18} = 232 A$, come si evince dai diagrammi di trazione riportati a fine paragrafo

A questi valori di corrente, è necessario aggiungere la corrente assorbita dalla batteria che dipende dal suo stato di carica istantaneo e dalla gestione stessa del filobus; una stima assolutamente cautelativa consiste nel considerare la corrente assorbita per ricarica dalla batteria pari a $I_{bat} = 90A$ e considerarla permanente in aggiunta alle correnti suddette. Abbiamo pertanto come correnti massime su cui valutare le CDT

$$I_{12} = 235 A \text{ ed } I_{18} = 322 A.$$

STB La Spezia 12 m Bifilare

STB; maximum load; 1 BMU, 3 * 15 kWh Impact, U.OHW = 750 V
Spec. Art. 2.3; 2.4: 1000 m; 5 % grade, v.max = 30 km/h

Weight of vehicle.....	13.50t
Pay load.....	5.50t
Line voltage Mo/Br.....	750V/ 900V
Grade.....	5%
Distance between stops.....	1000m
Dwell time.....	10s
Wheel diameter.....	933mm
Gear ratio.....	9.817/ 1
Max. acceleration.....	0.65m/s ²
Max. deceleration.....	1.33m/s ²
Mean deceleration.....	1.19m/s ²
Stopping distance.....	29.1m
Adhesion coefficient Mo/Br.....	0.21/0.13
RMS line current tot/Mo.....	145A/ 145A
Journey speed.....	25.4km/h
RMS motor current.....	184A
Energy drawn from line.....	3974.5Wh = 209.19Wh/ (t*km)
Dynamic brake energy.....	85.9Wh = 4.52Wh/ (t*km)
Total energy consumption.....	3888.6Wh = 204.66Wh/ (t*km)

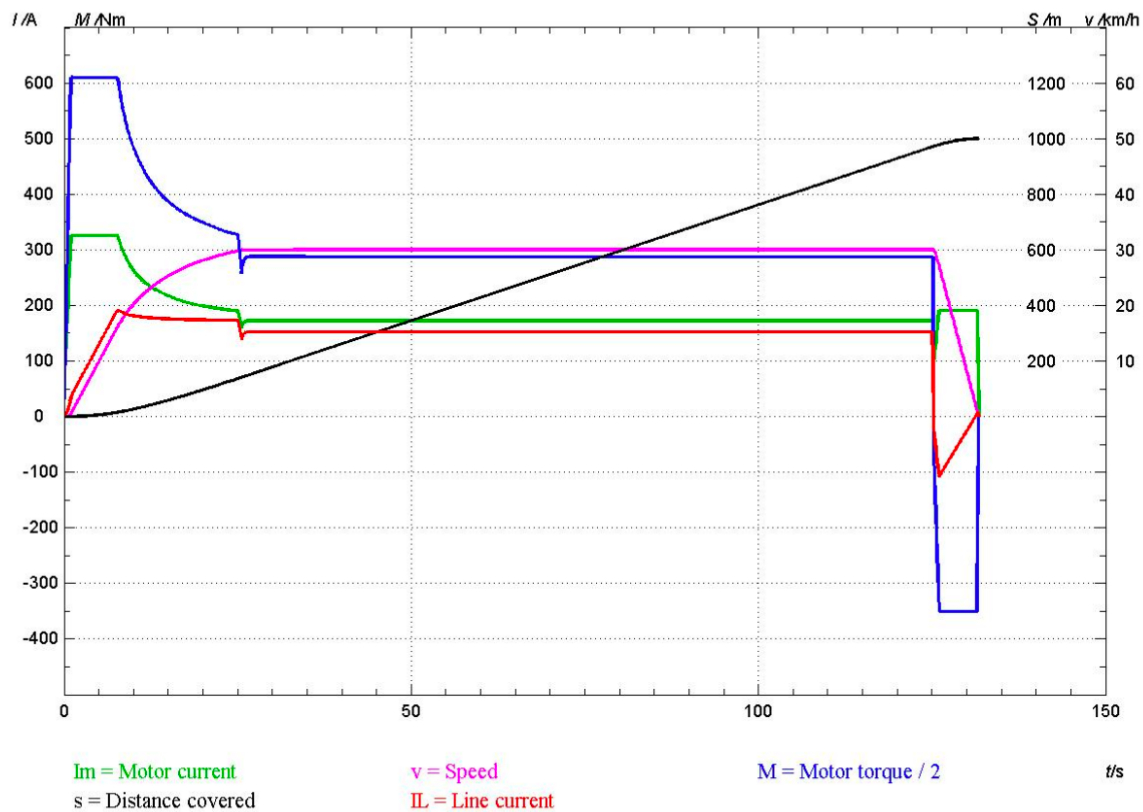


Figura 1 Diagramma di trazione filobus 12m

GTB La Spezia

GTB; maximum load, 1 BMU, 3 * 15 kWh Impact, U.OHW = 750 V
Spec. Art. 2.3; 2.4: 1000 m; 5 % grade, v.max = 30 km/h

PESO DEL VEICOLO A VUOTO.....	19.00t
PESO DEI PASSEGGERI.....	10.00t
TENSIONE TRA/FREI.....	750V/ 900V
PENDENZA.....	5%
TRATTA.....	1000m
TEMPO DI FERMATA.....	8.7s
DIAMETRO DELLE RUOTE.....	903mm
RAPPORTO DI TRASMISSIONE.....	9.84/ 1
ACCELERAZIONE MAX.....	0.64m/s ²
DECELERAZIONE	1.33m/s ²
DECELERAZIONE MEDIA.....	1.19m/s ²
DISTANZA DI ARRESTO.....	29.1m
COEFFICIENTE D'ATTRITO TR/FR.....	0.20/0.11
CORRENTE EFF. DI LINEA /TR.....	232A/ 231A
VELOCITA COMMERCIALE.....	25.4km/h
CORRENTE EFF.DEL MOTORE.....	153A
CONSUMO ENERGIA DI TRAZIONE.....	6391.1Wh = 220.38Wh/ (t*km)
RECUPERO ENERGIA DEL FREINO.....	125.5Wh = 4.33Wh/ (t*km)
NETTO CONSUMO DI ENERGIA.....	6265.6Wh = 216.06Wh/ (t*km)

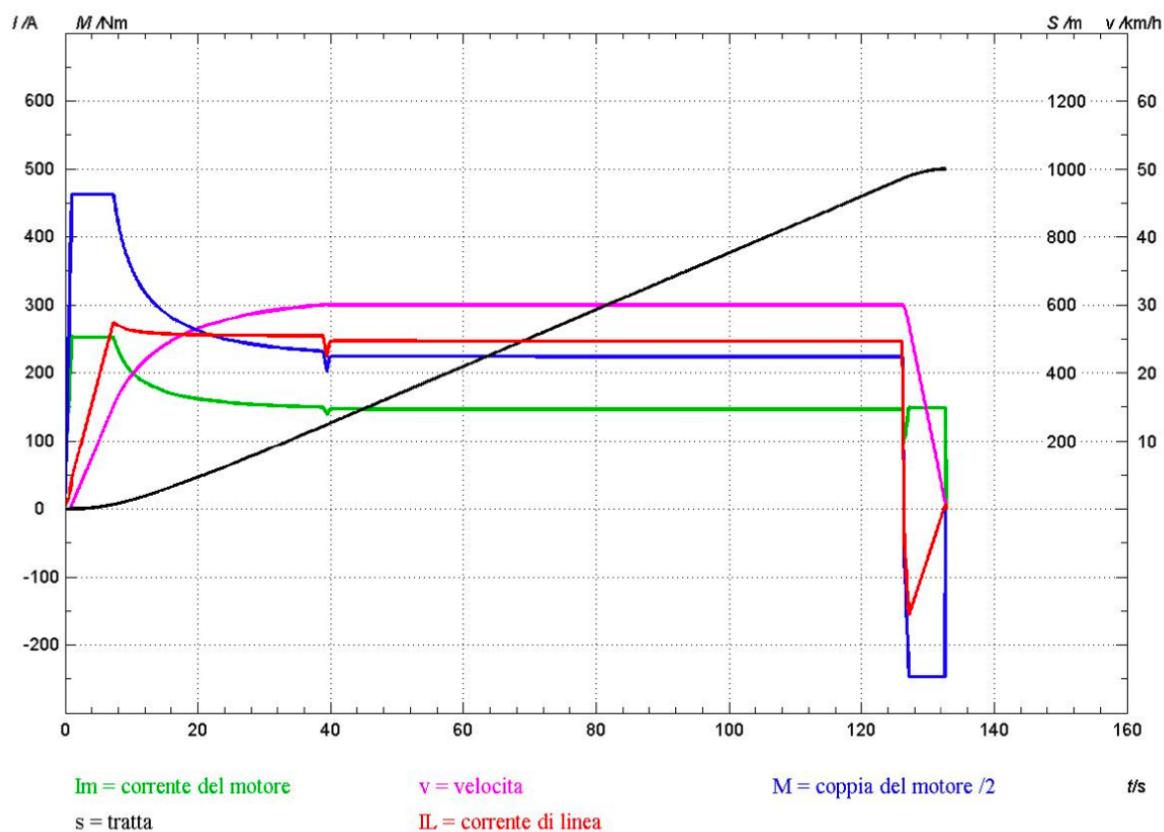


Figura 2 Diagramma di trazione filobus 18m

4.2.3 Posizionamento dei filobus sulla rete

Il posizionamento dei Filobus sulla rete per la verifica della CDT dovrebbe essere quello che realizza la condizione più gravosa, ossia con i mezzi più lontani dal punto di alimentazione (la SSE). Chiaramente la precedente condizione deve essere incrociata con l'orario di servizio dei filobus stessi; in quest'ottica ATC ha fornito al DESTEC il posizionamento dei mezzi che realizzi la condizione precedentemente descritta.

4.2.4 Valore della tensione di alimentazione fornita dalle SSE

Le SSE saranno caratterizzate da una tensione nominale di esercizio $V_n = 750V$; la normativa consente però un esercizio continuativo a tensione superiore, in particolare alla tensione massima $V_{max} = 900V$ [S] [T] [U] [V]. Questa possibilità offerta dalla norma consente di regolare la tensione di alimentazione in modo da garantire il rispetto della tensione minima.

In realtà il dato della tensione di esercizio è superfluo per il calcolo delle cadute di tensione: trattandosi di un sistema lineare mettendo a zero Volt il valore della tensione imposta dalla SSE le tensioni di nodo che si ottengono dall'analisi precedente coincidono con le CDT (che sono pertanto indipendenti dalla tensione di esercizio).

Questa condizione è valida per un sistema elettrico i cui componenti sono lineari, assunzione che viene implicitamente fatta considerando la resistività dei conduttori costante ed i filobus come elementi ad assorbimento di corrente costante.

4.2.5 Condizioni ambientali

Ai fini del calcolo delle cadute di tensione è stato tenuto conto delle condizioni climatiche ambientali [A] [AH] [AI] e in particolare come temperatura ambiente di riferimento per il circuito di trazione è stato assunto a regime, sulla base dei valori medi degli estremi giornalieri, il valore di 40 °C [AL].

Ai fini del mantenimento delle proprietà meccaniche della linea di trazione sono stati assunti i seguenti limiti di temperatura per il conduttore:

- 80 °C temperatura massima in condizione di esercizio
- 170 °C temperatura massima di corto circuito (durata 1 s) [A].

5 Metodo di calcolo delle tensioni in linea

5.1 Metodo delle tensioni nodali

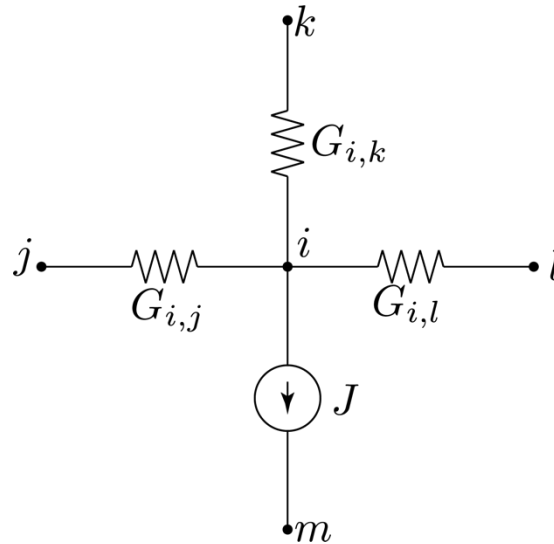


Figura 3 Scrittura equazioni con il metodo dei nodi

Date le caratteristiche della rete, magliata in alcune zone, il metodo più adatto per il calcolo delle cadute di tensione è il metodo dell'analisi nodale [AG]. Quest'ultimo (basato ovviamente sui principi di Kirchhoff) consente di scrivere le equazioni di equilibrio ad una rete elettrica in modo semplice e diretto, ottenendo come rappresentazione un sistema lineare algebrico avente per incognite le tensioni ad ogni nodo della rete e per termini noti le correnti dei carichi e le tensioni dei nodi direttamente collegati ad un generatore di tensione.

Facendo riferimento alla figura, le tensioni incognite V_i, V_j, V_k, V_l, V_m sono le tensioni dei nodi rappresentati rispetto ad un unico nodo di riferimento, e le $G_{i,j}$ rappresentano le conduttanze di ogni ramo della rete. La scrittura delle equazioni discende direttamente dal primo principio di Kirchhoff, e per ogni nodo, l'equazione in questione viene composta come riportato nell'equazione seguente

$$(G_{i,j} + G_{i,k} + G_{i,l})V_i - G_{i,j}V_j - G_{i,k}V_k - G_{i,l}V_l = -J$$

L'assemblaggio di tutte le equazioni in un unico sistema è di conseguenza immediato ed il risultato è nella forma

$$|G||V| = |I|$$

Dove $|G|$ è la matrice contenente i termini di conduttanza, $|V|$ è il vettore delle tensioni incognite, ed $|I|$ è il vettore delle correnti assorbite (nonchè del termine dovuto alla tensione imposta dalla SSE moltiplicata per la conduttanza del ramo corrispondente).

Nel caso in esame, le tensioni nodali sono tutte riferite al conduttore di ritorno; i generatori di corrente rappresentano le correnti assorbite da ogni singolo filobus, mentre le sottostazioni elettriche sono rappresentate da un nodo la cui tensione è imposta.

La risoluzione del sistema lineare (che avviene attraverso l'inversione della matrice delle conduttanze) consente di ottenere le tensioni in tutti i nodi, ed al bisogno anche di tutte le altre grandezze elettriche, ad esempio la corrente nel generico ramo è semplicemente data da $I_{i,j} = G_{i,j}V_{i,j}$.

5.2 Valore delle resistenze di ogni tratta

La documentazione fornita da ATC [24] fornisce per ogni tratta la lunghezza e la sua realizzazione in forma di singolo o doppio bifilare. Con ottima approssimazione, si considera che la presenza dei collegamenti equipotenziali raddoppi di fatto la sezione della linea bifilare.

Al momento le cadute di tensione presenti nei conduttori che collegano la cabina alla rete (feeders) sono state trascurate.

Si considerano inoltre i seguenti dati:

$$\rho_0 = \frac{1}{54} = 0.0177 \frac{\Omega mm^2}{m} \text{ (resistività del rame a 20 gradi centigradi)}$$

$$K = 3.8 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \text{ (costante di temperatura a 20 gradi)}$$

$$A = 100 mm^2 \text{ (sezione del singolo conduttore)}$$

da cui si evince che la resistività del rame da considerare a 40 gradi centigradi ($\Delta T = 20^\circ$) è pari a

$$\rho = \rho_0(1 + K\Delta T) = 0.02 \frac{\Omega mm^2}{m}$$

Nei risultati riportati in seguito vengono forniti i valori di conduttanza calcolati per ogni tratta come

$$G = \left(\frac{\rho L}{A} \right)^{-1} S$$

Costruendo la matrice delle conduttanze con i valori calcolati, è poi necessario raddoppiare le CDT ottenute, in modo da tenere conto anche del conduttore di ritorno (negativo).

5.3 Piattaforma utilizzata per il calcolo

La scrittura del sistema di equazioni con il metodo delle tensioni nodali non presenta particolari criticità così come non costituisce criticità la dimensione del sistema lineare (il più grande si ottiene per la sezione CA1, 16 equazioni in 16 incognite). I calcoli sono stati effettuati con il software Matlab, ed in seguito è stato realizzato un applicativo basato sul foglio di calcolo Excel (sempre basato sulla metodologia precedentemente descritta) che, con un'interfaccia grafica semplice, consentirà ad ATC di calcolare le tensioni in linea potendo cambiare la topologia della rete ed i suoi parametri, nonché il posizionamento dei filobus.

6 Risultati

Vengono qua riportati i risultati dei calcoli delle tensioni in linea; per ogni sezione vengono riportate le caratteristiche elettriche, le tensioni e le potenze perdute (per effetto Joule) sui conduttori della linea stessa e quelle fornite ai filobus dalla sottostazione.

6.1 Sezione CA1

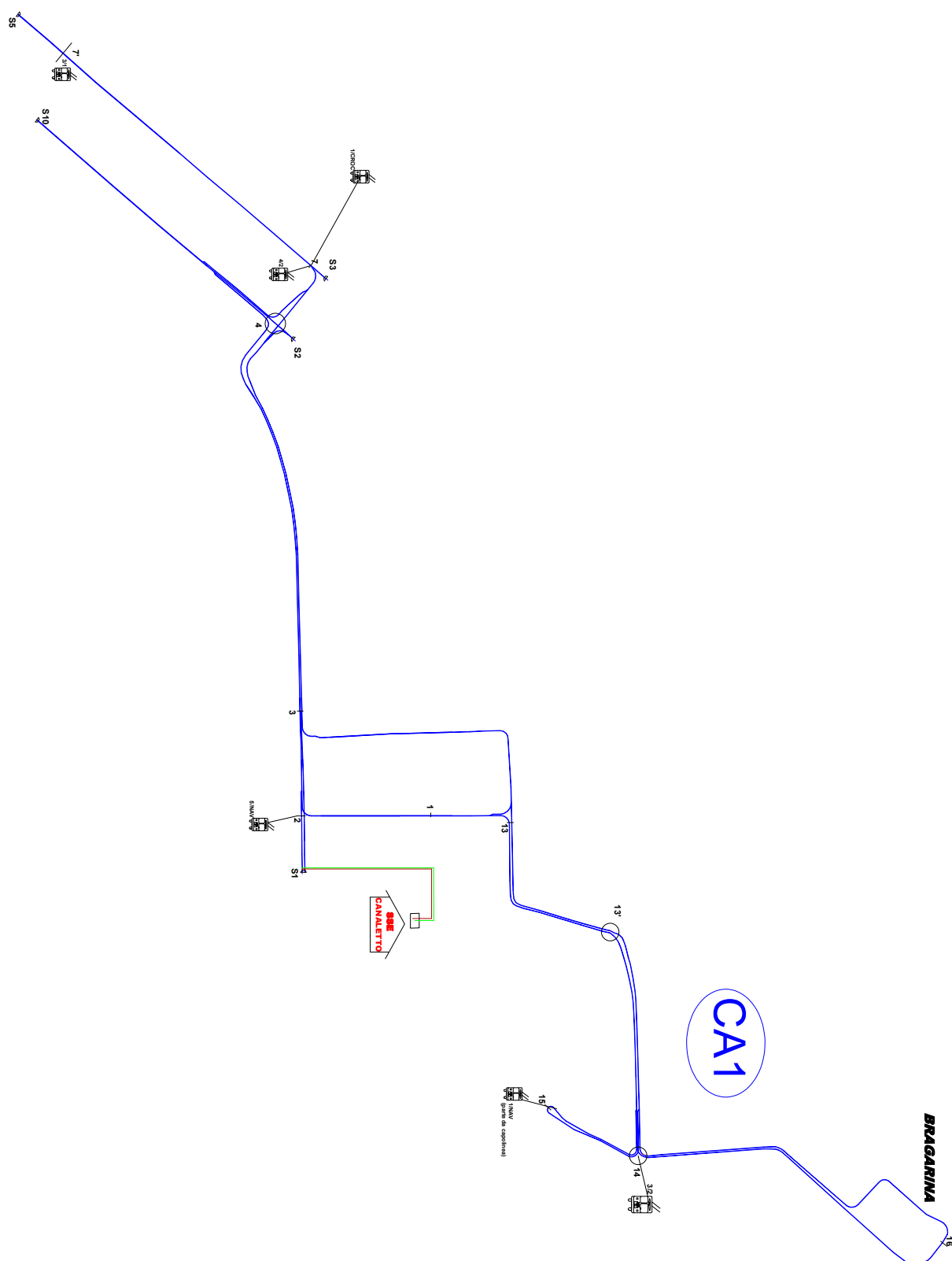


Figura 4 Sezione CA1

In Figura 4 è riportata la topologia della Sezione CA1, alimentata dalla SSE Canaletto. Nella condizione di lavoro stabilita da ATC, la sezione CA2 non presenta alcun filobus, pertanto si è provveduto all'analisi della sola sezione CA1

Tabella 1 Grandezze caratteristiche della Sezione CA1

Tratta (ID nodi)	Lunghezza (m)	Sezione (mm ²)	Conduttanza (S)
1-2	210	100	$G1_2 = 23.8$
2-3	140	200	$G2_3 = 71.4$
3-4	678	200	$G3_4 = 14.8$
4-S10	400	100	$G4_S10 = 12.5$
4-7	100	100	$G4_7 = 50.0$
71-S5	150	100	$G71_S5 = 33.3$
71-7	490	100	$G71_7 = 10.2$
7-S3	30	100	$G7_S3 = 166.7$
4-S2	40	100	$G4_S2 = 125.0$
1-13	120	100	$G1_13 = 41.7$
3-13	500	100	$G3_13 = 10.0$
2-S1	70	200	$G2_S1 = 142.9$
13-14	670	200	$G13_14 = 28.6$
14-15	269	200	$G14_15 = 37.0$
14-16	620	200	$G14_16 = 16.1$

Tabella 2 CDT della Sezione CA1

Nodo (ID Nodi)	CDT ($V_{fin} - V_n$) (V)
1	-49.35
2	-19.74
3	-42.77
4	-138.37
7	-166.57
71	-212.63
S2	-138.37
S3	-166.57
S5	-212.63
S10	-138.37
13	-66.27
14	-129.25
15	-141.89
16	-129.25
S9	-96.35

In queste condizioni di funzionamento, la potenza dissipata per effetto Joule sui conduttori è dell'ordine dei 197 kW, mentre la potenza fornita ai filobus è pari a 861 kW (rendimento 0.814).

6.2 Sezione CB1 (configurazione riportata in [24])

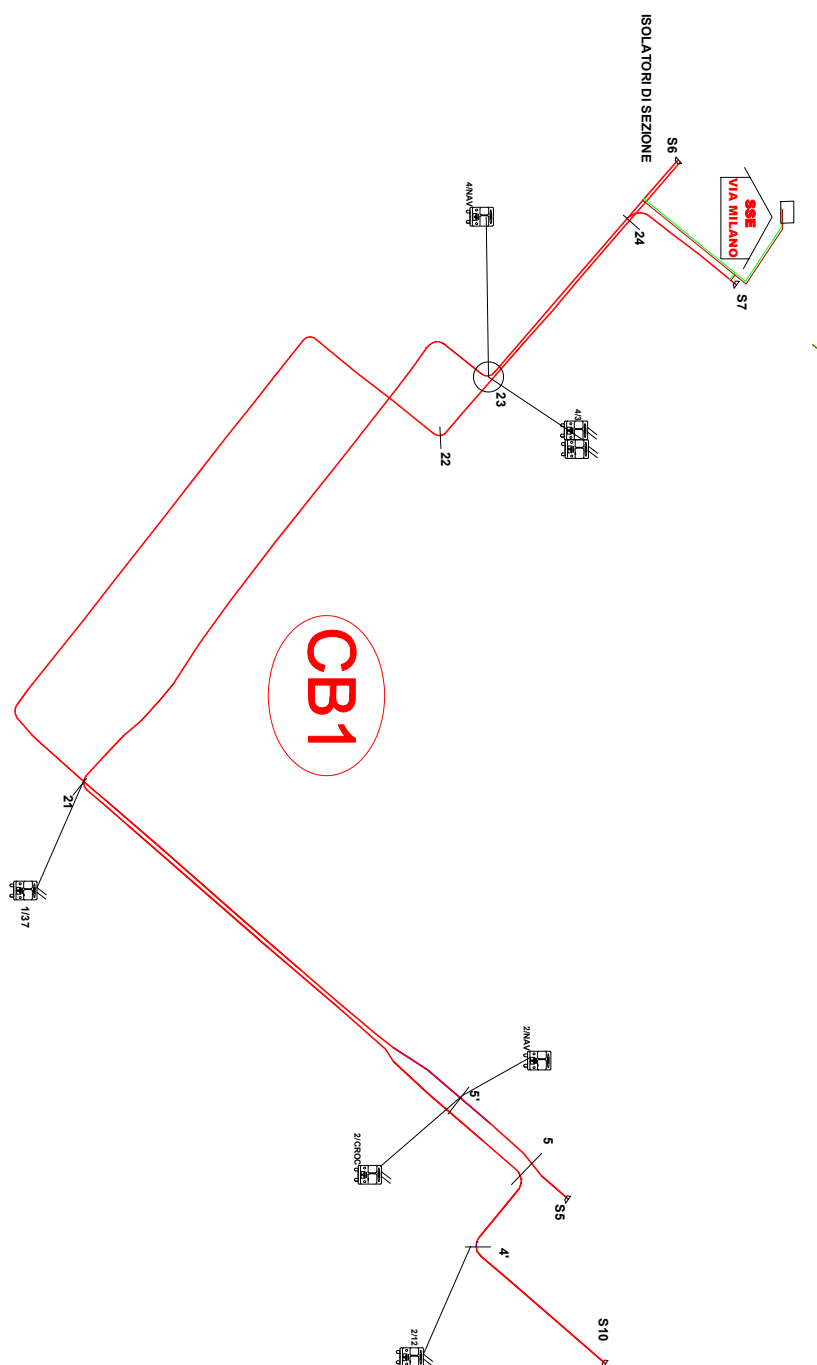


Figura 5 Sezione CB1

In Figura 5 è riportata la topologia della sezione CB1, alimentata dalla SSE Milano.

Tabella 3 Grandezze caratteristiche della sezione CB1

Tratta (ID nodi)	Lunghezza (m)	Sezione (mm ²)	Conduttanza (S)
5-S5	60	100	$G_{5_S5} = 83.3$
5-51	100	200	$G_{5_51} = 100.0$
41-5	100	100	$G_{41_5} = 50.0$
41-S10	260	100	$G_{41_S10} = 19.2$
21-51	550	200	$G_{21_51} = 18.2$
21-22	700	100	$G_{21_22} = 7.1$
22-23	80	100	$G_{22_23} = 62.5$
23-21	670	100	$G_{23_21} = 7.5$
23-24	220	200	$G_{23_24} = 45.5$
24-S7	110	100	$G_{24_S7} = 45.5$
24-S6	80	200	$G_{24_S6} = 125.0$

Tabella 4 CDT della sezione CB1

Nodi (ID nodi)	CDT ($V_{fin} - V_n$) (V)
S5	-349.50
5	-349.50
51	-344.80
41	-358.90
S10	-358.90
21	-267.25
22	-145.64
23	-131.74
24	-65.87
S6	-65.87

In queste condizioni di funzionamento, la potenza dissipata per effetto Joule sui conduttori è dell'ordine dei 383 kW, mentre la potenza fornita ai filobus è pari a 740+ kW (rendimento 0.659).

6.3 Sezione CB1 (configurazione riportata in [27])

Il calcolo delle CDT per la sezione CB1 è effettuato anche secondo la variazione riportata nella tavola di cui al titolo. La variazione riguarda i collegamenti fra la SSE Milano e le linee nella sua estrema prossimità, ed un diverso sezionamento. Le variazioni alla sezione CB3 sono praticamente trascurabili, e le CDT calcolate nella configurazione originaria descritta in [24] (e di seguito riportate) sono da considerarsi valide in entrambi i casi (e comunque più cautelative).

Le variazioni alla sezione CB1 invece meritano ulteriore indagine, e la nuova topologia è riportata in Figura 6 (dove è evidenziato il cambiamento, con il feeders indicati in colore rosso).

La lunghezza della tratta (singolo bifilare) 24-S8 è ottenuta sommando le lunghezze delle tratte S6-25, 25-S8 e 24-S6, mentre quest'ultima viene in seguito rimossa.

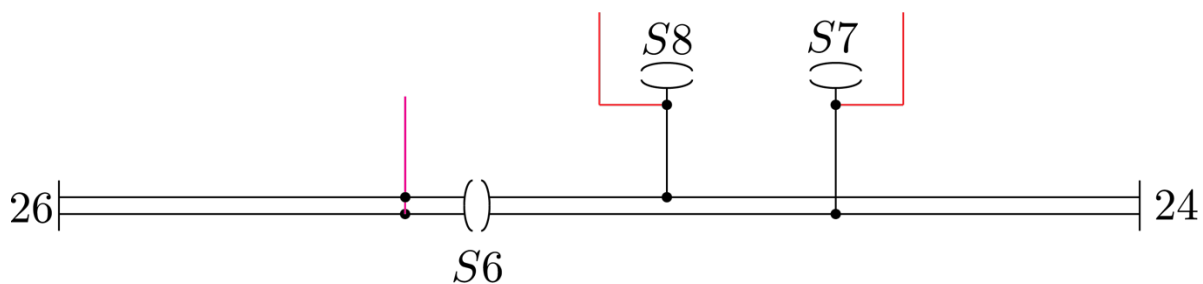


Figura 6 Variazione della topologia sezione CBI

Tabella 5 Grandezze caratteristiche della sezione CBI

Tratta (ID nodi)	Lunghezza (m)	Sezione (mm ²)	Conduttanza (S)
5-S5	60	100	$G_{5 \ S5} = 83.3$
5-51	100	200	$G_{5 \ 51} = 100.0$
41-5	100	100	$G_{41 \ 5} = 50.0$
41-S10	260	100	$G_{41 \ S10} = 19.2$
21-51	550	200	$G_{21 \ 51} = 18.2$
21-22	700	100	$G_{21 \ 22} = 7.1$
22-23	80	100	$G_{22 \ 23} = 62.5$
23-21	670	100	$G_{23 \ 21} = 7.5$
23-24	220	200	$G_{23 \ 24} = 45.5$
24-S7	110	100	$G_{24 \ S7} = 45.5$
24-S8	80+150+20	100	$G_{24 \ S8} = 20.0$

Tabella 6 CDT della sezione CBI

Nodi (ID nodi)	CDT ($V_{fin} - V_n$) (V)
S5	-329.38
5	-329.38
51	-324.68
41	-338.78
S10	-338.78
21	-247.13
22	-125.51
23	-111.61
24	-45.74

In queste condizioni di funzionamento, la potenza dissipata per effetto Joule sui conduttori è dell'ordine dei 352 kW , mentre la potenza fornita ai filobus è pari a 771 kW (rendimento 0.686).

6.4 Sezione CB2



Figura 7 Sezione CB2

In Figura 7 è riportata la topologia della sezione CB2, alimentata dalla SSE Milano.

Tabella 7 Grandezze caratteristiche della sezione CB2

Tratta (ID nodo)	Lunghezza (m)	Sezione (mm ²)	Conduttanza (S)
S8-28	80	100	$G_{S8\ 28} = 62.5$
28-281	40	100	$G_{28\ 281} = 125.0$
281-S7	195	100	$G_{281\ S7} = 25.6$
281-29	2062	200	$G_{281\ 29} = 4.9$

Tabella 8 CDT della sezione CB2

Nodo (ID nodi)	CDT ($V_{fin} - V_n$) (V)
28	-15.69
281	-23.53
29	-253.24

In queste condizioni di funzionamento, la potenza dissipata per effetto Joule sui conduttori è dell'ordine dei 147 kW, mentre la potenza fornita ai filobus è pari a 447 kW (rendimento 0.753).

6.5 Sezione CB3 (configurazione riportata in [24])

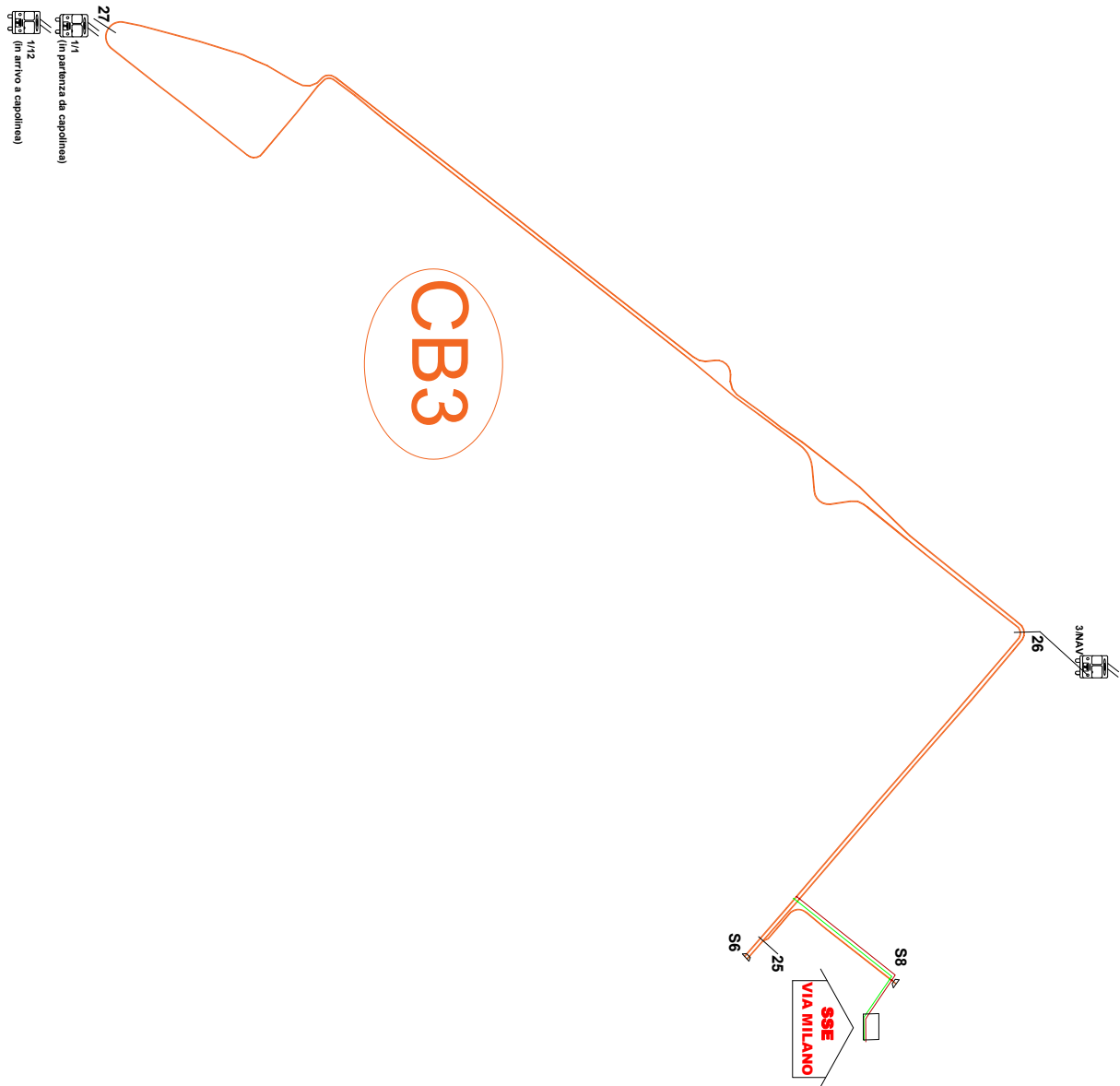


Figura 8 Sezione CB3

In Figura 8 è riportata la topologia della sezione CB2, alimentata dalla SSE Milano.

Tabella 9 Grandezze caratteristiche della sezione CB3

Tratta (ID nodo)	Lunghezza (m)	Sezione (mm ²)	Conduttanza (S)
S6-25	20	200	$G_{S6_25} = 500.0$
25-S8	150	100	$G_{25_S8} = 33.3$
25-26	360	200	$G_{25_26} = 27.8$
26-27	1110	200	$G_{26_27} = 9.0$

Tabella 10 CDT della sezione CB3

Nodo (ID nodi)	CDT ($V_{fin} - V_n$) (V)
25	-42.30
26	-93.06
27	-197.40

In queste condizioni di funzionamento, la potenza dissipata per effetto Joule sui conduttori è dell'ordine dei 114 kW, mentre la potenza fornita ai filobus è pari a 414 kW (rendimento 0.783).

6.6 Sezione CC1

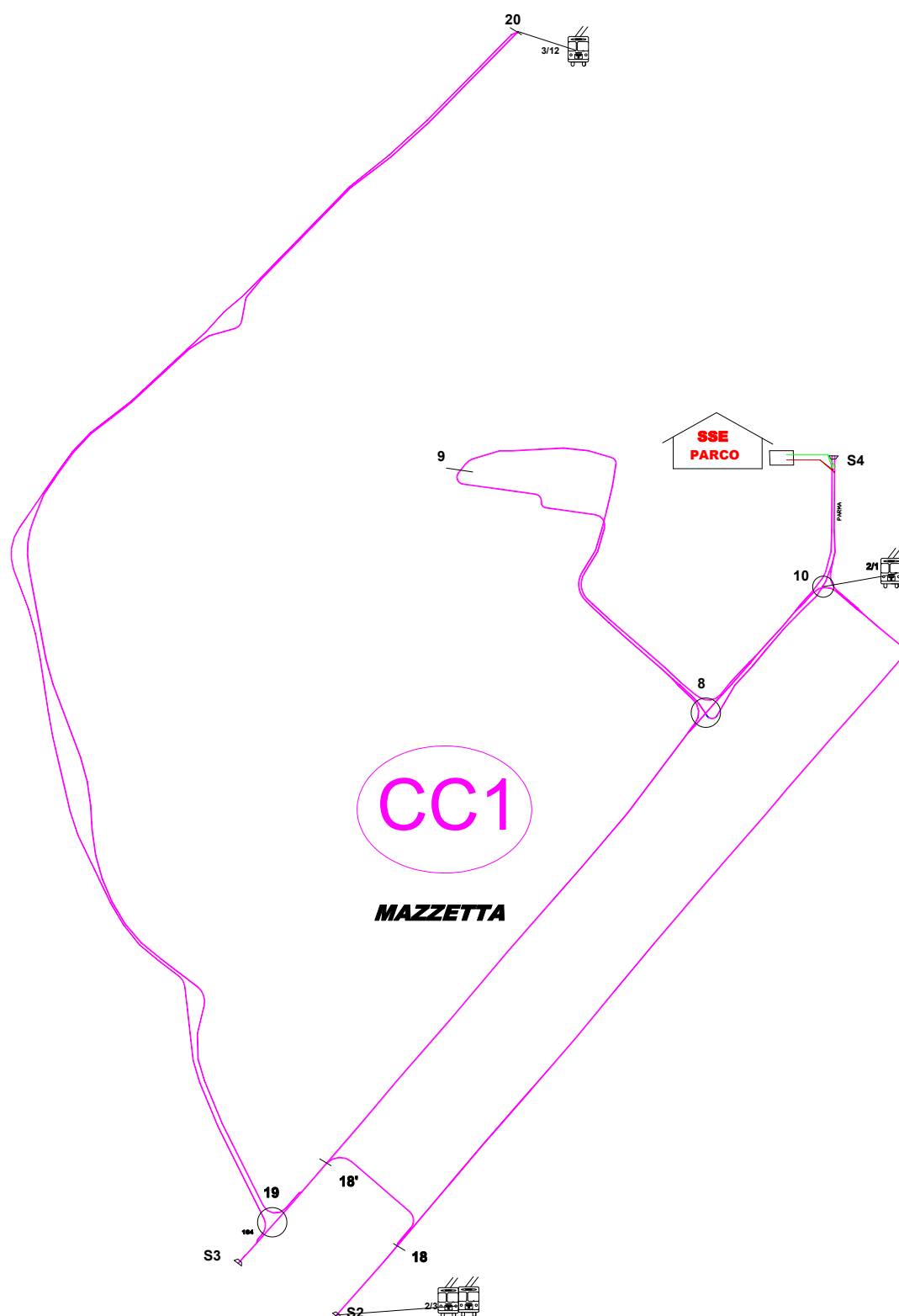


Figura 9 Sezione CC1

In Figura 9 è riportata la topologia della sezione CC1 alimentata dalla SSE Parco.

Tabella 11 Grandezze caratteristiche della sezione CCI

Tratta (ID nodo)	Lunghezza (m)	Sezione (mm ²)	Conduttanza (S)
S2-18	130	100	$G_{S2 \ 18} = 38.5$
18-181	130	100	$G_{18 \ 181} = 38.5$
18-10	870	100	$G_{18 \ 10} = 5.7$
10-S4	200	200	$G_{10 \ S4} = 50.0$
8-10	180	200	$G_{8 \ 10} = 55.6$
8-81	255	200	$G_{8 \ 81} = 39.2$
81-S9	70	100	$G_{81 \ S9} = 71.4$
81-S10	85	100	$G_{81 \ S10} = 58.82$
8-181	590	100	$G_{8 \ 181} = 8.5$
181-19	80	100	$G_{181 \ 19} = 62.5$
19-20	1556	200	$G_{19 \ 20} = 7.0$
19-S3	20	100	$G_{19 \ S3} = 250.0$

Tabella 12 CDT della sezione CCI

Nodo (ID nodi)	CDT ($V_{fin} - V_n$) (V)
S2	-119.80
18	-103.06
181	-98.59
10	-20.94
8	-22.83
81	-9.13
19	-106.11
20	-179.24
S3	-106.11
S9	-9.13

In queste condizioni di funzionamento, la potenza dissipata per effetto Joule sui conduttori è dell'ordine dei 86 kW, mentre la potenza fornita ai filobus è pari a 508 kW (rendimento 0.856).

6.7 Sezione CC2

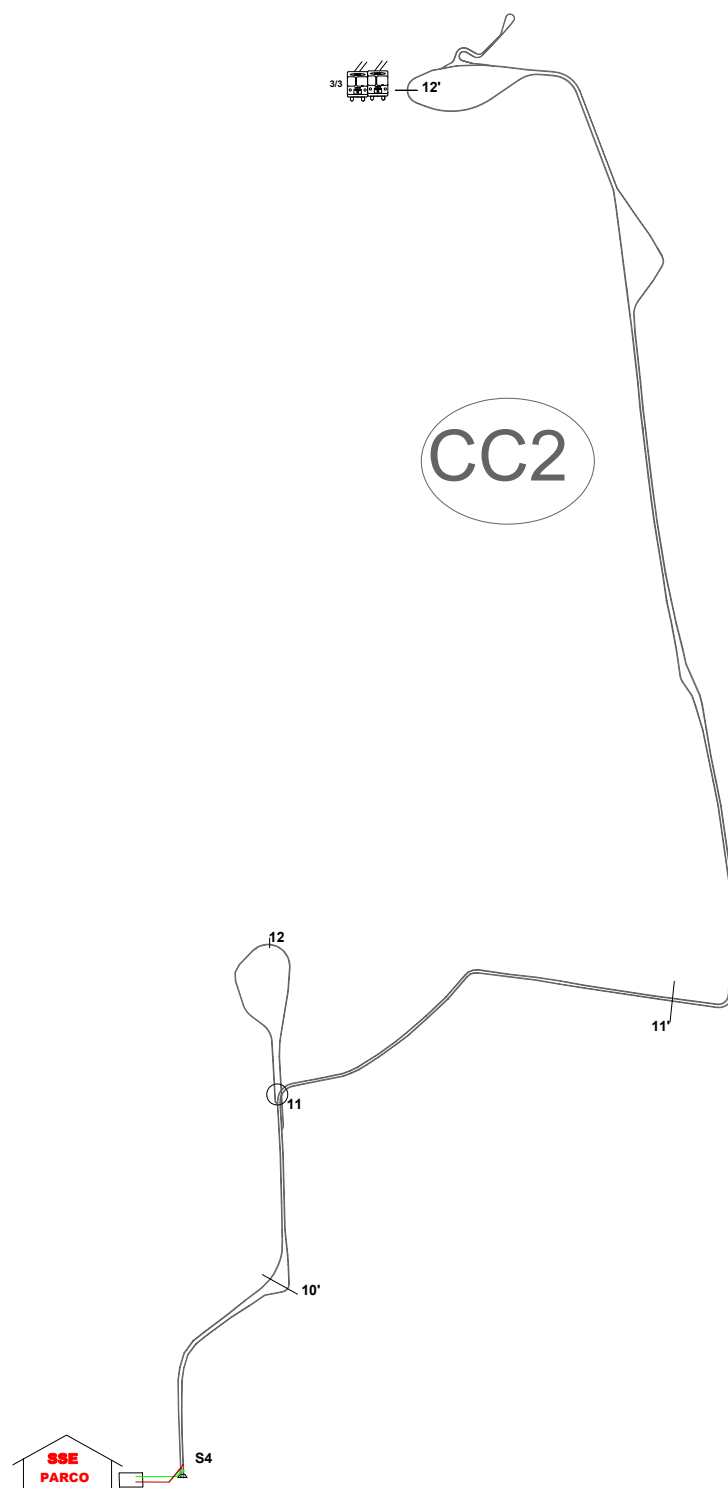


Figura 10 Sezione CC2

In Figura 10 è riportata la topologia della sezione CC2 alimentata dalla SSE Parco

Tabella 13 Grandezze caratteristiche della sezione CC2

Tratta (ID nodo)	Lunghezza (m)	Sezione (mm ²)	Conduttanza (S)
S4-101	243	200	GS4_101 = 41.1
101-11	190	200	G101_11 = 52.6
11-12	103	200	G11_12 = 97.1
11-111	463	200	G11_111 = 21.6
111-121	1676	200	G111_121 = 5.6

Trattandosi di un collegamento punto-punto con carico collegato all'estremo, si procede semplicemente con la legge di Ohm, ossia

$$R_{tot} = 2 \left(\frac{1}{GS4_{101}} + \frac{1}{G101_{11}} + \frac{1}{G11_{111}} + \frac{1}{G111_{121}} \right) = 0.42 \, \Omega$$

$$CDT = R_{tot} I_{18} = 165.6V$$

In queste condizioni di funzionamento, la potenza dissipata per effetto Joule sui conduttori è dell'ordine dei 53kW, mentre la potenza fornita ai filobus è pari a 189 kW (rendimento 0.779).

7 Considerazioni sui valori di CDT

L'unica sezione che presenta qualche criticità relativa alle CDT è la sezione CB1, con valori superiori ai 300V.

Si tratta chiaramente di una condizione temporanea e non permanente, che però deve essere confrontata con il regolare funzionamento dei filobus e con la norma CEI EN 50163 [S][T][U][V], di cui ne è riportato un estratto qua di seguito.

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

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

Devono essere osservati i seguenti requisiti:

- a) la durata delle tensioni tra $U_{\min 1}$ e $U_{\min 2}$ non deve superare 2 minuti;
 - b) la durata delle tensioni tra $U_{\max 1}$ e $U_{\max 2}$ non deve superare 5 minuti;
 - c) la tensione delle sbarre in sottostazione deve essere inferiore od uguale ad $U_{\max 1}$. Per le sottostazioni in corrente continua è accettabile che questa tensione di sbarra a vuoto si presenti inferiore od uguale ad $U_{\max 2}$, tenendo presente che, con la presenza del treno, la tensione al(ai) pantografo(i) del treno deve essere in accordo con la Tabella 1 e con i requisiti ivi indicati;
 - d) in condizioni normali di funzionamento le tensioni devono stare nel campo $U_{\min 1} \leq U \leq U_{\max 2}$;
 - e) in condizioni anormali di funzionamento, le tensioni nel campo $U_{\min 2} \leq U \leq U_{\min 1}$ in Tabella 1 non devono causare alcun danno o disservizio;
- NOTA 1: L'uso di apparecchi limitatori di potenza a bordo può limitare la presenza di una tensione bassa sulla linea di contatto aerea (vedere EN 50388)
- f) se si raggiungono le tensioni tra $U_{\max 1}$ e $U_{\max 2}$, questo livello deve essere seguito da un altro inferiore o uguale ad $U_{\max 1}$ per un periodo non specificato.

Le tensioni tra $U_{\max 1}$ e $U_{\max 2}$ non devono essere raggiunte che per condizioni temporanee come:

- frenatura a recupero;
 - azionamento in atto dei sistemi di regolazione come un commutatore di prese meccanico.
- g) tensione minima in funzionamento: in condizioni anormali di funzionamento il limite minimo della tensione alla linea di contatto per cui si ritiene che il rotabile possa funzionare è $U_{\min 2}$.

NOTA 2 Valori raccomandati per sgancio di minima tensione: la taratura del relé di minima tensione negli impianti fissi o a bordo dei rotabili dovrebbe essere posizionata tra l'85% e il 95% di $U_{\min 2}$.

Dalle CDT precedentemente ricavate è evidente che, nella condizione di funzionamento indicata da ATC e corrispondente ad una condizione particolarmente gravosa per la rete, esercendo il sistema a $V_n = 750V$ nominali, la condizione sulla tensione non permanente minima pari a $V_{\min} = 500V$ non sarebbe rispettata.

Qualora invece la tensione in uscita dalle SSE fosse mantenuta ad un valore superiore (con un massimo di $V_{\max} = 900V$) le CDT precedenti consentirebbero comunque di rientrare nei limiti imposti dalla norma.