



Politecnico di Torino

Tesi magistrale in ingegneria elettrica

Dimensionamento ed ottimizzazione di un  
sistema di accumulo per un treno transitante  
su una linea ad elettrificazione parziale

*Autore:* Gianluca Carena

*Relatore:* Angela Russo

*Relatore Inp:* Laurent Gerbaud

*Marzo 2020*

# Ringraziamenti

In primo luogo vorrei ringraziare la professoressa del Politecnico di Torino Angela Russo, che mi ha seguito passo a passo nella stesura di questa tesi.

Un grande ringraziamento va al mio relatore di Grenoble Laurent Gerbaud, che mi ha seguito nei sei mesi di tesi in azienda, dandomi tutte le nozioni teoriche necessarie e seguendomi nella stesura del rapporto in francese, che sarebbe stato pieno di errori senza il suo intervento. Allo stesso modo ringrazio Marie Poline, sulla cui tesi di dottorato si basa la mia tesi e che mi ha seguito per i primi mesi di lavoro. Ringrazio Bogdan Vulturescu, il mio tutor lato azienda e Guillaume, François, François Victor e tutto il piano dell' "Innovation Recherche" di SNCF, hanno reso il mio stage un momento di forte crescita linguistica e personale costellata di molti momenti divertenti.

Il ringraziamento più grande va a Francesca, che mi è stata vicina per questi cinque anni, mi ha supportato e amato, ha condiviso tutto di questo periodo con me, capendo meglio di tutti la ragione profonda di alcune difficoltà incontrate lungo questo percorso.

Un enorme ringraziamento va a mia madre, mio padre e mia sorella Francesca che hanno sopportato di vivere sotto lo stesso tetto con me, in questi 5 anni non facili. Hanno creduto in me fin dal primo giorno. Grazie ai nonni e agli zii di Stezzano e alla Sofi e grazie ai nonni e agli zii di Carignano. Un grande bacio a zia Ornella.

Voglio ringraziare i miei amici di Carignano, che sono stati tutto il percorso con me, incentivandomi più volte a non mollare tutto per la montagna e ad investire sul mio futuro. La spensieratezza e lo stare insieme sono state una delle benzine principali durante questa magistrale. Non elencherò tutti i nomi per brevità e perché, essendo amici di una vita, basta andare a leggersi la mia tesi di laurea triennale! Sanno inoltre benissimo il mio affetto nei loro confronti e sarebbe quasi un insulto ridurlo ad un elenco.

Ringrazio solennemente il gruppo incastro: Luca, Giorgio, Paolino, Stefano, Alex, Michi, Jacopone e Ross, per il sostegno, per l'amicizia e perché unica ragione pratica grazie al quale mi sono laureato.

Ora è giunto il momento di ringraziare quelli che sono stati i protagonisti del mio ultimo anno di vita: i miei amici Erasmus. In primo luogo voglio ringraziare tutto il quarto piano del Residence Berlioz: sono stati i veri protagonisti delle gioie e delle difficoltà di quest'anno all'estero, tra difficoltà linguistiche, scambi di culture e perdite di amici cari. Quindi grazie Josh, Alan, Niko, Clohe, Rebecka, Luis, Samuel, Costantin, Davide, Pier, Sissi, Daniela e Mika e tutte le persone adottate dal piano. Ringrazio inoltre con tutto il cuore le persone che hanno riempito le mie giornate francesi: tutti i componenti del grande gruppo "Je suis Baguette" e gli "OGs", sono stati parte di un'esperienza unica ed irripetibile. In particolare voglio ringraziare e ricordare Philip.

# Sommario

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>1 TRAZIONE ELETTRICA FERROVIARIA</b> .....	<b>4</b>
1.1 STORIA E SITUAZIONE ATTUALE .....	4
1.1.1 <i>Inizio della trazione elettrica ferroviaria in Italia</i> .....	4
1.2 SCOPO DELLA TRAZIONE FERROVIARIA .....	6
1.3 SISTEMI DI ALIMENTAZIONE .....	8
1.3.1 <i>Caratteristiche dell'alimentazione in corrente continua e in corrente alternata</i> .....	9
1.3.2 <i>Alimentazione DC</i> .....	10
1.3.3 <i>Alimentazione AC</i> .....	13
1.4 RIGENERAZIONE NEI SISTEMI DI TRAZIONE FERROVIARIA ELETTRICA .....	14
1.5 TIPOLOGIE SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA .....	15
1.5.1 <i>Batterie e super-condensatori</i> .....	17
<b>2 MODELLI E SIMULAZIONI PER LINEE FERROVIARIE AD ALIMENTAZIONE IN CORRENTE CONTINUA</b> .....	<b>19</b>
2.1 MODELLIZZAZIONE CIRCUITALE DI UNA LINEA ALIMENTATA IN CORRENTE CONTINUA .....	19
2.2 MODELLIZZAZIONE DEI TRENI .....	21
2.3 ANALISI CIRCUITALE DELLA RETE .....	22
2.4 CALCOLO DELLE TENSIONI PER UNA LINEA FERROVIARIA A SCALA .....	23
2.5 RAPPRESENTAZIONE GLOBALE RETE E RISOLUZIONE .....	25
2.6 METODO DI NEWTON RAPHSON .....	26
<b>3 PROGRAMMA DI SIMULAZIONE</b> .....	<b>29</b>
3.1 SIMULAZIONE DELLE LINEE FERROVIARIE .....	30
3.2 MODELLO DELLA LINEA FERROVIARIA .....	32
3.2.1 <i>Modellizzazione della linea elettrica</i> .....	32
3.2.2 <i>Modellizzazione dei treni</i> .....	33
3.2.3 <i>Modello delle sottostazioni elettriche</i> .....	34
3.3 MATRICE DELLE INCIDENZE .....	35
3.4 THE MODIFIED NODE APPROACH (MNA)- IL METODO NODALE MODIFICATO .....	35
3.4.1 <i>Caratteristiche generiche della matrice delle ammettenze nodali</i> .....	36
3.4.2 <i>Struttura globale della matrice delle ammettenze</i> .....	38
3.5 RISOLUZIONE DEL SISTEMA DI EQUAZIONI .....	38
3.6 GESTIONE ENERGETICA .....	39
3.6.1 <i>Calcolo della potenza massima erogabile dalla catenaria</i> .....	40
3.6.2 <i>Gestione energetica per soglia</i> .....	41
3.6.3 <i>Gestione elettrificazione parziale</i> .....	42
<b>4 PRESENTAZIONE DEL CASO STUDIO</b> .....	<b>44</b>
4.1 MODELLIZZAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA BORDEAUX - LE VERDON SUR LA MER .....	45
4.2 ANALISI "MATTINA INFRASETTIMANALE" .....	46
<b>5 MODIFICHE DEL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE</b> .....	<b>48</b>
5.1 INSERIMENTO DELLE ZONE NON ALIMENTATE .....	48

5.1.1	<i>Potenza fornita dalla catenaria nulla</i> .....	48
5.1.2	<i>Modifica della modellizzazione linea</i> .....	50
5.1.3	<i>Verifica valori correnti delle sottostazioni elettriche</i> .....	52
5.2	MODIFICA GESTIONE ENERGETICA .....	54
5.3	MODELLIZZAZIONE DELLE BATTERIE .....	55
5.3.1	<i>Presentazione modulo Toshiba</i> .....	56
5.3.2	<i>Test di carica e scarica di una singola cella</i> .....	57
5.3.3	<i>RACK ferroviario</i> .....	58
5.3.4	<i>Algoritmo di gestione energetica della batteria</i> .....	59
<b>6</b>	<b>STUDIO IMPATTO IBRIDAZIONE SU UNA LINEA URBANA DI PARIGI</b> .....	<b>61</b>
6.1	VARIAZIONE DEL CONSUMO DI ENERGIA DELLE SSE .....	61
6.2	VARIAZIONE DELLA TENSIONE DELLA LINEA DI CONTATTO .....	62
6.3	VARIAZIONE DELLA POTENZA DISSIPATA DAL FRENO MECCANICO .....	63
<b>7</b>	<b>PRIMI RISULTATI DI SIMULAZIONE PER LA LINEA BORDEAUX-VERDON</b> .....	<b>65</b>
7.1	CONVALIDA MODELLO .....	68
7.2	MODIFICA DELLA GESTIONE ENERGETICA E VERIFICA SOC NELLO SCENARIO PIÙ SFAVOREVOLE .....	70
7.3	STUDIO FATTIBILITÀ DI DIVERSI SCENARI DI NON ELETTRIFICAZIONE.....	72
7.3.1	<i>Scenario di non elettrificazione 2: tre zone non elettrificate, percentuale di non elettrificazione 45%</i> ....	73
<b>8</b>	<b>PROBLEMI DI OTTIMIZZAZIONE E SOFTWARE PER IL DIMENSIONAMENTO</b> .....	<b>75</b>
8.1	METODO DIRETTO .....	75
8.2	METODO INVERSO .....	76
8.3	ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE .....	76
8.4	UTILIZZO DEL SOFTWARE CADES.....	77
8.4.1	<i>Funzionamento del software CADES</i> .....	78
8.4.2	<i>Dimensionamento di un pacco batterie con un metodo di ottimizzazione</i> .....	80
	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>82</b>
8.5	RISULTATI .....	82
8.6	SVILUPPI FUTURI.....	83
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>89</b>

# Introduzione

In questa tesi si tratterà di modellizzazione e di simulazione utilizzati a sostegno della ricerca e dell'innovazione in campo ferroviario.

Il lavoro di tesi nasce dalla collaborazione tra la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), compagnia francese leader del settore ferroviario, e il laboratorio di ingegneria elettrica G2elab di Grenoble. Il lavoro di tesi si è svolto in parte presso il G2elab, a Grenoble, ed in parte presso SNCF a Parigi. La collaborazione tra le due realtà nasce dalla necessità di SNCF di utilizzare software di simulazione per analizzare progetti futuri e di valutarne la fattibilità pratica e la convenienza economica-energetica.

In Francia, come nel resto d'Europa, le regole ed i limiti riguardanti l'uso del combustibile diesel sono sempre più stringenti. Il settore ferroviario sarà colpito, come il settore automobilistico, ed è allora necessario giocare d'anticipo. Presso SNCF sono attualmente diversi i progetti di ottimizzazione energetica e decarbonizzazione seguiti, sia a livello sperimentale, sia già in fase di progetto e realizzazione.

Le linee ferroviarie sono alimentate tramite delle linee elettriche, chiamate linee di contatto o catenaria. Uno dei problemi tecnici da considerare è la caduta di tensione sulla catenaria. Le norme ferroviarie regolano i limiti entro cui devono stare i valori di tensione, per mantenere continuità di servizio e rispettare determinati standard di sicurezza. Al giorno d'oggi, in Francia, l'utilizzo principale del Diesel è quello di integrare la potenza fornita dalla linea di contatto, per limitare le cadute di tensione. In caso di una linea ad alta densità di traffico questa è una situazione piuttosto frequente. Una delle principali sfide del contesto ferroviario è quindi di garantire la continuità del servizio, sostituendo la funzione del diesel con sistemi di accumulo d'energia, quali fuel-cell, batterie e super-condensatori.

Lo scopo del mio lavoro di tesi è stato quello di apprendere il funzionamento di un software di simulazione e modificarlo per poter analizzare anche linee ferroviarie ad elettrificazione parziale. Il software di simulazione utilizzato, sviluppato da Marie Poline, durante il dottorato presso il G2elab, in C++, permette di analizzare i dati di una missione ferroviaria e simulare il tragitto dei treni e la loro interazione con la linea elettrica. Inoltre, è in grado di risolvere un algoritmo di gestione energetica con lo scopo di monitorare la tensione sulla linea elettrica ed evitare sovraccarichi della catenaria utilizzando un sistema di accumulo di energia formato da batterie al litio e super-condensatori.

Durante il lavoro di tesi, dopo aver analizzato il software di simulazione, è stato necessario fare le modifiche per poter analizzare anche linee ferroviarie ad elettrificazione parziale. Per linee ad

elettrificazione parziale si intendono delle linee in cui alcune sezioni non sono alimentate dalla catenaria e dove l'unica fonte di energia rimane il sistema di accumulo a bordo del treno. In particolare, sono state svolte le seguenti attività:

- Studio del programma C++, comprensione della logica di programmazione e dell'ingegneria elettrica implicata nell'ambito ferroviario
- Studio della modellizzazione della linea ferroviaria e della risoluzione di sistemi complessi non lineari tramite l'algoritmo di Newton
- Modifica dell'algoritmo di gestione energetica per adattarlo alla presenza di zone non elettrificate
- Modifica della modellizzazione della linea ferroviaria, per rappresentare delle zone non elettrificate
- Creazione di un algoritmo che tenga conto del variare delle prestazioni della batteria (tensione e corrente massima) al variare della percentuale di carica SoC
- Dimensionamento pacchi batterie, tramite il software di simulazione, per diversi casi studio
- Dimensionamento per ottimizzazione della lunghezza ideale delle zone non elettrificate per minimizzare il costo totale, considerando il costo delle batterie, dell'infrastruttura e costi di servizio.

L'idea iniziale era di dedicare meno tempo alla parte di modellizzazione (Grenoble) e più tempo invece alla parte di simulazione e verifica di fattibilità di un nuovo progetto. In corso d'opera si è però reso necessario anche una modifica della modellizzazione, che ha reso il lavoro più interessante, ma anche più complesso. Un'attenzione da porre, nell'utilizzo e nella modifica di questo software di simulazione e la risoluzione tramite Newton-Raphson, che si è dimostrato uno strumento solido, ma allo stesso tempo necessità di una buona stima delle condizioni iniziali.

La prima parte del lavoro di dimensionamento è consistita nell'utilizzo del metodo diretto: si stabiliscono le caratteristiche dimensionanti in ingresso al modello (dimensioni batteria lunghezza zone non elettrificate, ecc.) e si valutano le prestazioni tramite la simulazione. Nel caso in cui queste non soddisfino le aspettative (per esempio la batteria non è sufficiente), sarà necessario cambiare manualmente i parametri d'ingresso. Questo metodo può risultare scomodo in presenza di modelli composti da molte variabili dimensionanti.

La seconda parte del lavoro è consistita nell'utilizzo del software di simulazione per analizzare vari casi studio. Il primo studio è stato fatto, con il software di simulazione non modificato, su una linea urbana e suburbana di Parigi, la cui flotta è composta da 69 treni, attualmente alimentati da una linea in corrente continua e da un motore diesel. L'analisi si è concentrata sui benefici della presenza di treni ibridi, quindi l'introduzione di un sistema di accumulo a bordo di treni alimentati a diesel e catenaria. Il secondo caso studio è stato la linea Bordeaux-Verdon sur mer, una linea antiquata

nell'ovest della Francia. Per quest'analisi è stato utilizzato il software di simulazione modificato per valutare l'impatto di sezioni di linea non elettrificate e le relative batterie necessarie. Lo scopo è stato di valutare le dimensioni del bacco batteria relativamente a determinati scenari di non elettrificazione.

La parte finale del lavoro di tesi è invece dedicata ad un altro software, chiamato Cades. In questo software si può inserire il modello di simulazione (scritto in C++) e lo si può analizzare tramite un algoritmo di ottimizzazione. La differenza rispetto alla precedente tecnica di dimensionamento, è che le variabili in ingresso non sono fisse, o cambiate manualmente, ma vengono variate dall'algoritmo automaticamente, al fine di ottenere un valore minimizzato (o massimizzato) di una funzione obiettivo (il costo totale per esempio).

# 1 Trazione elettrica ferroviaria

## 1.1 Storia e situazione attuale

La trazione elettrica supportata da un'infrastruttura atta al rifornimento energetico nasce nel 1879, con l'ingegnere Werner von Siemens che mostrò una locomotiva alimentata a 150 V in corrente continua alla "Berlin exhibition" con la tecnologia "third rail current". Nel 1883 a Brighton venne applicata per la prima volta la stessa tecnologia, su una linea ferroviaria reale [1].

Dopo alcuni anni, la tecnologia della trazione elettrica ferroviaria si diffuse in Europa nel settore tramviario e nel 1886 arrivò negli Stati Uniti con la prima rete tramviaria in Alabama. Uno dei motivi di successo della trazione elettrica a sfavore di quella al vapore è stata la pericolosità di quest'ultima in contesti urbani, a causa dei gas e dei fumi che spesso provocavano gravi incidenti [1].

### 1.1.1 Inizio della trazione elettrica ferroviaria in Italia

Il passaggio da un esclusivo uso tramviario ad un utilizzo ferroviario in Italia iniziò nel 1897, dove il ministro dei trasporti propose tre opzioni sperimentali per tre tratte diverse:

- trazione supportata da accumulatori sulla linea Milano-Monza e Bologna-San Felice sul Panaro

- Trazione in corrente continua a 650 V per la tratta Milano- Varese

- Trazione ad alimentazione trifase in Valtellina

Tra tutte le opzioni l'esperimento Valtellinese si rivelò il più lungimirante, nonostante tutte le difficoltà legate all'introduzione del motore a induzione, in un ambito dove la trazione a corrente continua aveva sempre dominato. Inoltre, presto si ritenne necessario utilizzare un'alimentazione ad alta tensione, necessaria per sostenere una richiesta di più di 1 MW da parte delle grandi locomotive merci, senza eccedere un limite di corrente allora fissato a 300 A [1].

Con l'installazione di impianti idroelettrici e termoelettrici la penisola inizia a popolarsi di linee ferroviarie alimentate in corrente alternata; una delle frequenze di alimentazione che è stata più usata nella prima metà del ventesimo secolo è stata la 16 2/3 Hz. Dagli anni '30 si preferì usare un'alimentazione in continua a 3000 V; lo svantaggio principale dato dall'alimentazione trifase era il limite di velocità di circa 100 km/h; le locomotive a vapore potevano spesso raggiungere 130 km/h [1].

A fine 900 l'esigenza di avere tensioni elevate, per poter fornire grandi potenze utilizzando correnti contenute, portò a diverse soluzioni a seconda dell'area interessata. In Germania e negli USA, per esempio, si favorì un'alimentazione a 15 kV monofase opportunamente trasformata, per alimentare i motori, da trasformatori installati direttamente sulla locomotiva[1].

A fine secolo, mentre in Italia ci furono le prime linee alimentate a 4000 V in continua (Torino-Ceres), in alcune aree dell'Europa si ritenne opportuno mantenere una tensione più contenuta, come nel sud della Francia dove la maggior parte delle linee ferroviarie dell'epoca vennero progettate in 1500 V DC.

La situazione ferroviaria europea attuale è in controtendenza rispetto ad un'epoca in cui l'obiettivo spesso è di uniformarsi a livello tecnologico, specialmente dal punto di vista dei trasporti. Come si può in fatti vedere dalla figura 1 la tipologia di alimentazione elettrica per la trazione ferroviaria è molto eterogenea sul territorio Europeo [1].

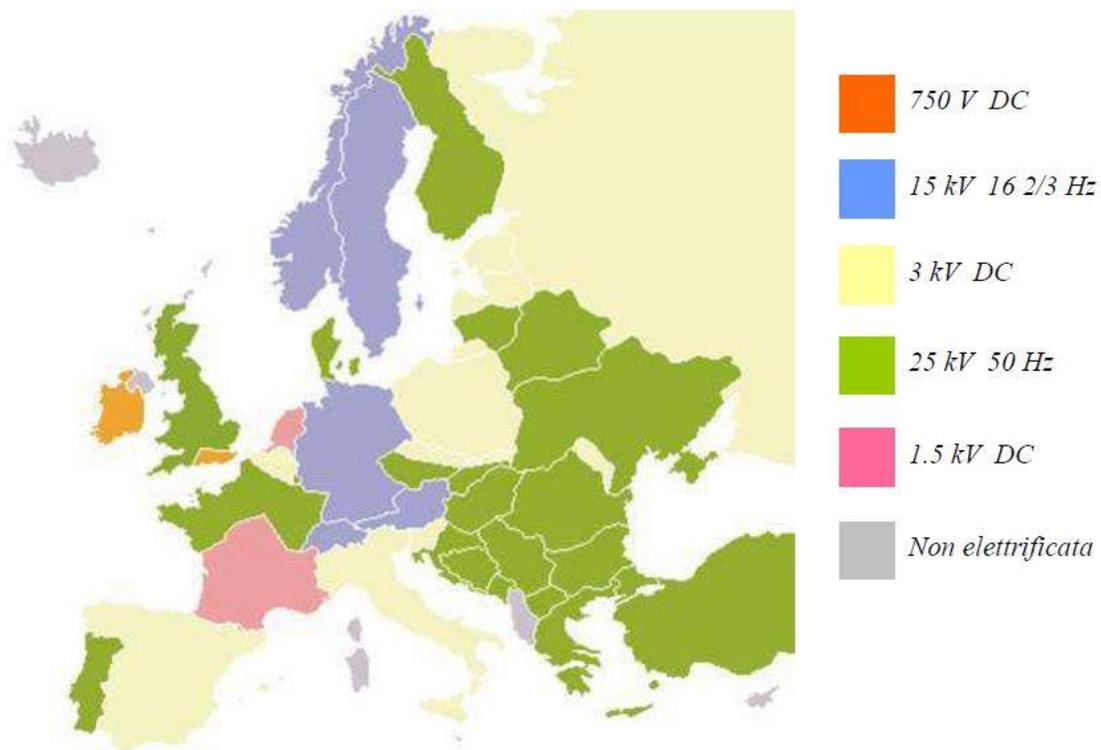


Figura 1 : Principali tipi di alimentazione ferroviaria in Europa. [1]

- Reti monofase alla frequenza di 16 2/3 Hz alla tensione di 15 kV in Germania, Austria e Svizzera e nel nord Europa in Svezia e Norvegia (negli Stati Uniti la frequenza è di 25 Hz per una tensione di 11 12 kV)
- Reti alimentate in corrente continua a 1500 V nel sud della Francia ed in Olanda
- Reti in continua alimentate a 3000 V in Italia, Spagna , Polonia, Russia e in alcuni paesi Baltici

- Reti monofase a frequenza di 50 Hz alimentate a 25 kV nel nord della Francia , in Spagna ed in Italia, per il servizio dell'alta velocità.

La maggior parte degli elementi di una moderna ferrovia elettrica possono essere ritrovati nella tecnologia degli anni 90, in particolar modo per i metodi di alimentazione e per la struttura dei motori di trazione. Un aspetto che si è evoluto più tardi riguarda i sistemi di controllo, che si sono evoluti in particolar modo a partire dal 1990.

## 1.2 Scopo della trazione ferroviaria

In generale, la resistenza al moto di un treno è espressa dall'equazione di Davies [2]:

$$R(v) = A + B + C \cdot V^2 + Mt \cdot g \cdot grad \quad (1.1)$$

Dove A,B e C sono coefficienti ricavati in modo sperimentale in una situazione di frenata del treno, partendo da una velocità V, fino al suo arresto totale. Le variabili rappresentano:

- V: velocità istantanea del treno
- Mt :masse del treno
- G: accelerazione gravitazione
- Grad: gradiente dominante

Indicando con TE (traction effort) la forza di trazione esercitata dai motori, è possibile esprimere l'accelerazione del treno in questo modo [2]:

$$at = [TE(v) - R(v)] - Mt \quad (1.2)$$

In generale si può notare che ad alte velocità è il fattore aereodinamico a determinare maggiormente la resistenza al moto. E' possibile ricavare una curva generica che rappresenti la maggior parte dei sistemi di trazione [3], in cui si riporta lo sforzo di trazione in funzione della velocità della locomotiva. Per velocità basse o nulla lo sforzo di trazione equivale allo sforzo massimo a macchina ferma, a causa del grande carico inerziale. Questo sforzo è di solito mantenuto fino a quando la locomotiva raggiunge la massima potenza (figura 2) ; questa può essere mantenuta in un intervallo di velocità specifico ( caratteristico per ogni treno e motore) fino al limite elettrico o termico dei motori.

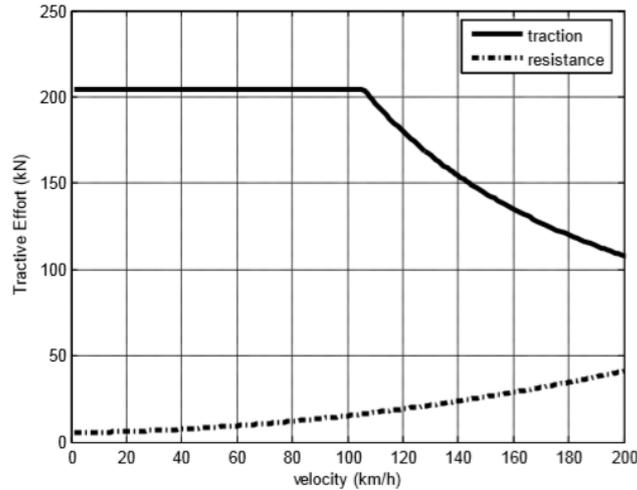


Figura 2 : Andamento dello sforzo di trazione in funzione della velocità per un treno. [3]

Nell'ambito della trazione ferroviaria, un dato importante è rappresentato dalla forza di attrito tra le ruote e la ferrovia, in quanto esso limita fisicamente la capacità di accelerazione e di frenata del treno. La forza frenante e lo sforzo di trazione massimi possono essere ricavati con un'unica espressione:

$$TE = FT = \mu \cdot Mt \cdot g \quad (1.3)$$

Il termine  $\mu$  è chiamato coefficiente di attrito ed è riferito sia al caso di accelerazione che al caso di frenatura. Il coefficiente di attrito determina inoltre il danno che viene provocato alle ruote e alle rotaie in caso di slittamento, i valori sono quindi limitati da una norma ferroviaria che varia per ogni compagnia ferroviaria. Per valori alti di  $\mu$  si ha la possibilità di accelerare e decelerare più rapidamente, ma allo stesso tempo le rotaie vengono danneggiate ed usurate maggiormente.

Assumendo una distribuzione omogenea della massa del treno sugli assi, la massima accelerazione raggiungibile (o la frenata, cambiando di segno il parametro  $\mu$ ) è uguale a:

$$at = g \cdot p \cdot \mu \quad (1.4)$$

dove  $p$  è detta proporzione degli assi motorizzati: il rapporto tra il numero di assi motorizzati ed il peso del vagone.

In situazioni in cui sia necessaria la possibilità di accelerare o frenare bruscamente è quindi necessario avere una proporzione degli assi motorizzati alta. Il limite di accelerazione viene quindi imposto dal numero di motori presenti sul treno, considerando però che l'introduzione di nuovi motori comporta un aumento del peso del treno. Uno dei vantaggi dell'utilizzo di trazione elettrica con una struttura di alimentazione è la possibilità di avere una fonte inesauribile di alimentazione

(che non influenza la massa della locomotiva) e la possibilità di raggiungere grandi potenze, fino a 1.6 MW per asse (dato del 2014) [2].

### 1.3 Sistemi di alimentazione

Le reti ferroviarie sono solitamente alimentate dalla rete elettrica nazionale, quindi l'energia è prelevata da una rete ad alta tensione. Nella figura 3 con gruppo di produzione si intende qualsiasi produttore che venda energia alla rete in questione (centrali termoelettriche, centrali idroelettriche ecc.). In seguito, la tensione può essere trasformata ad una tensione di valore inferiore, che è la tensione normalmente in ingresso alle sottostazioni elettriche. Le sottostazioni elettriche (indicate con un quadrato verde in figura 3) sono delle strutture di conversione elettrica che alimentano la cosiddetta linea di contatto. Le sottostazioni elettriche (SSE) sono distribuite regolarmente lungo la linea ferroviaria.

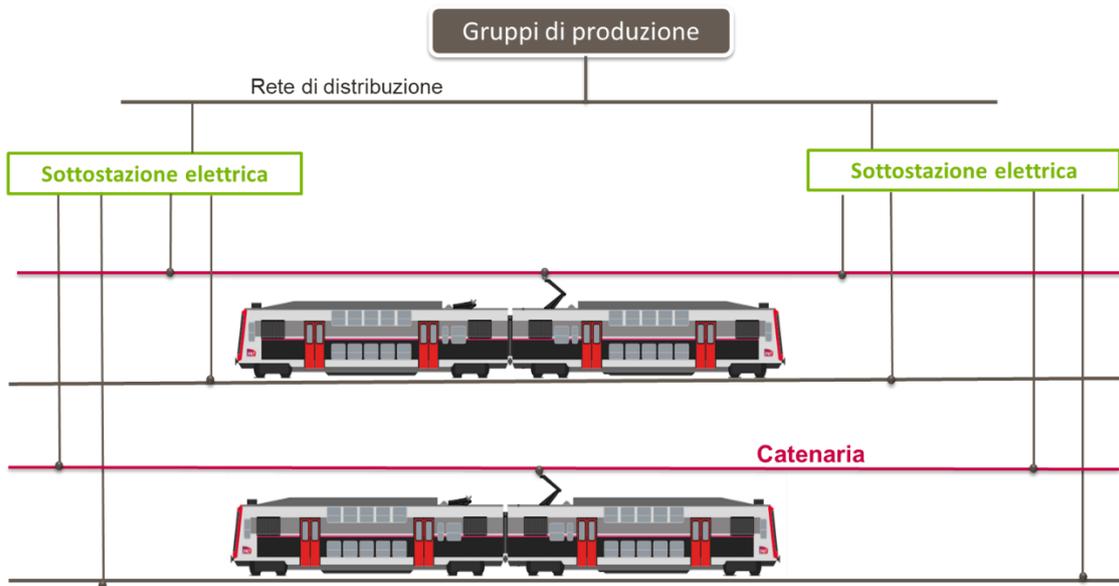


Figura 3: Struttura generica di un sistema di alimentazione ferroviario [4]

Il treno viene collegato alla linea elettrica, chiamata nel caso specifico catenaria, da un pantografo, un contatto strisciante sul conduttore di alimentazione. L'attrezzatura a bordo del treno funziona correttamente se è garantita una continuità di tensione, se questa viene a mancare e la tensione scende al di sotto del valore nominale, sarà interrotto il servizio. Nella figura 4 è riportato lo schema di funzionamento di un sistema a trazione elettrica (nel caso dell'immagine in DC) dov'è possibile riconoscere la rete principale a monte, le sottostazioni elettriche e la catenaria che alimenta il treno tramite il pantografo. Come detto precedentemente, la tensione di rete a 33 kV viene abbassata tramite trasformatori di alta potenza a 11 kV, tensione d'ingresso per la sottostazione (feeder station). La SSE è responsabile dell'ulteriore abbassamento della tensione (ad un valore che dipende

dal tipo di trazione ferroviaria) ed eventualmente della conversione in corrente continua (indicata con il diodo in figura 4), nel caso di trazione elettrica in DC.

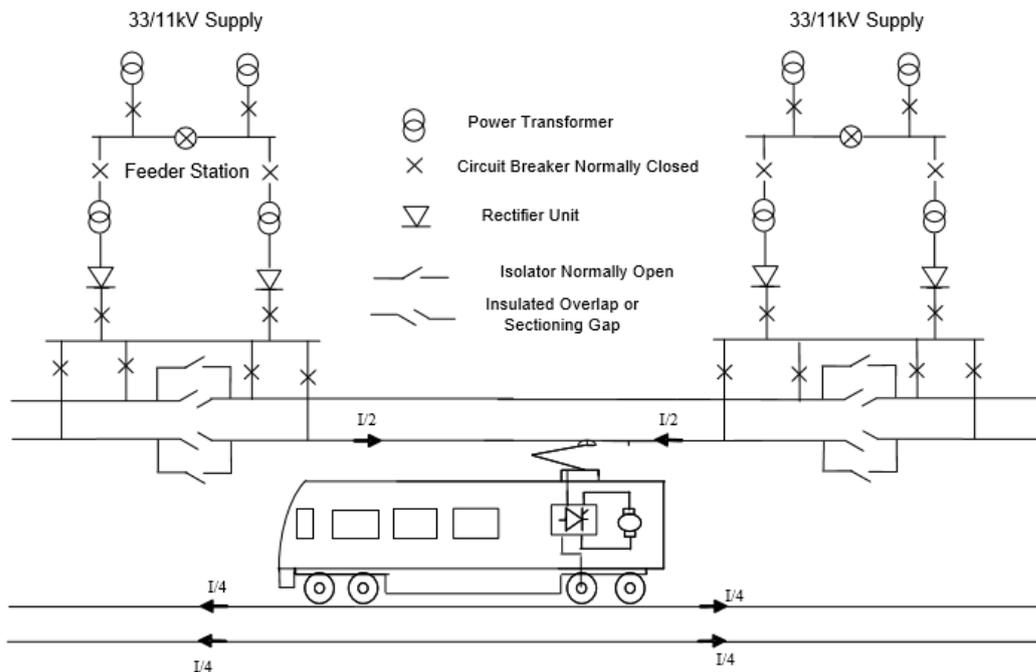


Figura 4 : Schema di alimentazione di una linea metropolitana a 750 V DC nel Regno Unito. Le tensioni di alimentazione hanno valori diversi da quelli usati normalmente in Italia [5]

### 1.3.1 Caratteristiche dell'alimentazione in corrente continua e in corrente alternata

In Italia, ma anche nella maggior parte dei paesi europei, l'alimentazione di rete viene fornita in AC, solitamente ad una frequenza di 50 Hz, per una maggiore reperibilità su scala nazionale e per la facilità di trasformazione.

A livello europeo l'alimentazione in DC è sempre preferita nel contesto urbano, dove le norme di sicurezza impongono una bassa tensione (spesso limitata a 750 V) e dove le distanze tra le sottostazioni sono ridotte, si perde quindi il grande vantaggio che l'AC ha sulla DC nella trasmissione. Data la bassa tensione si ricorre quindi all'utilizzo di grandi correnti e dunque le impedenze dei conduttori crescono di conseguenza.

Per lo stesso conduttore infatti, l'impedenza è più elevata se la trasmissione avviene in corrente alternata, sia a causa dell'induttanza che si forma tra i conduttori (circa 1 mH/km) sia per l'effetto pelle (per una frequenza di 50 Hz la resistenza apparente aumenta di circa il 50 per cento rispetto ad un'alimentazione in corrente continua). La caduta di tensione chilometrica è dunque più bassa per un sistema a bassa tensione DC che per uno AC, dunque è possibile avere una densità minore di

sottostazioni elettriche. Per lo stesso motivo l'alimentazione in AC è possibile, a livello ferroviario, solo tramite tensioni elevate [5].

Nell'elenco sottostante sono indicati i principali tipi di alimentazione usati nell'ambiente ferroviario ed i loro impieghi [2]:

- 600-1200 V DC: Normalmente questo range di tensioni è usato per alimentare tram, metro e ferrovie suburbane di lunghezza minore. L'alimentazione può avvenire sia tramite catenaria che tramite terza via, (nel caso di una metropolitana si ridurrebbe l'altezza necessaria del tunnel, quindi si avrebbe un buon risparmio economico).
- 1400-1500 V DC: Elettrificazione del mio caso studio. Questa soluzione è la più diffusa per metropolitane e sistemi tramviari ed è anche una soluzione piuttosto economica. In alcuni paesi europei, come nel sud e nell'est della Francia, o in Olanda, sono ancora ampiamente diffusi sia per trasporto merci che per persone, sistemi che utilizzano un'alimentazione 1500 V DC.
- 3000 V DC: questi sistemi di alimentazione sono molto utilizzati in Italia (dove rappresentano la quasi totalità delle linee di trazione, esclusa l'alta velocità), Belgio, Polonia e Spagna.
- 11 kV-15 kV, 16 e 2/3 Hz: Si tratta del primo sistema in corrente alternata, nato per adattarsi alle macchine già esistenti, dalla capacità di commutazione ridotta. Per l'elevato investimento necessario per passare a 50 Hz, la tecnologia viene ancora utilizzata in Germania, Austria e altri paesi europei. Per ragioni analoghe, negli Stati Uniti, viene usata un'alimentazione 11kV ad una frequenza di 25 Hz per alcuni tratti di alta velocità.
- 25 kV 50/60 Hz: Questo tipo di elettrificazione è il più diffuso per le principali linee ferroviarie ad alta velocità; delle possibili problematiche potrebbero sorgere solo con tunnel che non permettano l'installazione di catenaria o aree dove vi sia un'ingente elettrificazione preesistente di altro tipo.
- 50 kV 50/60 Hz: L'alimentazione a 50 kV è talvolta utilizzata per ferrovie per trasporti pesanti; una simile tensione richiede speciali strutture e interruttori per essere gestita, ne consegue dunque un elevato prezzo di installazione.

### 1.3.2 Alimentazione DC

Una linea ferroviaria alimentata in DC necessita di un sistema di conversione e di trasformazione più complesso di una linea alimentata in AC. Deve essere infatti considerata tutta la parte di elettronica di potenza per garantire una conversione AC-DC. Nella figura 5 è riportato uno schema che mostra l'organizzazione della rete di alimentazione e in che modo le sottostazioni elettriche sono alimentate. In sintesi, si ha la rete AC trifase (alta o media tensione), le sottostazioni (TPSS nella

figura 5) in cui avviene la conversione dell'energia e il circuito di trazione (alimentato in corrente continua).

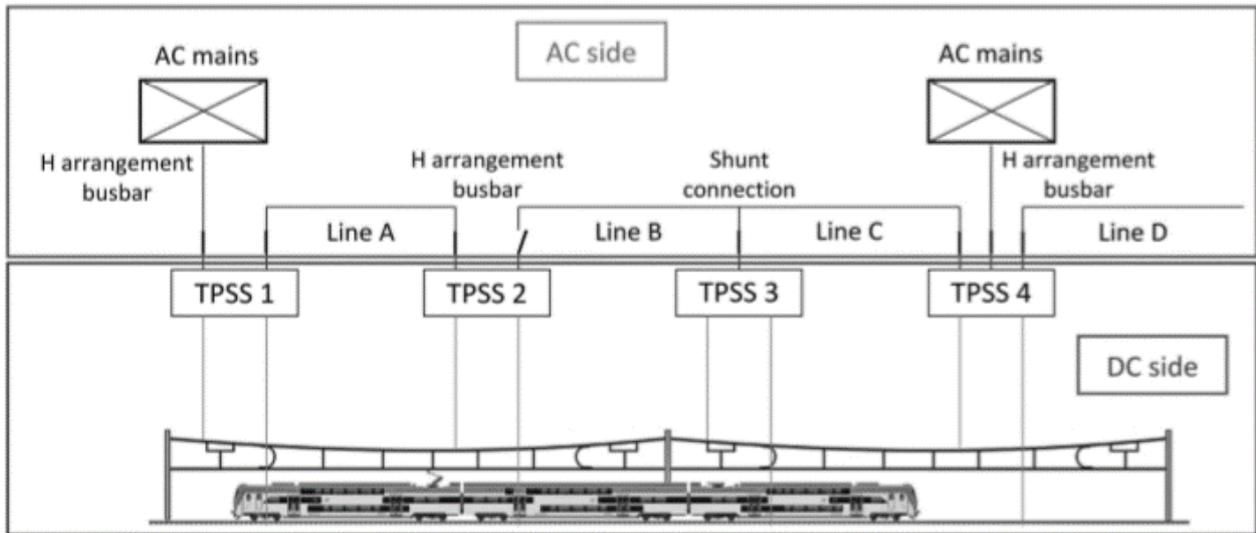


Figura 5 : Sistema di trasmissione e alimentazione per una rete di alimentazione DC. [6]

In generale è auspicabile avere ridondanza in tutti i componenti del sistema d'alimentazione, poiché è di vitale importanza mantenere la continuità di servizio. Nella figura 5 la potenza elettrica è fornita da due reti in corrente alternata differenti per questa ragione. Spesso si hanno anche più vie equivalenti che alimentano la sottostazione elettrica.

Tipicamente la struttura di una sottostazione elettrica può essere pensata come divisa in un lato AC ed in un lato DC. I principali componenti di una sottostazione (cerchiate nell'immagine sottostante) sono [2]:

- Doppio trasformatore per garantire la corretta tensione d'ingresso al ponte raddrizzatore (normalmente in ingresso si ha una media tensione come 11 kV ,tensione per lo più utilizzata nel Regno Unito, ed in uscita la tensione alla quale opera il raddrizzatore)
- Interruttori automatici per la protezione da guasti;
- AC switch per selezionare l'alimentazione
- Ponti raddrizzatori a diodi al silicio
- DC switch per selezionare quale raddrizzatore deve essere in funzione
- Interruttori DC ad alta velocità, presenti per la difficoltà di interrompere una grande corrente DC in un circuito induttivo

Nella figura 6 è raffigurata la struttura di una singola sottostazione elettrica più nello specifico, e sono suddivisi chiaramente il lato corrente alternata e il lato corrente continua.

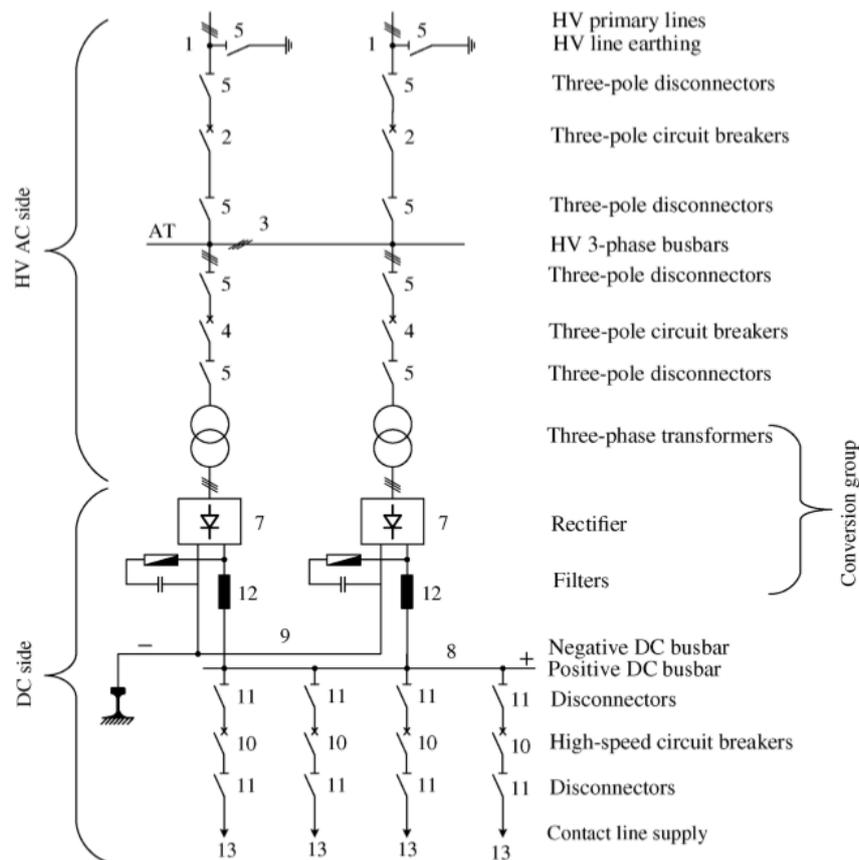


Figura 6 : Dettaglio della struttura di una tipica sottostazione elettrica. [5]

La sottostazione è solitamente alimentata da una linea aerea. La linea di alimentazione è predisposta di sistemi di sicurezza, circuito di terra e normalmente è anche provvista di un sistema di controllo remoto.

In generale, a seconda della densità di traffico sulla linea e della tensione di alimentazione, la distanza tra le sottostazioni elettriche varia a 3 a 9 km. Nel caso di linee molto datate si possono trovare anche distanze di 20-30 km, che dunque necessiteranno di fonti di potenza alternative per mantenere la tensione nell'intervallo di valori ammissibili [5].

Il motore di trazione e il sistema di controllo devono essere adeguatamente isolati dalla tensione operativa della linea di alimentazione. I motori in corrente continua sono progettati per operare con tensione 600/750 V, connessi in parallelo se l'alimentazione è fornita a 600/750 V o in serie se l'alimentazione è a 1500 VDC.

I sistemi di alimentazione ferroviaria, in corrente continua, sono normalmente raggruppabili in due differenti categorie: tramite linea aerea o tramite terra. Per basse tensioni (ambito metropolitano)

vengono normalmente utilizzati metodi di alimentazione di terra, che utilizzino una parte di binario aggiuntiva come conduttore. Il metodo più utilizzato è quello della terza rotaia, dove il treno forma un contatto elettrico con la rotaia attraverso un pattino che striscia o una ruota laterale, è il metodo più economico perché comporta minori costi di isolamento. In contesti di metropolitane è anche spesso utilizzato il metodo della quarta rotaia, che consiste nell'avere su una via un potenziale negativo e sull'altra un potenziale positivo. Questa possibilità è molto usata in contesti urbani e per le metropolitane, perché diminuisce di molto le correnti disperse nel terreno e quindi i fenomeni corrosivi connessi [5].

In alternativa, per linee di alimentazione DC con tensione 750/1500/3000 V, la trasmissione avviene per via aerea. La trasmissione di energia elettrica ad alta tensione porta numerosi vantaggi e quando questa può avvenire in linea aerea i rischi per il personale sono notevolmente minori e il fenomeno della corrosione per correnti disperse assente.

### 1.3.3 Alimentazione AC

In generale la struttura di alimentazione di una linea ferroviaria in AC è abbastanza simile alle strutture precedentemente illustrate. Le principali differenze risiedono nel fatto che in questo caso non è necessario alcun passaggio di conversione AC/DC e che in generale è di interesse per la linea essere alimentata ad una tensione particolarmente elevata. I principali componenti di una sottostazione elettrica per alimentazione in AC sono [2] [5] :

- Doppio trasformatore connesso a due diverse coppie di fasi per distribuire il carico equamente sulle tre fasi (trasformatori da 20 MVA ciascuno portano la tensione da 132/275/400 kV a 25/50 kV)
- Interruttori per proteggere la linea da guasti della ferrovia o della sottostazione
- Interruttori di metà linea, per garantire una maggiore flessibilità e indipendenza tra due sottostazioni durante un guasto della catenaria

La tensione di trazione è prelevata ad un valore più alto possibile, per evitare che i problemi di armoniche e di oscillazioni abbiano troppo impatto sulla linea. Nelle situazioni in cui la richiesta di potenza del motore sia relativamente grande, rispetto alla potenza di cortocircuito della linea, sono installati filtri armonici all'interno delle sottostazioni e circuiti di correzione del fattore di potenza a bordo dei treni.

Il numero di sottostazioni elettriche e la distanza fra di esse dipende principalmente da due fattori: la dimensione del sistema di elettrificazione e la domanda di energia elettrica in ogni punto della linea. In un contesto urbano lo spazio per un'eventuale sottostazione è ridotto, il che renderebbe

scomoda e dispendiosa la costruzione; una possibile soluzione è di collegarsi a fornitori locali di alta tensione (33 kV/66 kV) [5].

#### **1.4 Rigenerazione nei sistemi di trazione ferroviaria elettrica**

La rigenerazione, per definizione, avviene quando l'energia cinetica viene immagazzinata e riutilizzata, sia dal treno stesso, sia da altri utilizzatori; nel caso di alimentazione AC l'energia recuperata può essere reimmessa direttamente in rete. La rigenerazione ha a disposizione numerose nuove tecnologie, in particolare i notevoli progressi nel campo dell'elettronica di potenza; la facilità e l'efficienza di conversione sono fattori determinanti per il suo successo. Un miglioramento delle prestazioni e della durata di vita dei sistemi di accumulo è anche un fattore determinante.

In generale la prima strategia è quella di frenare attraverso i motori del treno, nel caso in cui non sia possibile rinviare l'energia in rete questa sarà dissipata su degli appositi resistori, quindi non recuperata, ma allo stesso tempo non verranno utilizzati e consumati i freni meccanici.

Per i sistemi alimentati in DC la frenata rigenerativa, rinviando la potenza sulla linea di alimentazione, può portare picchi di tensione (il treno crea una tensione DC); questa situazione è problematica in quanto, per mantenere continuità di servizio, la tensione di linea è limitata superiormente e inferiormente dalla norma ferroviaria (differente per ogni stato). A contrario, per i sistemi in AC l'energia può essere rinviata direttamente alla linea di alimentazione (il treno crea una tensione AC) che può quindi essere reimmessa in rete più facilmente [7].

L'energia che può essere potenzialmente recuperata da un treno dipende dal profilo di velocità in funzione della posizione e della percentuale di energia di frenatura rispetto a quella di accelerazione e di crociera. Nelle linee di alta velocità questa percentuale è molto bassa, essendo le fermate un numero esiguo se comparate ai chilometri per cui si estende la linea. Mentre in una linea metropolitana la percentuale di fermate, rispetto ai chilometri di tragitto, è maggiore, le fermate permettono quindi di recuperare molta dell'energia utilizzata. Nell'immagine sottostante sono riportati un profilo velocità in funzione della posizione del treno, un profilo potenza in funzione del treno ed un grafico che illustra le energie scambiate da un treno; i tre grafici illustrano le caratteristiche del tragitto di un treno ad alta velocità tra due sottostazioni.

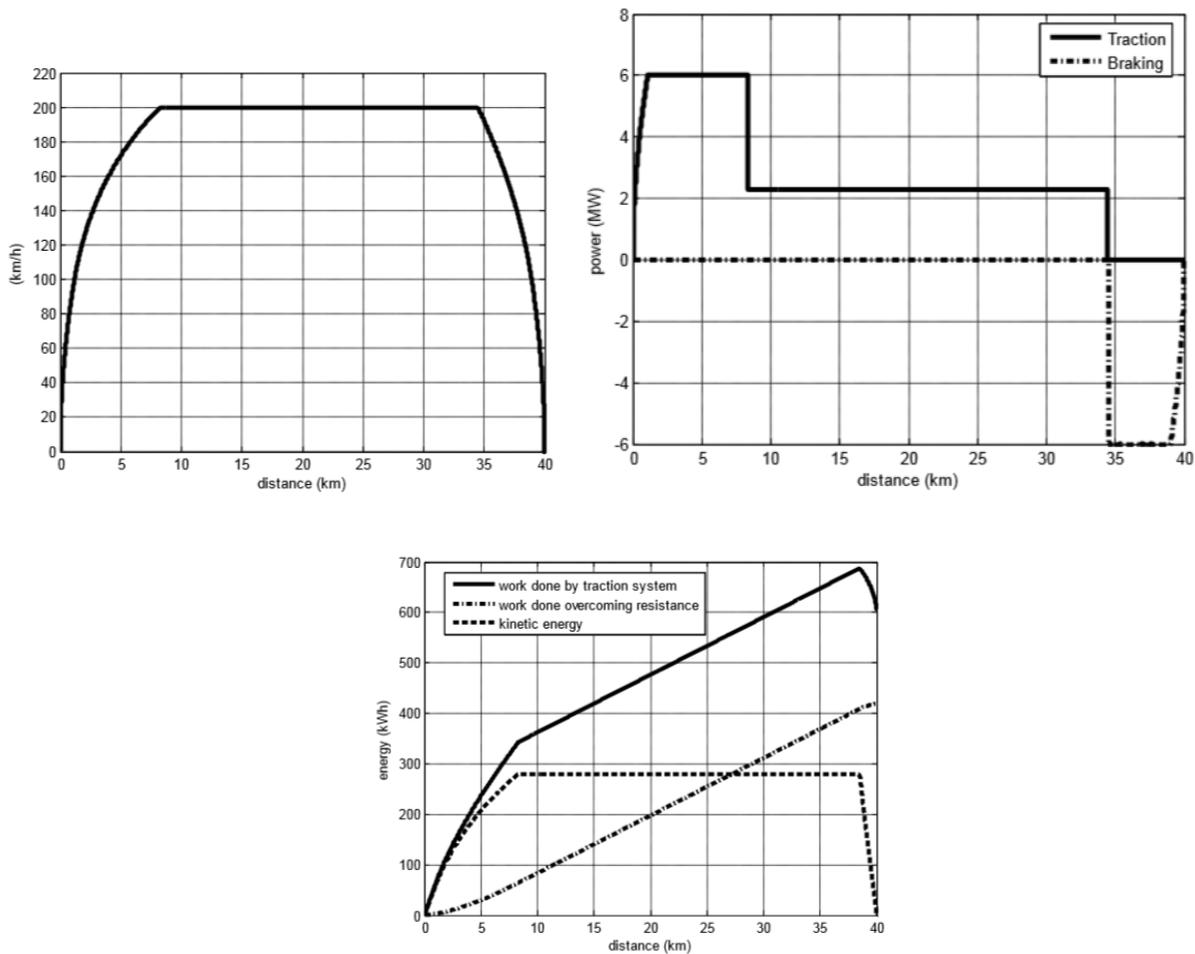


Figura 7 : Grafici utili allo studio della possibilità di rigenerazione elettrica in una tratta ferroviaria. [7]

Il grafico riguardante le energie mostra chiaramente la rigenerazione in caso di frenata, l'energia totale utilizzata dalla linea per la trazione diminuisce. Risulta evidente che per una linea con stazioni più ravvicinate (l'esempio è di 40 km perché si tratta di una linea ad alta velocità) la percentuale di energia recuperata, rispetto a quella utilizzata per la trazione crescerebbe.

Un ulteriore limite della frenata rigenerativa è correlato ad una decelerazione troppo brusca, in tal caso il motore non sarebbe in grado di assorbire tutta l'energia cinetica e dovrebbe quindi intervenire, almeno in parte, il freno meccanico.

## 1.5 Tipologie sistemi di accumulo di energia

I sistemi di accumulo di energia vengono in generale suddivisi in base a due caratteristiche: l'energia che possono immagazzinare e la potenza che possono fornire. La scelta del corretto sistema di accumulo dipende dal tipo di applicazione (grande energia richiesta, elevate potenze, ecc.).

I sistemi di accumulo di energia possono essere di tipo [4]:

- Elettrochimico: batterie, sistemi di batterie Fuel Cell (con idrogeno prevalentemente)

- Meccanico: aria compressa, sistemi di pompaggio
- Elettrico: condensatori, super-condensatori, bobine magnetiche

Ognuno di questi sistemi possiede peculiarità e difetti che possono essere facilmente riassunti tramite il piano di Ragone (Ragone plot) [22]. Il piano di Ragone rappresenta uno standard nella comunità scientifica da diversi anni, principalmente per due motivi: definire i limiti nella potenza disponibile per batterie e condensatori e stabilire una regione ottimale di lavoro, che si trova nella zona del piano dove energia e potenza sono più elevate (figura 8).

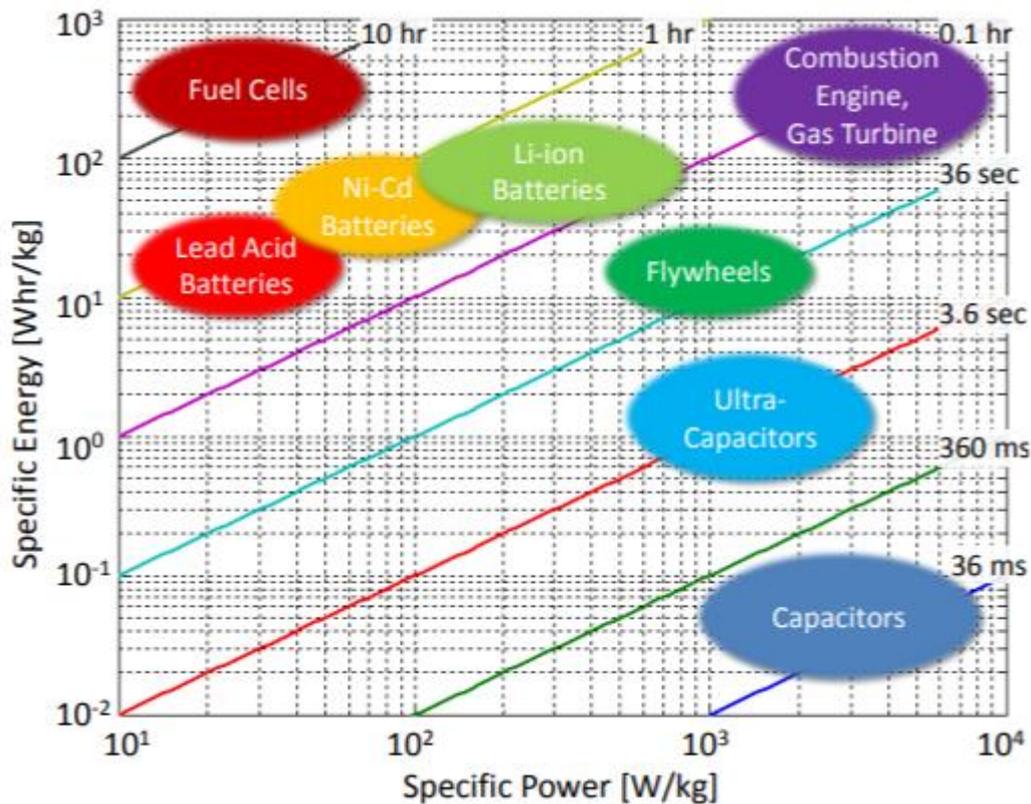


Figura 8: Piano di Ragone di relativo a diversi sistemi di accumulo e di propulsione. Nel grafico sono anche indicati i relativi tempi di ricarica. [22]

Nella figura 8 sono riportati gli intervalli di densità di potenza (sull'asse delle ascisse) e di densità di energia (sull'asse delle ordinate) per diversi sistemi di accumulo di energia e di propulsione. Per la nostra trattazione è utile considerare i dati relativi alle varie tipologie di batterie (la batteria considerata per questo lavoro di tesi è una batteria su base di Litio). Il piano di Ragone permette di classificare le tecnologie di accumulo in funzione della loro densità di energia, quantità massica di energia che possono immagazzinare, e la densità di potenza, quantità massica di energia che possono trasferire per unità di tempo. Nel piano in figura 8, più un sistema si trova nella parte alta del grafico più sarà adatto ad immagazzinare grandi quantità di energia, più un sistema è a destra

più potrà fornire potenze elevate. Nel grafico sono inoltre indicati i tempi di ricarica per ogni sistema di accumulo.

Nel lavoro di dottorato [4] e nel corso di questa tesi la massa ed il volume del sistema di accumulo devono essere limitati, al fine di poter essere facilmente imbarcati a bordo del treno. I sistemi di pompaggio, aria compressa, volani (flywheels nella figura 8 non verranno considerati in quanto più adatti ad un'applicazione stazionaria.

I sistemi che hanno caratteristiche interessanti per l'applicazione ferroviaria sono [4]:

- Pile a combustione: fonti di energia reversibile, si possono caricare e scaricare a seconda della missione, richiedono un elettrolizzatore a bordo che può essere molto ingombrante; è inoltre necessario avere riserve di ossigeno o di idrogeno: Rappresentano una buona alternativa al diesel, ma non sono la soluzione ideale per l'ibridazione ferroviaria
- Batterie e super-condensatori: sistemi di accumulo con massa e volume ridotti rispetto ad altri sistemi, sono già utilizzati in ambito ferroviario e sono coinvolti da un continuo aggiornamento tecnologico. La scelta per il lavoro di dottorato [4] è ricaduta su queste due tecnologie, nonostante i feedback non siano in generale positivi. La densità di potenza disponibile è infatti relativamente bassa.

### 1.5.1 Batterie e super-condensatori

Nelle batterie l'energia è immagazzinata sotto forma elettrochimica. Il vantaggio principale di questa tecnologia è la possibilità di avere un'elevata densità di energia, è possibile dunque immagazzinare grandi quantità di energia.

Le batterie che possiedono un'energia di densità più elevata sono le batterie al litio, largamente utilizzate nelle applicazioni quotidiane. Esse si dividono in tre famiglie [4]:

- Litio-metallo, l'elettrodo è composto da litio metallico
- Litio-ioni, il litio rimane allo stato ionico (i moduli considerati per questa tesi rientrano in questa categoria, sono infatti composti da ossido di litio Titanio)
- Litio-polimeri

Il principale problema in questa tecnologia è la suscettibilità ai cicli di utilizzo. In particolare, i cicli di carica/scarica che escono dal range 20% -80% dell'SoC possono provocare una brusca diminuzione della durata di vita della batteria.

I super-condensatori sono formati da due elettrodi immersi in un liquido elettrolitico e sono separati da una membrana di materiale poroso [4]. Questo sistema è adottato per la sua alta densità di

potenza (vedi figura 8), è quindi adatto ad essere utilizzato in casi di brusche domande di potenza (caso di accelerazione in ambito ferroviario). Inoltre, la loro struttura ed il loro funzionamento permettono il loro utilizzo senza che ne sia influenzato il loro funzionamento, potenzialmente anche dopo milioni di cicli. Si può però notare, sul piano di Ragone (figura 8), che a livello di densità di energia sono poco performanti, il che li rende poco adatti per un utilizzo che comprenda la frenata rigenerativa.

In generale batterie e super-condensatori possono essere utilizzati insieme, sfruttando in modo ottimale le caratteristiche di entrambe le tecnologie. In [4] tutti gli studi di ibridazione dei treni comprendono l'inserimento, in ausilio a catenaria e motore diesel, di super-condensatori e batterie. Nel corso del lavoro di tesi è stato considerato un sistema di accumulo composto interamente da batterie, per semplificare il modello, a livello di capacità di calcolo.

## 2 Modelli e simulazioni per linee ferroviarie ad alimentazione in corrente continua

La modellizzazione delle linee ferroviarie è una problematica attuale e molto studiata negli ultimi anni. In particolare, risulta importante ricavare un modello matematico semplice che possa essere elaborato velocemente a livello numerico.

L'obiettivo principale degli studi esaminati per questa tesi è di trovare modelli e metodi matematici per rappresentare e risolvere linee nel modo più efficiente possibile, ottimizzando i tempi e la memoria di calcolo, che per reti complesse possono essere decisamente ingenti. Tutti gli studi analizzati, con le differenze che verranno esposte, seguono questo schema logico [11][12]:

- raccolta dati e simulazione del movimento del treno
- calcolo del "traction effort" e quindi della potenza necessaria per mantenere il moto richiesto
- modellizzazione circuitale della linea
- analisi circuitale
- rappresentazione matriciale
- scelta di utilizzo tra metodo della matrice diretta e metodo delle equazioni di load flow
- scelta metodo di fattorizzazione per la matrice delle ammettenze
- risoluzione di sistema di equazioni (a volte non lineare)
- ottimizzazione energetica, spesso includendo la rigenerazione

### 2.1 Modellizzazione circuitale di una linea alimentata in corrente continua

La scelta del tipo di modello adatto ad una linea ferroviaria è complessa, sia per le numerose possibilità presenti, sia per l'impatto della scelta sull'efficienza della simulazione e sulla velocità di calcolo. Una delle difficoltà nel modellizzare una linea di trazione risiede nel fatto di avere più elementi (treni) che variano continuamente posizione e potenza richiesta, sono quindi a tutti gli effetti dei carichi mobili variabili. La maggior parte delle linee moderne alimentate in DC sono alimentate dalla rete, spesso in AC opportunamente convertita e trasformata. Dal momento in cui si tratta di un regime DC, tutte le linee di alimentazione possono essere considerate resistive. Normalmente, per avere un modello più semplificato, sono trascurate le resistenze equivalenti dell'impianto di terra [13].

Una linea di trazione è essenzialmente una lunga rete a "scala" con delle impedenze in serie, che rappresentano il circuito di alimentazione e delle ammettenze che corrispondono agli equivalenti elettrici dei motori di trazione. Le postazioni di messa in parallelo, incroci di binari ed eventualmente apparecchiature di segnalazione ferroviaria sono tutte rappresentate con circuiti equivalenti collocati in determinati punti sulla linea [12].

Il circuito più semplice è quello di una linea a doppia scala, con la catenaria rappresentata da una linea e il ritorno (le rotaie in parallelo) rappresentato dall'altra. Il modello viene risolto per diversi

istanti, quindi in ogni intervallo di tempo il circuito deve essere ricalcolato, considerando la posizione del treno e la domanda di potenza dei motori ed ausiliari. La soluzione viene calcolata, istante per istante, considerando la corrente e la tensione dei treni relativi all'intervallo di tempo. La figura 9 mostra il circuito equivalente di una tipica rete di trazione con una diramazione e tre sottostazioni; in totale sono otto i treni in circolazione nella linea superiore e dieci in quella inferiore. Ogni treno, in questo caso rappresentato da una conduttanza ed indicato da un numero cerchiato (da 1 a 18), è collegato alla linea da due resistenze, che rappresentano i tratti di linea che collegano ogni treno.

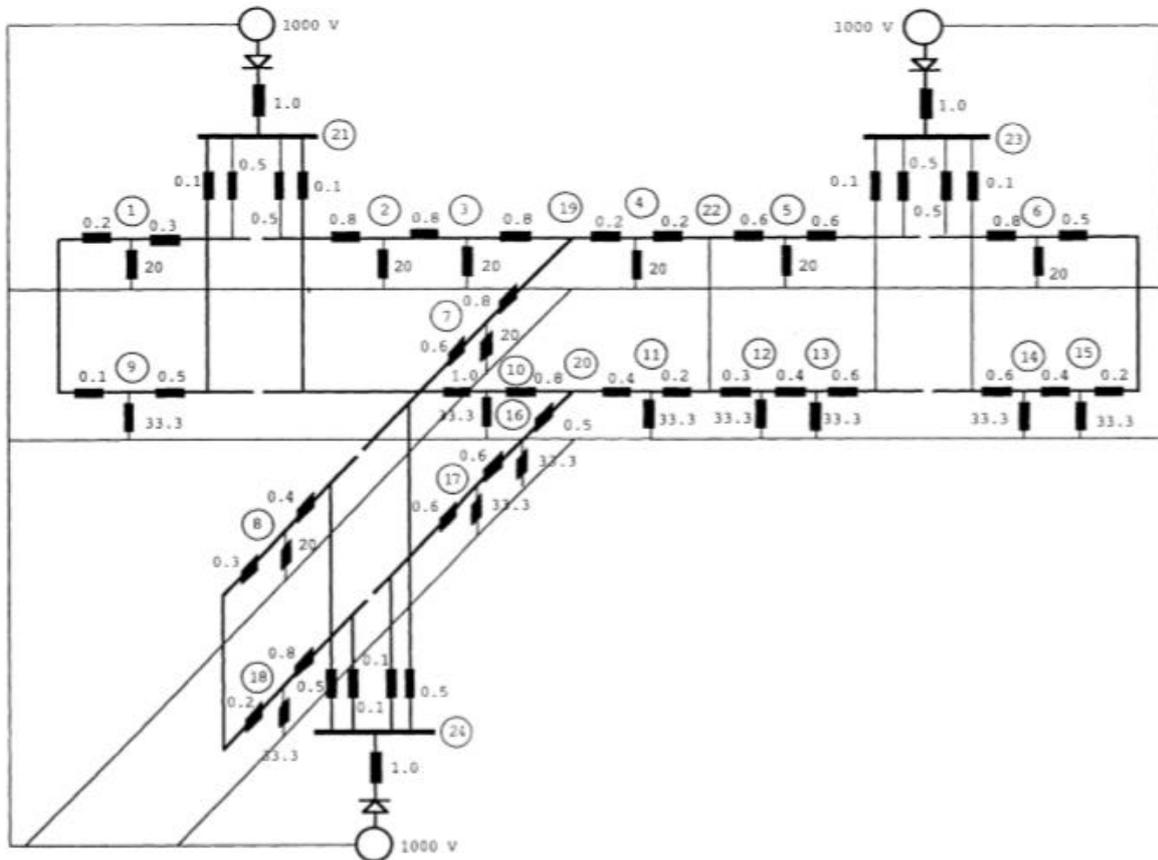


Figura 9: Circuito equivalente di una linea ferroviaria alimentata da 3 sottostazioni ed in cui transitano 18 treni. [12]

Il modello, come detto precedentemente, deve essere il più semplice ed efficace possibile, la rappresentazione quindi parte dall'elemento sottostazione elettrica. Le sottostazioni elettriche, ai fini del circuito equivalente, sono generalmente modellizzate con un circuito equivalente Thévenin, ovvero un generatore di tensione in serie ad una resistenza, detta resistenza interna. In alcuni modelli viene inserito anche un diodo, per rappresentare l'unidirezionalità della corrente in certe reti (in particolare quando non vi può essere una frenata rigenerativa). Nella figura 9 le sottostazioni sono rappresentate col numero 21, 23 e 24 da un generatore di tensione in serie ad un diodo e ad una resistenza [11].

Nella figura 10 è illustrata una linea semplificata, essendoci un solo treno tra due sottostazioni elettriche (nella figura 9 si avevano svariati treni), dove si può vedere una comune rappresentazione di rete di trasmissione in corrente continua (si ignori per il momento la modellizzazione dei treni) ed in particolare lo scambio di corrente tra le sottostazioni elettriche e il carico.

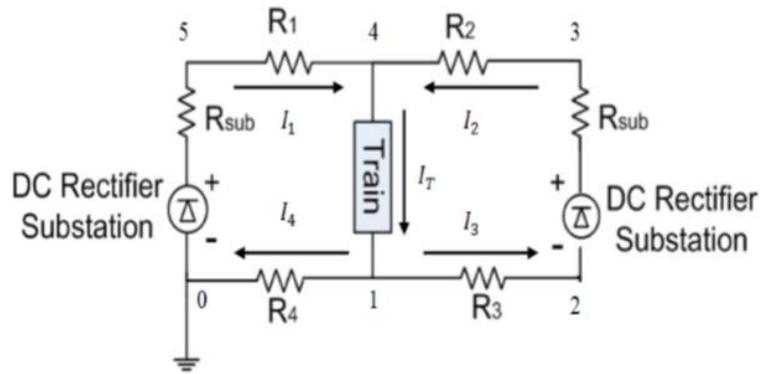


Figura 10: Rappresentazione circuitale di una sezione di linea ferroviaria semplificata [11]

Nella figura 10  $R_1$  e  $R_2$  sono le resistenze della linea di andata,  $R_3$  e  $R_4$  rappresentano le resistenze della linea di ritorno. I valori delle resistenze equivalenti dipendono dalla posizione del treno. In questo modello il treno è considerato come un generatore di potenza variabile, per ogni posizione il valore della potenza dipende dalla strategia di guida selezionata. L'obiettivo è di risolvere le equazioni di rete per ottenere le correnti e quindi la potenza fornita da ogni sottostazione e la tensione al pantografo del treno in corsa.

## 2.2 Modellizzazione dei treni

Mentre per rappresentare le linee di trasmissione in corrente continua e le sottostazioni elettriche viene quasi sempre usato lo stesso modello, in letteratura sono diversi i metodi utilizzati per il modello di un carico ( in questo caso i treni).

In generale sono stati individuati tre metodi per modellizzare il treno come un carico elettrico [13]:

- il metodo della conduttanza, dove il carico è rappresentato come una conduttanza calcolata come (figura 9) :

$$G = P_L / V^2 \quad (2.1)$$

- il metodo della corrente, dove il carico è rappresentato da un generatore di corrente la cui espressione è ( figura 10) :

$$I = P_L / V \quad (2.2)$$

- il treno modellizzato come un circuito equivalente di Norton (figura 12)

Nei primi due modelli  $P_L$  è la potenza domandata dal motore del treno e dagli ausiliari alla linea elettrica (quindi alla catenaria) ad una tensione al pantografo  $V$ . In caso di frenata rigenerativa la potenza  $P_L$  è considerata negativa. Sia la conduttanza che la corrente sono dipendenti dal valore di tensione  $V$ .

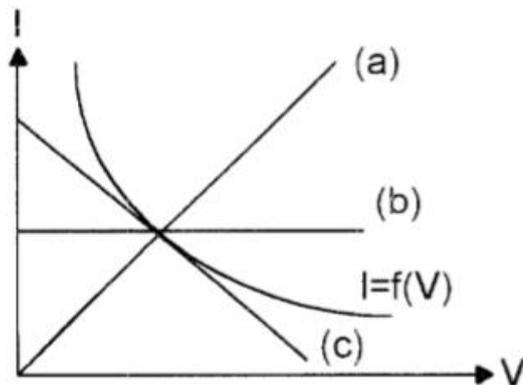


Figura 11: Curve di carico per ogni tipo di modellizzazione dell'elemento treno. [13]

Nella figura 11 sono riportate le curve di carico per ogni tipologia di modellizzazione dell'elemento treno. La curva (a) rappresenta l'andamento per un treno modellizzato con il metodo della conduttanza, la curva (b) il caso in cui il treno sia modellizzato con un generatore di corrente e la curva (c) nel caso si utilizzi un equivalente Norton.

La linea di alimentazione può essere modellizzata con un circuito equivalente di Thévenin e quindi, nell'ultimo caso, il circuito equivalente della rete sarà un insieme di circuiti equivalenti di Norton e Thévenin.

### 2.3 Analisi circuitale della rete

Per risolvere le reti che modellizzano una rete ferroviaria, alimentata in corrente continua, è normalmente preferibile utilizzare la legge dei nodi. Vengono identificati come nodi tutti i punti circuitali in cui si uniscano un numero maggiore o uguale di 3 rami. In una linea ferroviaria, questa configurazione si presenta in corrispondenza dei treni transitanti e delle sottostazioni elettriche.

Per ogni nodo del circuito equivalente viene dunque scritto l'equilibrio delle correnti nella seguente forma [14] [15]:

$$[I] = [Y][V] \quad (2.3)$$

$$[V] = [Y]^{-1}[I] \quad (2.4)$$

Dove Y è la matrice delle ammettenze che contiene le informazioni su tutte le connessioni e gli elementi che formano il circuito. Le ammettenze che compongono la matrice sono in generale calcolate come la somma dei reciproci delle resistenze tra i nodi di una rete [14]. Nel capitolo 3 verranno indicate le modalità di calcolo di una matrice delle ammettenze. Ai fini dell'analisi nodale i treni sono spesso modellati come un generatore di corrente o come una conduttanza, che portano ad avere una determinata tensione nodale, all'interno del quale è compresa la tensione sul singolo treno [13].

Spesso, utilizzando questo metodo, le sottostazioni non sono più modellizzate con un circuito equivalente Thévenin (generatore di tensione più una resistenza in serie) ma con un equivalente Norton (generatore di corrente in parallelo ad una resistenza). Esistono anche dei modelli ibridi,

come quello usato in [4], dove viene utilizzato un metodo nodale, mantenendo però un circuito equivalente di Thévenin per modellizzare le sottostazioni elettriche. La rete descritta è così complessa e deve essere analizzata con un metodo nodale modificato, che sarà analizzato nel capitolo riguardante il programma di simulazione [4].

L'utilizzo della legge dei nodi per l'analisi di una rete ferroviaria ha come vantaggio la possibilità di esprimere un sistema in forma matriciale oppure di poter analizzare il circuito utilizzando le equazioni di load flow, modificate per il caso di alimentazione in DC. Un ulteriore vantaggio dell'utilizzo della legge dei nodi è la possibilità di utilizzare la tecnica della divisione del carico. Attraverso questo metodo ogni corrente dei treni è composta dalle due correnti (provenienti dai nodi fissi adiacenti) proporzionali alla distanza tra il nodo mobile (treno) e quello fisso (SSE). Questa strategia permette di diminuire il numero dei nodi e quindi di aumentare la velocità di calcolo e, allo stesso tempo, la facilità di invertire la matrice.

La rappresentazione nodale del circuito, come spiegato nella sintesi dei metodi di simulazione ferroviaria nel capitolo 1, permette l'utilizzo di metodi matriciali, può quindi essere trovata una soluzione numerica. Un problema ricorrente, quando si deve risolvere un sistema in forma matriciale, è la lentezza dei software nel risolverli, in particolare quando si tratta di grandi reti: problemi che possono essere risolti rielaborando matrici sparse, per esempio. La generazione della matrice delle ammettenze è un passaggio determinante per l'efficienza dell'algoritmo e la matrice deve possibilmente risultare sparsa. Nel caso di diramazioni ci sono ulteriori elementi fuori diagonale, allargando la banda di elementi non nulli, che renderanno la risoluzione del sistema più lunga.

## 2.4 Calcolo delle tensioni per una linea ferroviaria a scala

Come già detto in precedenza, la linea ferroviaria viene normalmente modellizzata come un circuito elettrico a scala. Normalmente le reti elettriche a scala possono essere risolte con delle equazioni di power flow [11]. Si prenda come linea di esempio la linea rappresentata a livello di circuito nella figura 12, in cui sono in transito due treni, compresi tra due sottostazioni elettriche.

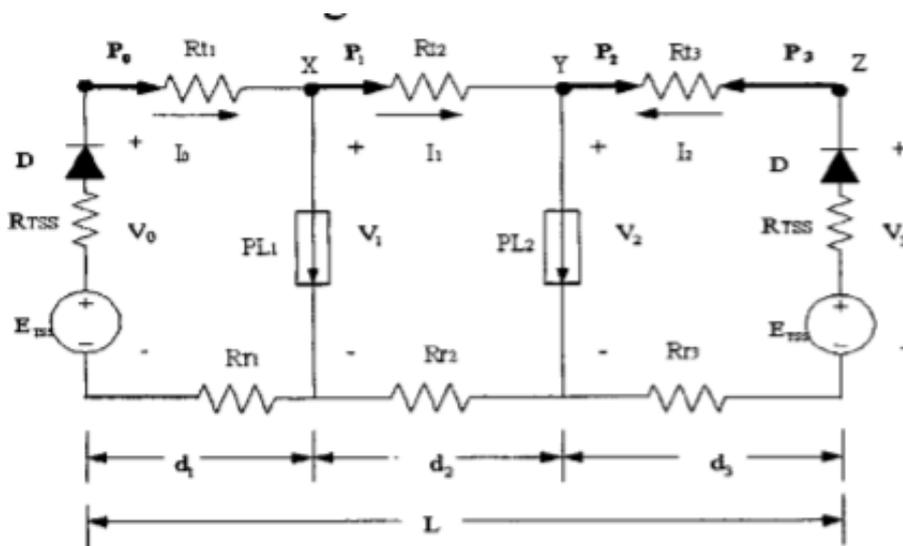


Figura 12: Rappresentazione di una linea a "scala" semplificata: due treni alimentati da due SSE

Nella figura 12 le varie grandezze sono indicate secondo la seguente nomenclatura:

$P_0, P_1, P_2, P_3$ : potenza assorbita da ciascun nodo

$V_0, V_1, V_2, V_3$ : tensione nodale relativa a ciascun nodo

$E_{TSS1}, E_{TSS2}$ : tensione fornita da ciascuna sottostazione elettrica

$PL_1, PL_2$ : potenza domandata da ogni treno

$R_{TSS}$ : Resistenza interna delle sottostazioni elettriche

$R_{t1}, R_{t2}, R_{t3}$ : resistenze caratteristiche della linea di contatto (andata)

$R_{R1}, R_{R2}, R_{R3}$ : Resistenze caratteristiche della linea di ritorno

Si possono scrivere le equazioni di power flow in termini di tensioni nodali, soluzione che normalmente è preferibile:

$$V_1 = V_0 - R_{t1} \frac{P_0}{V_0} \quad (2.5)$$

$$P_1 = P_0 - R_{t1} \frac{P_0^2}{V_0^2} - PL_1 \quad (2.6)$$

$$V_2 = V_1 - R_{t2} \frac{P_1}{V_1} \quad (2.7)$$

$$P_2 = P_1 - R_{t2} \frac{P_1^2}{V_1^2} - PL_2 \quad (2.8)$$

$$V_3 = V_2 - R_{t3} \frac{P_2}{V_2} \quad (2.9)$$

Nei casi in cui si scelga questo approccio, normalmente sono note le potenze domandate dai treni ( $PL_1$  e  $PL_2$ ) e le tensioni dei nodi delle sottostazioni elettriche (come  $V_0$  e  $V_3$ ). Le altre variabili, cioè le tensioni nodali e le potenze in uscita dai nodi relativi alle SSE sono delle incognite del sistema. Il sistema può essere facilmente risolto con il metodo di Newton-Raphson. In questo caso specifico la Jacobiana non è particolarmente complessa, in situazioni in cui le equazioni siano un numero più elevato sarà necessario applicare dei metodi di riduzione delle matrici.

Utilizzando le equazioni (2.5) -(2.9), il modello della rete è spesso separato dal simulatore del movimento del treno; il modello della rete prende direttamente i risultati del movimento (posizione del treno, domanda di potenza) calcolati in precedenza e li utilizza come parametri di ingresso. Una linea alimentata in corrente alternata ed una alimentata in corrente continua sono influenzate in modo differente dal transito del treno. Per un sistema ferroviario alimentato in un sistema trifase in corrente alternata, il controllo della potenza del treno non è dipendente dalla tensione della linea (come spiegato nell'introduzione alla trazione elettrica ferroviaria, capitolo 1); questa problematica diventa più influente nel caso di un'alimentazione DC, dove il controllo della tensione di linea è indispensabile [16].

## 2.5 Rappresentazione globale rete e risoluzione

In questo paragrafo è riportato un esempio di risoluzione di rete dove il treno è considerato un generatore di corrente [11]. Il processo di risoluzione è equivalente a quello del modello della figura 13; la differenza consiste nelle incognite e nei valori noti che si hanno a disposizione (risultano essere l'esatto contrario del modello in figura 12), ciò porta ad avere un sistema non lineare. Nel paragrafo 2.4 il modello è stato risolto attraverso la legge delle maglie, in questo caso si utilizza invece la legge dei nodi. Il sistema risulta però più complesso per la presenza di più sottostazioni elettriche. Normalmente in un sistema ferroviario si hanno più stazioni ad alimentare nello stesso momento il treno, come rappresentato nella figura 13; per le equazioni di power flow sono più facili da trattare i generatori di corrente, dunque le sottostazioni elettriche sono rappresentate tramite equivalente di Norton.

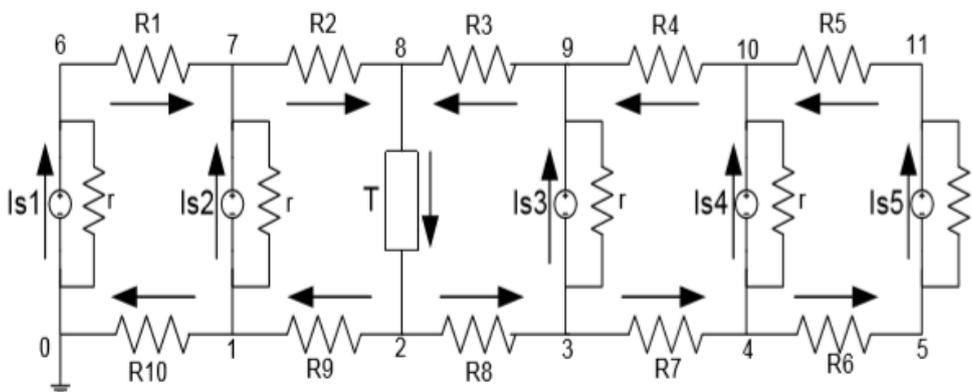


Figura 13: Rappresentazione circuitale di una linea alimentata da cinque sottostazioni elettriche in cui circola un treno. [11]

A questo punto è sufficiente impostare un sistema di equazioni che applichino le leggi di Kirchhoff. In questo metodo viene applicata un'analisi nodale. Nel circuito equivalente in questione si hanno 11 nodi quindi seguendo l'equazione (2.10):

$$[I] = [Y][V] \quad (2.10)$$

Si può scrivere:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_{10} \\ V_{11} \end{bmatrix} = [Y]^{-1} \begin{bmatrix} -I_{S2} \\ I_T \\ -I_{S3} \\ \dots \\ I_{S4} \\ I_{S5} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Essendo 12 le incognite e 11 le equazioni è necessaria un'altra equazione, che determina la corrente richiesta dal treno:

$$P_T = U_T I_T \quad (2.12)$$

Dove:

$P_T$ : potenza domandata dal treno.

$I_T$ : corrente assorbita dal treno

$V_1, V_2, V_{11}$ : tensioni nodali

$I_{S1}, I_{S2}, I_{S5}$ : correnti erogate dalle sottostazioni elettriche

$Y$ : matrice delle ammettenze della linea

L'aggiunta dell'equazione (2.12) porta ad un'ulteriore incognita, la tensione del treno, che in questo caso può essere calcolata come:

$$U_T = V_8 - V_2 \quad (2.13)$$

Il sistema è così risolvibile con un metodo di risoluzione iterativo, come Newton-Raphson.

## 2.6 Metodo di Newton Raphson

Nel campo delle linee elettriche e dell'elettromagnetismo più in generale è sempre più comune affrontare dei problemi non lineari. Un metodo decisamente efficiente e allo stesso tempo solido. per questo più utilizzato dalla comunità scientifica, è il metodo di Newton Raphson [24]. Il metodo si basa sull'idea di approssimazione lineare.

Si consideri una funzione  $f(x)$  e sia  $z$  la soluzione dell'equazione  $f(x) = 0$ . L'inizio del metodo consiste nella prima stima di  $z$  con un valore  $x_0$ . L'obiettivo è di produrre una migliore stima di  $z$   $x_1$  partendo da  $x_0$ . La procedura si ripete fino a che non sia chiaro che si è raggiunto un livello di precisione sufficiente oppure si conclude che la risoluzione non sta portando a risultati attendibili. Questo di tipo di processo è detto iterativo. La prima stima  $x_0$  risulta essere di fondamentale importanza per la buona riuscita della risoluzione dell'equazione;  $x_0$  sufficiente vicino a  $z$  rende facile la risoluzione, viceversa un  $x_0$  lontano può portare alla on risoluzione dell'equazione.

Supponendo che  $x_0$  sia una buona approssimazione di  $z$  si può dire che:

$$z = x_0 + h \quad (2.1)$$

$$h = z - x_0 \quad (2.2)$$

Dove  $h$  stabilisce quanto si è distanti da una buona approssimazione. Essendo  $h$  trascurabile si può utilizzare un'approssimazione lineare (metodo della linea tangente) per poter dire che:

$$0 = f(x) = f(x_0 + h) \approx f(x_0) + h f'(x_0) \quad (2.3)$$

$$h \approx -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2.4)$$

Supposto  $f'(x_0) \neq 0$

Si trova così la nuova stima di  $z$

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2.5)$$

Allo stesso modo si applica l'equazione (2.5) per trovare  $x_2$ :

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad (2.6)$$

Questo processo può essere ripetuto svariate volte; la (2.6), supposta  $x_n$  la stima attuale, può essere generalizzata in questo modo:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.7)$$

Il metodo di Newton-Raphson può essere anche interpretato come un metodo geometrico grafico. Nella figura 14 la curva  $y = f(x)$  incontra l'asse delle ascisse al valore di  $x = z$ . Nel punto  $b$  la tangente alla curva ha equazione:

$$y = f(b) + (x - b)f'(b) \quad (2.8)$$

L'intersezione tra la retta tangente e l'asse delle  $x$  è il punto  $c$ , che si può trovare imponendo  $y = 0$  nella (2.8):

$$c = b - \frac{f(b)}{f'(b)} \quad (2.9)$$

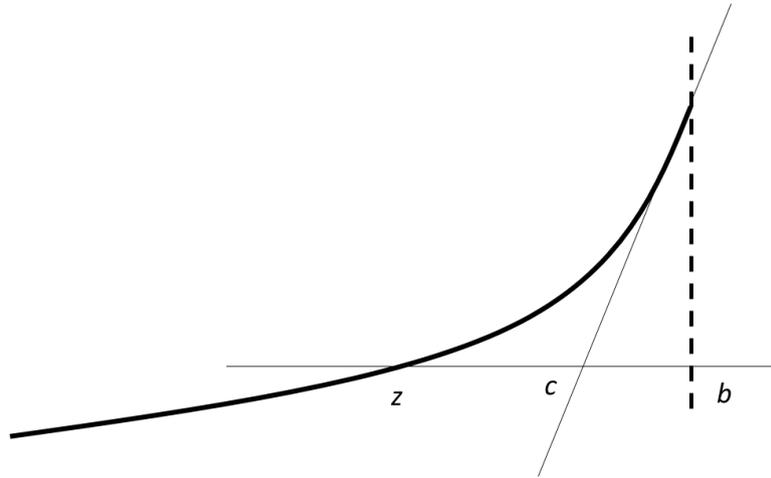


Figura 14 : Rappresentazione dell'interpretazione grafica del metodo Newton- Raphson

Facendo il confronto con l'equazione (2.7) il punto  $c$  è la nuova stima di  $z$ , lo step successivo consiste nel trovare la tangente alla curva nel punto  $c$  e trovare un nuovo punto. I nuovi punti saranno sempre più vicini all'intersezione  $z$ , proprio come previsto dal metodo. L'interpretazione grafica diventa utile per analizzare eventuali problemi nello svolgimento del metodo. La presenza di una convessità nella curva, per esempio, porterebbe la seguente stima molto lontano dalla soluzione. Allo stesso modo un'ampia zona a pendenza zero potrebbe portare all'impossibilità di proseguire con il metodo.

Non sarebbe corretto identificare il metodo di Newton-Raphson con il solo esempio delle tangenti, in quanto il metodo è un efficace soluzione per trovare radici a polinomi complessi e sistemi di equazioni (come nel caso di questa tesi) dove la geometria è ben più complessa.

### 3 Programma di simulazione

Il programma di simulazione utilizzato in questa tesi è stato sviluppato da Marie Poline durante la sua tesi di dottorato [4]. Il programma ha lo scopo di analizzare l’impatto della presenza di alcuni treni su una linea ferroviaria. In questo capitolo viene illustrato il funzionamento del software sul quale di basa questa tesi; nel capitolo 5 sono invece illustrate le modifiche effettuate. Possono essere simulati due differenti tipi di treni:

- treni ibridi (linea elettrica + diesel+ batteria)
- treni linea elettrica +batteria o linea elettrica più diesel

Nello studio [4] le batterie sono sempre considerate come dei sistemi di accumulo (a bordo del treno). Il funzionamento generale del sistema di studio della linea è indicato nella figura 15. Il programma ha come ingressi tutti i dettagli della missione del treno (lunghezza della linea, la posizione in ogni istante di ogni treno e la potenza richiesta da ogni treno in ogni istante). Le principali uscite del software sono la tensione sulla linea elettrica (a livello del pantografo), le correnti fornite dalle sottostazioni e tutte le potenze riguardanti il treno, la linea di contatto e le batterie [4].

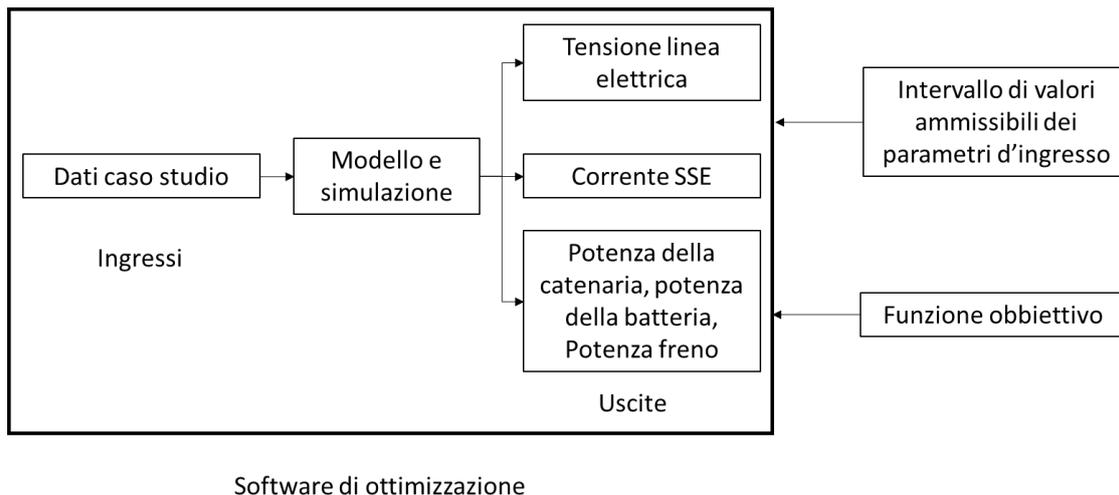


Figura 15: Schema generale degli input e degli output del programma di simulazione e del programma di ottimizzazione

La seconda parte del dottorato [4] è incentrata sull’utilizzo di un altro software, dedicato all’ottimizzazione, per minimizzare (rispettando dei vincoli, come la tensione di linea), una funzione obbiettivo. Le funzioni obbiettivo che possono essere selezionate per essere ottimizzate sono svariate, ma in generale viene scelto il costo totale dell’opera (considerando sia il costo di utilizzo che il costo dell’infrastruttura) oppure l’energia fornita dalle sottostazioni elettriche.

Il programma di ottimizzazione ha bisogno anche degli intervalli di valori all’interno del quale possono essere fatte variare le variabili in entrata (un valore sarà l’intervallo di tensione ammissibile per ogni nodo del sistema). I valori che sono limitati da degli intervalli sono chiamati vincoli ed in base alla loro impostazione è possibile ottenere risultati finali sostanzialmente differenti.

### 3.1 Simulazione delle linee ferroviarie

Nel capitolo 2 si è analizzato come in generale viene trattata la problematica della modellizzazione di una linea ferroviaria e dei treni su di essa circolanti. In questo paragrafo verrà spiegato come è stata affrontata nella tesi di dottorato su cui si basa questo lavoro di tesi [4], sottolineando le differenze o le analogie con i casi presenti in letteratura, analizzati nel capitolo 2.

Le linee studiate con questo programma di simulazione sono composte da due vie (una di andata e una di ritorno) e contengono gli elementi presenti nella figura 16: i treni, la catenaria, le sottostazioni elettriche (SSE o SST in francese) e le postazioni di messa in parallelo. Il modello della linea, e quindi anche la simulazione, vengono fatti a partire dall'elemento sottostazione elettrica fino ad arrivare al pantografo che alimenta il treno; non sono quindi considerati l'elettronica di potenza, i trasformatori ed il controllo necessari per passare dall'alta tensione della rete alla bassa tensione della linea ferroviaria (1500 V o 1750 V nelle linee ferroviarie francesi). Nello studio si considera dunque che i gruppi di produzione (figura 3), a valle delle sottostazioni elettriche, siano sempre in grado di sostenere la tensione in uscita delle sottostazioni elettriche.

Le linee ferroviarie considerate per la tesi sono normalmente linee alimentate in corrente continua ad una tensione di 1500 V o 1750 V, (come tipico per il sud-est della Francia). Valgono dunque tutte le considerazioni fatte nel capitolo introduttivo sulla trazione ferroviaria. Nella figura 16 è rappresentata una linea ferroviaria con in transito 3 treni per via; la linea è alimentata da tre sottostazioni elettriche.

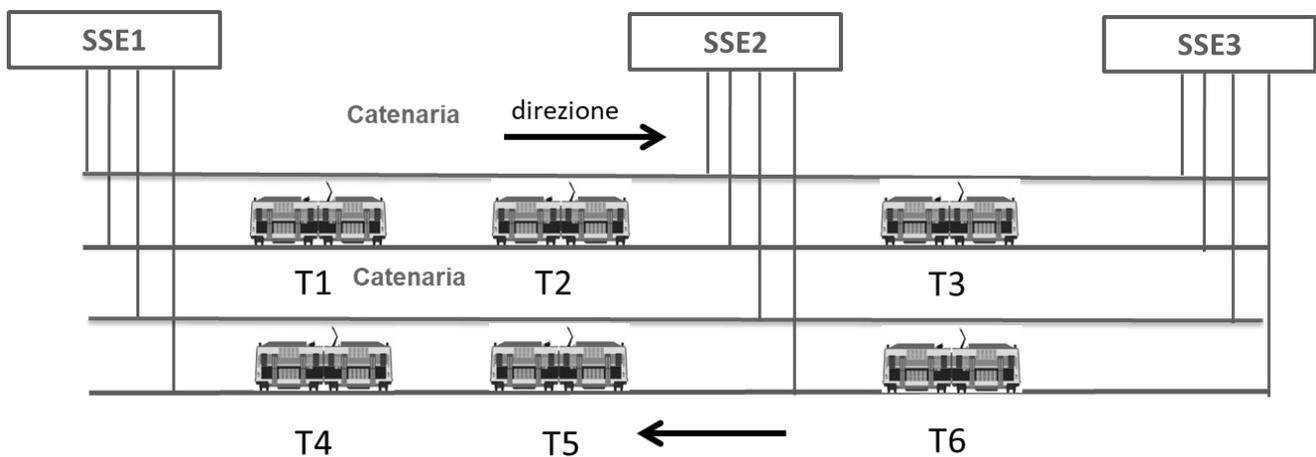


Figura 16: Porzione di linea ferroviaria, via di andata e di ritorno, su cui circolano 6 treni

La risoluzione della parte elettrica della linea utilizza un modello in cui le sottostazioni elettriche sono dei generatori di tensione ideali geograficamente fissi e i treni sono rappresentati da generatori di corrente ideali, mobili nel tempo.

Le sezioni di linea che dividono i treni, le SSE e le postazioni di messa in parallelo sono rappresentate da resistenze dipendenti dalla distanza tra gli elementi che esse dividono, come spiegato nel capitolo 2. Il passaggio dalla situazione reale alla rappresentazione circuitale, in modo approssimato, è rappresentato e illustrato nella figura 17 (per una sola via).

Il circuito equivale dunque ad una linea bifilare, alimentata da tre sottostazioni elettriche sulla quale circolano tre treni; come detto prima non è considerata la rete parte alta tensione.

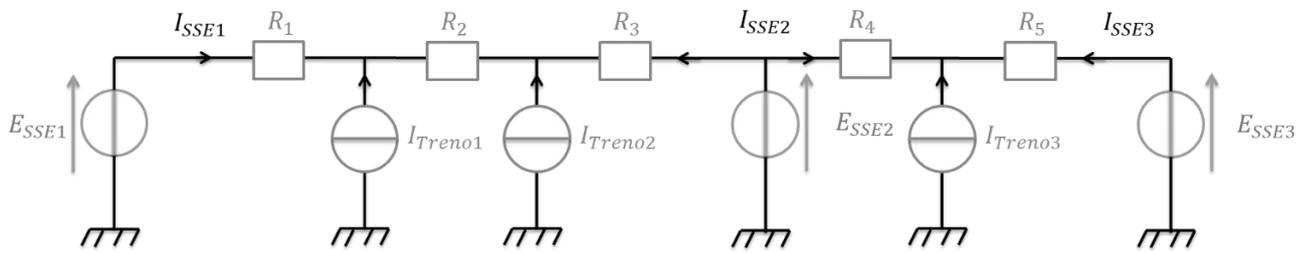


Figura 17: Rappresentazione circuitale approssimata della linea di esempio

La simulazione dei treni sulla linea è stata fatta con un programma scritto dalla dottoranda Marie Poline, al G2elab, in collaborazione con SNCF. Lo scopo del programma è quello di calcolare la tensione su ogni punto della linea elettrica e la corrente uscente da ogni sottostazione elettrica, a partire da dati forniti dalla SNCF e riguardanti la tipica attività dei treni sulla linea.

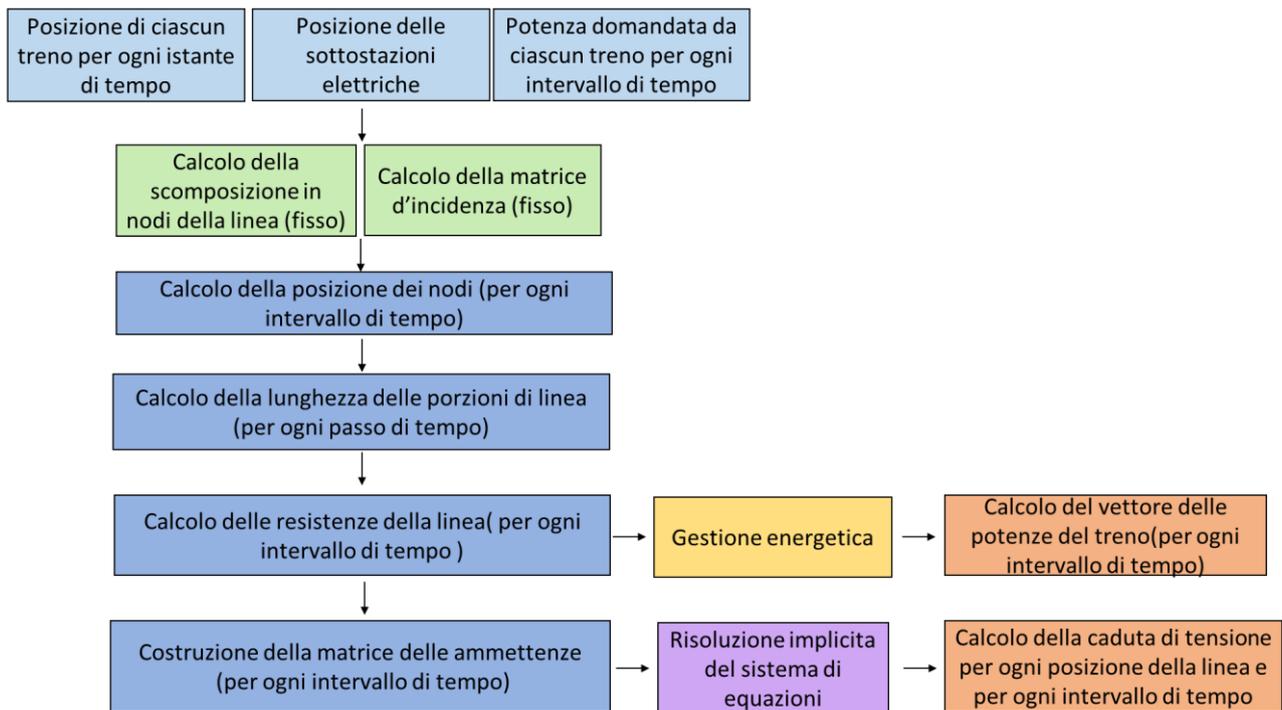


Figura 18 : Schema di funzionamento del programma di simulazione ferroviario. In azzurro gli INPUT ed in rosso gli OUTPUT

Nello schema riportato in figura 18 viene presentato il funzionamento del programma. L'ingresso del programma sono le informazioni SNCF sulla linea (blocchi in azzurro): il profilo di potenza di ogni treno in funzione della posizione chilometrica, la posizione di ogni treno in ogni istante di tempo e la posizione delle sottostazioni elettriche [4].

A partire da questi dati, il programma calcola le matrici topologiche di modellizzazione della linea (blocchi in verde), che restano invariate durante tutta la simulazione. In seguito il software ricalcola

la posizione degli elementi (sulla base della posizione dei treni sulla linea) per ogni passo di tempo e viene aggiornata la resistenza elettrica presente tra ogni elemento (e quindi anche la matrice delle ammettenze). Per ogni passo di calcolo, la gestione energetica calcola come il sistema possa soddisfare la domanda di potenza del treno: le potenze ottenute (potenza fornita dalla catenaria, potenza delle batterie e potenza dissipata dal freno meccanico) sono le prime uscite del programma [4].

Nell'ultima parte del software viene scritto un sistema di equazioni non lineare (rappresentazione matematica del circuito equivalente della linea) che viene risolto con il metodo numerico di Newton-Raphson. Le uscite del sistema sono contenute in un'unica matrice e sono (blocco rosso):

- la tensione di ogni treno per ogni istante di tempo
- le correnti di ogni SSE per ogni istante di tempo
- la potenza fornita dalla catenaria
- la potenza del sistema di accumulo
- la potenza dissipata dal freno meccanico

### **3.2 Modello della linea ferroviaria**

La strategia utilizzata per creare un modello di linea ferroviaria si ispira all'esperienza bibliografica in materia, ma senza utilizzare in maniera identica nessun modello già sperimentato.

In generale la linea, per essere studiata, viene suddivisa in nodi, che per il momento possono essere considerati scollegati dai nodi elettrici del circuito equivalente; viene dunque utilizzato un metodo nodale. Questo metodo consiste nel rappresentare le postazioni fisse (sottostazioni elettriche e postazioni di messa in parallelo) e i treni attraverso dei nodi. Le SSE forniscono potenza alla rete e sono dunque considerati generatori, mentre i treni assorbono potenza e quindi sono considerati carichi. Come detto precedentemente la catenaria, che collega questi nodi, è modellizzata come una serie di resistenze variabili.

Questo metodo è utilizzato in diverse versioni, si può infatti avere:

- una scomposizione della linea evolutiva ma tutti i nodi geograficamente fissi
- una scomposizione della linea fissa e tutti i nodi geograficamente fissi
- una scomposizione della linea fissa ed alcuni nodi geograficamente mobili

Nel programma di simulazione usato, si è utilizzato l'ultima versione del metodo. Questa versione ha come vantaggio quello di avere una scomposizione della linea fissa, e quindi il sistema di equazioni che deve essere risolto è sempre lo stesso; allo stesso tempo l'utilizzo di nodi mobili permette di tenere conto più precisamente della posizione del treno ed è quindi possibile valutare meglio la caduta di tensione locale.

#### **3.2.1 Modellizzazione della linea elettrica**

La linea è analizzata con il metodo nodale ed è dunque divisa in nodi. In questo metodo nel modello possono essere presenti sia nodi geograficamente mobili che nodi geograficamente fissi.

Quando un treno è presente sulla linea, il nodo mobile più vicino si collega a questo; il nodo rappresenta il punto in cui il treno sta domandando potenza alla catenaria. Il numero di nodi fissi è determinato dal numero di sottostazioni elettriche e di postazioni di messe in parallelo [4].

La determinazione del numero di nodi mobili è più complessa e si basa sul principio che il numero di nodi sia sufficiente per modellizzare la presenza dei treni in qualsiasi istante della simulazione.

Una regola fondamentale è quella che il numero di nodi mobili entro due sottostazioni equivalga al numero massimo di treni presenti tra le due SSE durante il tempo della simulazione. Nella figura 19 è dato un esempio di come venga stabilito il numero di nodi per una linea semplificata.

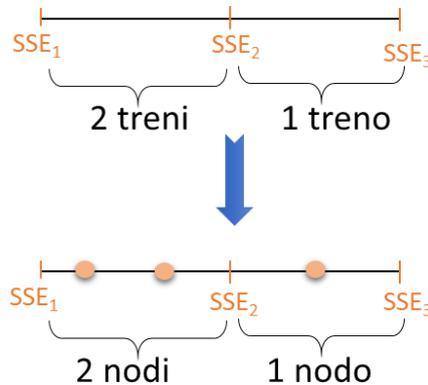


Figura 19: Esempio di calcolo del numero di nodi per due porzioni di linea. [4]

Nelle figure 20 e nella figura 21 viene mostrato come si modella la linea presa in considerazione all'inizio del capitolo (figura 13, 3 SSE, 6 treni). Supponendo che il numero massimo di treni presenti allo stesso istante tra ogni sottostazione sia quello rappresentato nella figura 16 (2 per la prima sezione e 2 per la seconda sezione), si possono modellizzare 3 nodi mobili (indicati con dei cerchi arancioni) e 3 nodi fissi (quadrati azzurri). Se si considera una situazione equivalente per la via di ritorno, la scomposizione della linea è quella della figura 16.

I nodi sono numerati N0,N1,...,N9 sulla figura 20. Per la modellizzazione è anche importante considerare le sezioni di linea tra ogni nodo, che saranno rappresentate da una resistenza di valore dipendente dalla lunghezza della sezione. Le sezioni di linea saranno numerate come descritto in figura 21.

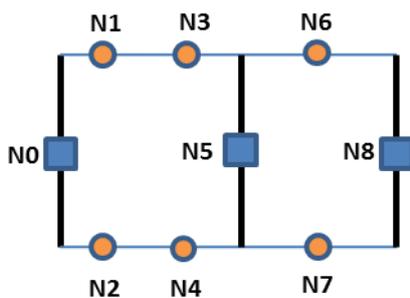


Figura 20: Scomposizione in nodi per la linea d'esempio

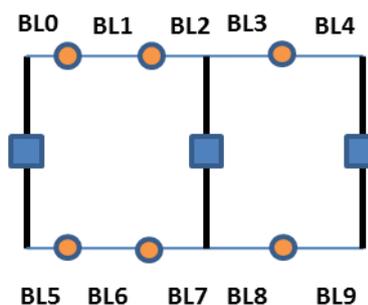


Figura 21: Numerazione delle porzioni di linea per la linea d'esempio

### 3.2.2 Modellizzazione dei treni

Nel software utilizzato è stato scelto di rappresentare i carichi elettrici dei treni come generatori di corrente. Questa scelta ha dei vantaggi e allo stesso tempo dei problemi che sono già stati spiegati nella parte teorica sulla modellizzazione, nel capitolo 2. I treni sono quindi rappresentati come un generatore di corrente ideale (figura 22), la cui corrente è correlata alla potenza che il treno

domanda alla catenaria in ogni istante di tempo. La parte di potenza erogata dalle batterie non è modellata da questa corrente, in quanto questo valore non influisce sulla tensione della linea elettrica. La corrente del generatore è dunque la corrente che il treno assorbe dalla catenaria istante per istante, il cui valore sarà maggiore nei momenti di accelerazione del treno, per esempio.

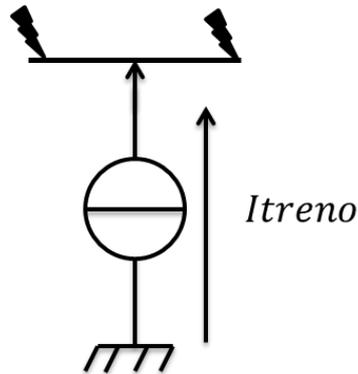


Figura 22 : Modellizzazione elemento treno

### 3.2.3 Modello delle sottostazioni elettriche

La modellazione delle sottostazioni elettriche rappresenta un'eccezione rispetto agli esempi trovati in letteratura [11]. L'utilizzo di un metodo nodale infatti significa anche l'utilizzo della legge dei nodi per la risoluzione del circuito equivalente della linea. Come sappiamo dalla letteratura ([11] [14], se viene utilizzata la legge dei nodi per l'analisi circuitale normalmente le sottostazioni sono modellate con un circuito equivalente di Norton, per comodità nella risoluzione delle equazioni. Nel modello in questione le sottostazioni elettriche sono invece modellate da un circuito equivalente di Thévenin (figura 23): un generatore di tensione continua in serie ad una resistenza (propria per ogni SSE) ed un raddrizzatore, che simboleggia la unidirezionalità della corrente per questo specifico caso (non può essere rinviata potenza alla rete). Il raddrizzatore introduce un problema di non continuità (per il passaggio da bloccato a non bloccato) e viene di conseguenza integrato nel modello tramite alcune equazioni non lineari [4].

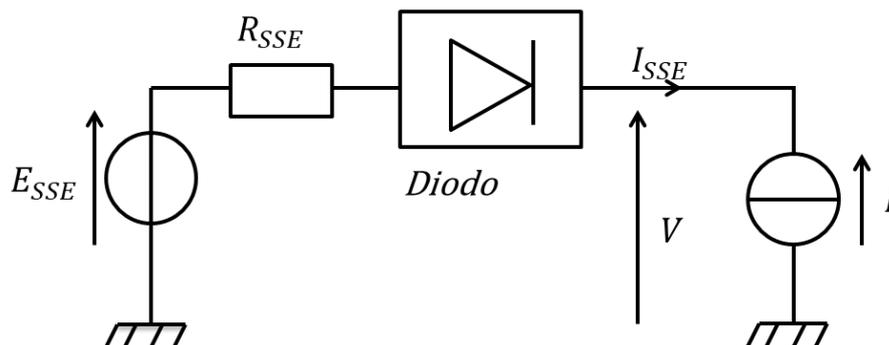


Figura 23 : Modellazione dell'elemento sottostazione elettrica

Dove

$E_{SSE}$ : tensione generata dalla sottostazione (1500 V o 1750 V in questa tesi)

$R_{SSE}$ : Resistenza interna della sottostazione elettrica

V: Tensione della linea elettrica

$I_{SSE}$ : Corrente erogata dalla sottostazione elettrica

### 3.3 Matrice delle incidenze

A partire dalla scomposizione della linea è possibile costruire una matrice topologica che metta in relazione i nodi e le sezioni di linea. La matrice (3.1) rappresenta la matrice dell'incidenza relativa alla linea ferroviaria d'esempio (figura 16). Le righe della matrice rappresentano i nodi (N0, N1,) e le colonne rappresentano le sezioni di linea comprese tra i nodi (BL0, BL1,). Nella matrice delle incidenze quando un nodo ed una porzione di linea sono adiacente, nella corrispettiva posizione comparirà il numero 1, altrimenti il numero 0.

$$I = \begin{matrix} & \begin{matrix} BL_0 & BL_1 & BL_2 & BL_3 & BL_4 & BL_5 & BL_6 & BL_7 & BL_8 & BL_9 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \begin{matrix} N_0 \\ N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \\ N_7 \\ N_8 \end{matrix} \end{matrix} \quad (3.1)$$

Si noti che il nodo di terra non compare nella matrice delle incidenze. Il nodo di terra dipende direttamente dagli altri nodi, quindi non deve comparire nella matrice dell'incidenza, dove devono essere rappresentati i soli nodi indipendenti. In questo modo la matrice consente di ricavare tutte le equazioni dei nodi indipendenti ed utilizzabili per la costruzione della matrice delle ammettenze e di risolvere il sistema per ricavare le tensioni nodali.

### 3.4 The modified node approach (MNA)- Il metodo nodale modificato

Il metodo nodale è un classico metodo per formulare equazioni di risoluzione per circuiti elettrici. Il suo ampio utilizzo è dovuto alla sua flessibilità, efficienza di calcolo ed un uso ridotto della memoria interna delle macchine di calcolo [13]. Un'altra caratteristica importante di questo metodo è la possibilità di lavorare con la matrice delle ammettenze, matrice molto pratica essendo sparsa quindi facilmente riducibile.

Il difetto principale di questo metodo è l'incapacità di trattare efficacemente la presenza di generatori di tensione e di elementi dipendenti dalla corrente, lineari o non lineari. Da qui la necessità di rappresentare le sottostazioni elettriche in generatori equivalenti di Norton (esempio nell'ambito ferroviario). Un altro difetto del metodo nodale classico è la difficoltà ad ottenere come output automatico del metodo le correnti dei rami considerati.

L'MNA inizia considerando il circuito con l'approccio classico, applicando la legge delle correnti (Kirchhoff) a tutti i nodi tranne che a quello noto. Nel caso in cui si abbiano solo conduttanze lineari e generatori di correnti il set di equazioni è lo stesso del metodo classico:

$$I = Y \cdot V \quad (3.2)$$

Dove Y è la matrice delle ammettenze. La matrice delle ammettenze rappresenta il circuito elettrico e la disposizione delle impedenze che lo caratterizzano. Le linee ferroviarie analizzate sono alimentate da linee elettriche in corrente continua. L'impedenza potrebbe dunque essere considerata una resistenza e l'ammettenza una conduttanza. Per convenzione (seguendo la maggior parte degli esempi in bibliografia) questi parametri verranno indicati come impedenza ed ammettenza (Z e Y) ma senza notazione fasoriale.

Nel caso siano presenti anche generatori di tensione o elementi dipendenti dalla corrente (come una capacità) il metodo MNA introduce le correnti di questi rami come variabili del sistema e le equazioni relative a questi rami come equazioni aggiuntive [21].

La matrice risultante può essere quindi espressa in questa forma:

$$\begin{bmatrix} Y_R & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ F \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$Y_R$ : matrice delle ammettenze relativa che esclude il contributo dei rami non compresi nel metodo nodale classico

B: contiene le derivate parziali di corrente (nel caso siano presenti elementi dipendenti dalla corrente) oppure l'elemento  $\pm 1$ , per gli elementi in relazione ai nuovi rami inseriti.

C e D: descrivono la topologia dei nuovi rami inseriti

In generale, per un circuito noto, le dimensioni della matrice sono il numero di nodi del sistema (escluso il nodo di terra) più il numero delle correnti da calcolare.

### 3.4.1 Caratteristiche generiche della matrice delle ammettenze nodali

La matrice delle ammettenze nodali è la matrice che rappresenta il legame tra le tensioni dei nodi e le correnti in uscita da essi. Questa matrice è uno dei motivi per cui normalmente si predilige il metodo nodale per l'analisi di rete, essendo una matrice facilmente manipolabile a livello computazionale. Il problema risiede nella composizione della matrice delle ammettenze. La matrice delle ammettenze può essere calcolata invertendo la matrice delle impedenze (nel caso in cui non sia singolare). Spesso però questo processo può essere laborioso a livello di calcolo, in particolare per matrici di dimensioni elevate.

Un metodo che può essere usato, spesso in simbiosi con l'MNA, è la "tecnica di costruzione per ispezione". In sintesi, tutti gli elementi fuori diagonale  $Y_{ij}$ , detti mutue ammettenze, vengono calcolati come la somma di tutte le ammettenze cambiate di segno tra i nodi i e j considerati. Gli elementi in diagonale  $Y_{ii}$ , chiamati auto-ammettenze, sono invece calcolati come la somma di tutte le ammettenze collegate al nodo i.

Queste semplici relazioni sono meglio espresse dalle equazioni:

$$Y_{ij} = -1/Z_{ij} \quad (3.4)$$

$$Y_{ii} = \sum 1/Z_{ij} \quad (3.5)$$

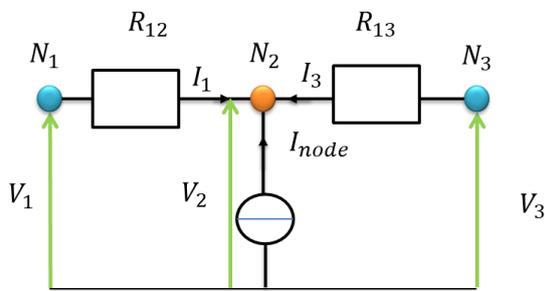


Figura 24: Dettaglio del circuito equivalente della sezione di linea considerata

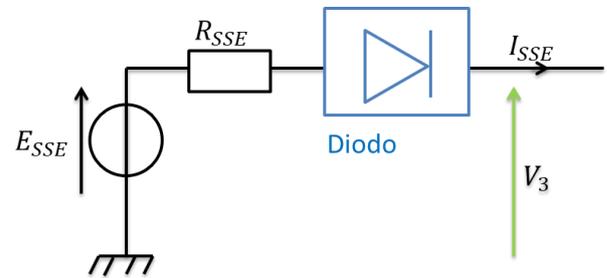


Figura 25: Dettaglio della sottostazione elettrica collegata al nodo 3

Utilizzando queste equazioni è stato scritto un algoritmo in grado di determinare la matrice delle ammettenze della rete in modo efficiente e rapido.

Si può considerare una sezione ridotta di linea ferroviaria e ricavare la matrice delle ammettenze per questo circuito semplificato, per verificare le proprietà prima esposte e per utilizzare l'MNA nel nostro caso studio. Lo schema circuitale della figura 24 può essere scritto per ogni nodo mobile della linea. In questo esempio noi consideriamo tre nodi: uno mobile non utilizzato (N1), un nodo mobile a cui è collegato un treno in transito (N2) ed un nodo fisso (N3), che in questo caso è una sottostazione elettrica (rappresentata in figura 25).

Si può scrivere la legge dei nodi per il nodo due e successivamente esprimere tutte le grandezze in funzione delle tensioni nodali:

$$I_1 + I_3 = -I_{nodo} \quad (3.6)$$

$$(V_1 - V_2)/R_{12} + (V_3 - V_2)/R_{23} = -I_{nodo} \quad (3.7)$$

$$V_2(1/R_{12} + 1/R_{23}) - V_1/R_{12} - V_3/R_{23} = I_{nodo} \quad (3.8)$$

Per integrare nel calcolo le sottostazioni è necessario utilizzare un numero di equazioni uguali al numero di sottostazioni. In questo caso specifico sulla linea è presente una sola SSE, rappresentata con il nodo N3. L'equazione della maglia:

$$V_3 = E_{SSE} - I_{SSE} \cdot Z_{SSE} \quad (3.9)$$

$$E_{SSE} = V_3 + I_{SSE} \cdot Z_{SSE} \quad (3.10)$$

A partire dalle equazioni 3.8 e 3.10, e dalla matrice 3.3 è possibile formulare la matrice delle ammettenze per la tipologia di linea considerata.

$$Y = \begin{pmatrix} & \text{N1} & \text{N2} & \text{N3} & \text{SST1} \\ \begin{pmatrix} \frac{1}{R_{12}} & -\frac{1}{R_{12}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_{12}} & \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{23}} & -\frac{1}{R_{23}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{23}} & \frac{1}{R_{23}} & 1 \\ 0 & 0 & 1 & R_{SSE} \end{pmatrix} & \text{N1} \\ & \text{N2} \\ & \text{N3} \\ & \text{SSE1} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

La parte superiore sinistra della matrice (3.11), di dimensioni 3x3, rispetta quanto affermato dalla tecnica di costruzione per ispezione, che verrà quindi usata per ricavare la matrice delle ammettenze dell'intera linea, più complessa che quella di esempio. La colonna 4 e la riga 4 caratterizzano il ramo in cui compare il generatore di tensione e permettono di considerare nelle equazioni la resistenza interna della sottostazione.

### 3.4.2 Struttura globale della matrice delle ammettenze

La matrice (3.12) è una matrice delle ammettenze generica, che rappresenta l'intera linea del nostro caso studio. La matrice è suddivisa in quattro matrici, come di consueto nel MNA [21]. Viene definito N il numero di nodi totali della linea e NL il numero di nodi totali sommato al numero delle sottostazioni ed è quindi possibile analizzare dimensionalmente la matrice. Gli elementi che sono uguali ad I hanno lo stesso valore della matrice delle incidenze per quelle coordinate (o il valore 0 o il valore 1) e danno indicazioni sui rami aggiuntivi.

$$Y = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} Y_{00} & Y_{01} & \dots & \dots & Y_{0N} \\ Y_{10} & Y_{11} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & \dots & \dots & \dots & Y_{NN} \end{matrix}} & \begin{matrix} -I & \dots & -I \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots \\ -I & \dots & -I \end{matrix} \\ \begin{matrix} I & \dots & \dots & \dots & I \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ I & \dots & \dots & \dots & I \end{matrix} & \boxed{\begin{matrix} Y_{N+1,N+1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & Y_{NL} \end{matrix}} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

} Numero di nodi  
} Numero di sottostazioni

## 3.5 Risoluzione del sistema di equazioni

Unendo tutte le equazioni scritte nel capitolo precedente, relative ad ogni nodo, in unico sistema si ottiene :

$$Y \begin{pmatrix} V \\ I_{SSE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{nodo} \\ E_{SSE} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Il vettore composto dalle tensioni nodali e dalle correnti erogate dalle sottostazioni è il vettore delle incognite,  $A$  la matrice delle ammettenze,  $I_{nodo}$  è il vettore delle correnti uscenti dai nodi mobili e  $E_{SST}$  è la tensione a cui la SSE alimenta la linea. Tutte le variabili sono note tranne la corrente uscente dai nodi mobili, che può essere calcolata con questa equazione:

$$I_{nodo} = P_{cat}/V \quad (3.14)$$

Dove  $P_{cat}$  è la potenza domandata dal nodo alla catenaria in un determinato istante. Il valore di  $P_{cat}$  corrisponde dunque alla potenza domandata dal treno alla catenaria, se un treno è collegato al nodo, altrimenti il valore di  $P_{cat}$  è uguale a 0. La tensione nodale è un'incognita ed è a determinante, questo che significa che il sistema di equazioni sarà un sistema non lineare.

Il metodo utilizzato per risolvere il sistema non-lineare è il metodo di Newton-Raphson, implementato nel programma. L'utilizzo di un metodo iterativo ed in generale il trattare un sistema non lineare può portare dei problemi di convergenza della soluzione, che tratteremo nel capitolo 4.

### 3.6 Gestione energetica

La parte di codice chiamata gestione energetica si occupa di stabilire come il sistema possa soddisfare la domanda di potenza del treno e degli ausiliari. L'algoritmo sceglie quale fonte di energia utilizzare (linea elettrica, batteria o frenata rigenerativa) in base alle condizioni presenti della locomotiva, istante per istante. Sono dati come ingressi dell'algoritmo tutte le informazioni sulla posizione del treno, la tensione della linea e lo stato di carica della batteria. Le uscite sono le potenze che insieme soddisfano la domanda. La gestione energetica può essere scelta indipendentemente dal numero di treni o di stazioni di ricarica presenti sulla linea.

L'algoritmo permette di regolare e di ripartire le seguenti potenze [4]:

- La potenza fornita dalla catenaria, il cui limite è definito da un algoritmo che valuta la disponibilità della linea elettrica punto per punto
- La potenza fornita dalle batterie, che può essere positiva o negativa in base al fatto che sia richiesta un'azione di carica o un'azione di scarica
- La potenza fornita da un motore diesel (nel caso in cui si consideri una locomotiva ibrida)
- La potenza dissipata dai freni meccanici

Ci sono diverse possibilità di gestione energetica, che si dividono in due grandi gruppi: il controllo a partire da un algoritmo di ottimizzazione o il controllo sulla base di regole.

In questa tesi sono state utilizzate strategie energetiche fondate su un controllo basato su regole. Usando questo controllo ci sono due principali strategie:

- Gestione energetica per soglia (il bilancio di potenze è stabilito in base alla tensione della linea elettrica)
- Gestione elettrificazione parziale (gestione creata per prendere in considerazione eventuali zone non elettrificate)

### 3.6.1 Calcolo della potenza massima erogabile dalla catenaria

Una volta stimata la tensione della linea in un determinato punto, occorre calcolare la potenza massima che può essere fornita dalla catenaria senza che la tensione esca dall'intervallo di tensioni ammesse dalla norma ferroviaria.

Per calcolare la potenza massima viene considerato un circuito equivalente in cui compaiono due SSE ed un treno (figura 26), il circuito è semplificato in quanto non viene considerata la possibilità di avere un numero maggiore di treni tra 2 SSE.

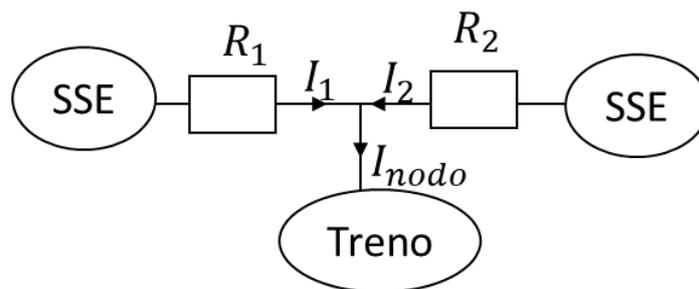


Figura 26 : Circuito equivalente ai fini del calcolo della potenza massima della catenaria.[4]

In [4] viene ricavata ed utilizzata questa formula:

$$P_{cat}^{max} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2)V_{limite} - (R_1 + R_2)V_{limite}^2}{R_1R_2} \quad (3.6)$$

Dove

$R_1, R_2$ : resistenze della linea di contatto che separano i treni e le sottostazioni

$I_1, I_2$ : correnti fornite dalle sottostazioni elettriche al treno

$I_{nodo}$ : corrente assorbita dal nodo mobile (treno)

$V_{limite}$ : tensione imposta come limite dalla norma e cambia a seconda della situazione di moto in cui si trova; può essere:

- $V_{trazione}$ : se il treno è in modalità trazione ed assume un valore di poco maggiore al valore minimo della tensione imposto dalla norma

- $V_{frenata}$  se il treno è in modalità frenata ed assume un valore di poco minore alla tensione massima imposta dalla norma
- $V_{ricarica}$ : tensione minima che si impone alla quale si può ricaricare il sistema di accumulo

$V_{ref}$ : tensione di riferimento scelta ugualmente a seconda del regime di moto:

- In caso di trazione è uguale alla tensione a vuoto delle sottostazioni
- Nel caso di frenata è la tensione massima che si può avere in modo permanente sulla linea.

### 3.6.2 Gestione energetica per soglia

La gestione energetica per soglia (figura 27) nasce dalla necessità di controllare la tensione di linea, spesso sottoposta a brusche variazioni di domanda di potenza e quindi a innalzamenti o cadute di tensione.

La gestione è stata impostata considerando le norme ora vigenti in Francia, secondo cui la tensione minima del pantografo non può essere inferiore a 1000 V, la tensione media deve essere maggiore di 1350 V e la tensione massima non può superare i 1950 V.

Vengono stabilite due valori di tensione, nominati  $soglia_1$  e  $soglia_2$  dove  $soglia_1$  è minore di  $soglia_2$ . Per tensioni inferiori della  $soglia_2$  il sistema di accumulo fornisce potenza ausiliare alla potenza fornita dalla catenaria, per evitare un'eccessiva caduta di tensione; per tensioni maggiori alla  $soglia_2$  la batteria contribuisce all'assorbimento della potenza da dissipare (funzionamento valido nel caso si supponga che l'energia possa essere rinviata in parte anche alla catenaria). In sintesi, detta  $V$  la tensione al pantografo per un determinato treno:

- Se  $V < soglia_1$  o  $V > soglia_2$  la batteria si prende carico della trazione o della frenata rigenerativa;
- Se  $soglia_1 < V < soglia_2$  il treno si trova in un regime di funzionamento corretto e pertanto è la catenaria responsabile sia della trazione che della frenata.

Per applicare la strategia energetica per soglia è necessario considerare la tensione nell'intervallo di tempo interessato. Non è possibile risolvere il sistema di equazione con cui normalmente si può calcolare la tensione nodale, perché mancano le potenze che caratterizzano il sistema in un determinato istante, termini noti del sistema di equazioni.

Nella tesi di dottorato [4] sono stati usati due metodi per stimare la tensione della linea:

- Il calcolo della derivata temporale della tensione
- Il modello equivalente semplificato della linea.

Nel corso di questa tesi le metodologie di stima della tensione non saranno analizzate, perché già implementate nell'algoritmo di simulazione senza la necessità di apportare alcuna modifica.

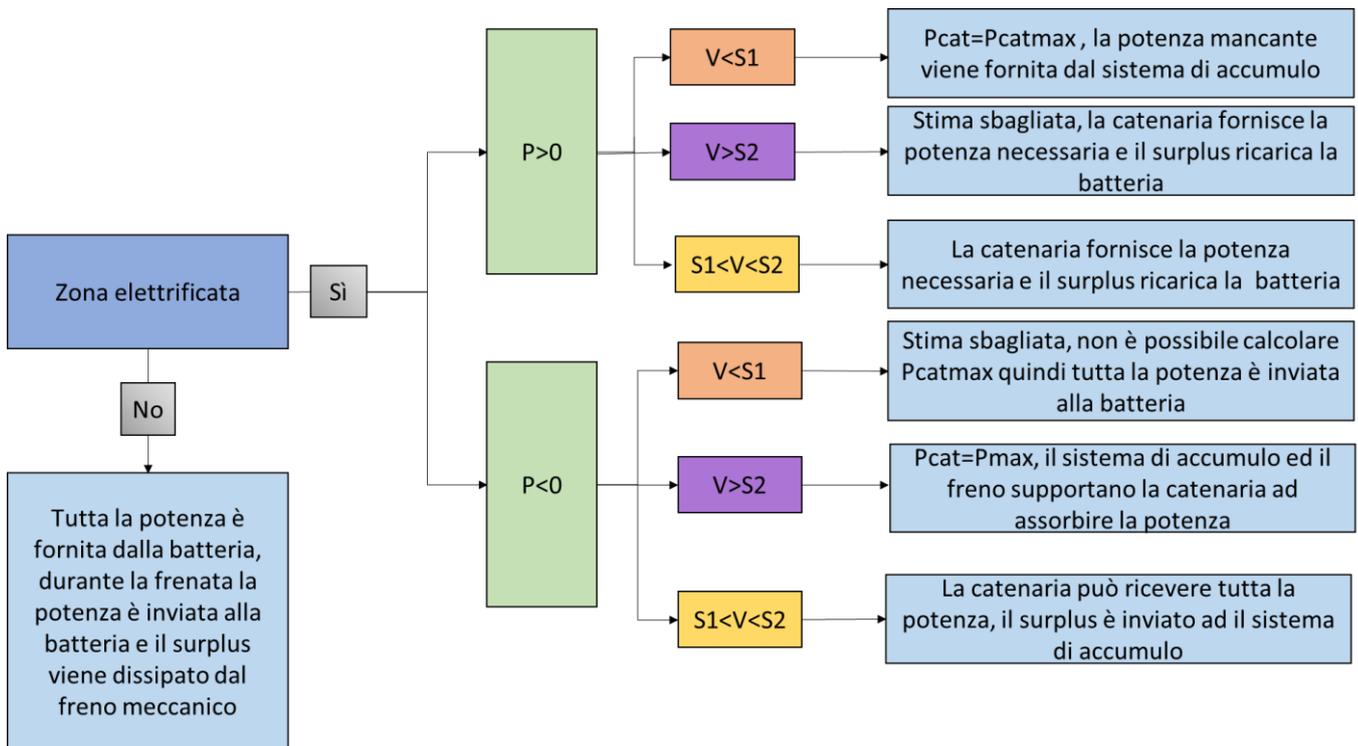


Figura 27 : Schema approfondito del funzionamento della gestione energetica per soglia. S1 è soglia<sub>1</sub> e S2 è soglia<sub>2</sub>

### 3.6.3 Gestione elettrificazione parziale

La seconda strategia comporta una gestione energetica semplificata, basata su regole, ma indipendente dalla tensione di linea. Il fatto di dissociare la gestione energetica dal controllo della tensione della linea elettrica è possibile dal momento in cui si consideri un caso di studio a bassa densità di treni. Una bassa densità di treni implica una minore sollecitazione della catenaria e quindi minori cadute di tensione sulla linea; il programma calcola comunque le tensioni in ogni punto per verificare quest'ipotesi. Questa gestione semplificata, riportata in figura 28, impone che la potenza fornita dalla catenaria sia nulla nel momento in cui un determinato treno si trovi in una zona non elettrificata. In caso di frenata ha luogo una frenata rigenerativa (si ricarica la batteria) fino al limite di potenza della batteria oppure fino a che l'SoC non diventa più alto di un valore considerato sano per la batteria (normalmente 80-85 %).

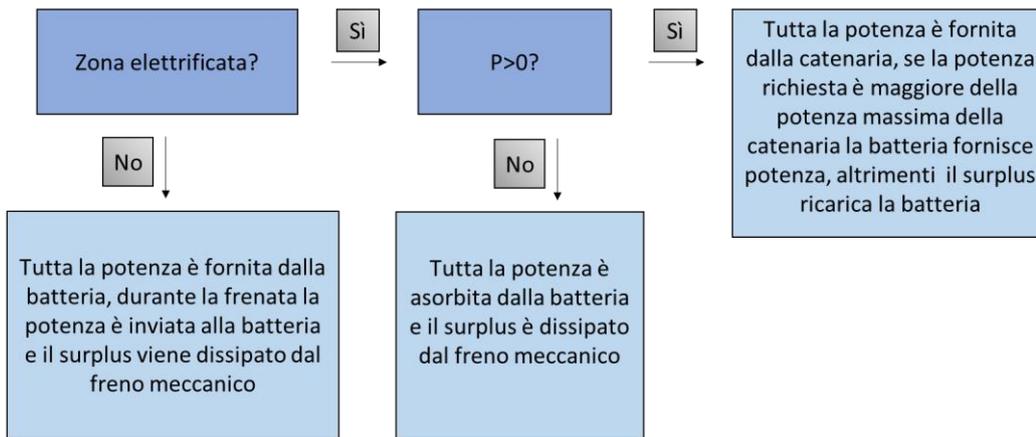


Figura 28: Schema della gestione energetica non dipendente dalla tensione di linea

Questa gestione energetica esclude la possibilità di rinviare energia alla catenaria, quindi in fase di frenata intervengono esclusivamente il sistema di accumulo ed il freno meccanico. Lo scopo di questa strategia è quello di ottimizzare a livello energetico la trazione del treno, imponendo che la batteria fornisca potenza per la trazione quando ha un SoC elevato. Questo algoritmo sarà il punto di partenza per la programmazione di una gestione energetica che includa la presenza di zone non elettrificate.

## 4 Presentazione del caso studio

La linea studiata durante il lavoro di tesi è una linea ferroviaria turistica che si trova nel sud ovest della Francia. La linea collega la città di Bordeaux con la città di Le Verdon sur mer, situata in zona costiera. Questa linea è di particolare interesse per SNCF, in quanto si tratta di una linea piuttosto datata e per la quale servirebbe un grande investimento di rinnovamento. Allo stesso modo si tratta di una linea a bassa densità di traffico e quindi un ingente investimento a livello di infrastruttura sarebbe una spesa non sostenibile.

La linea è lunga 110 km e serve 14 stazioni lungo il suo percorso. La linea è alimentata in corrente continua ad una tensione di 1500 V, alimentazione tipica delle zone meridionali della Francia. La tensione è garantita sulla linea da sei sottostazioni elettriche. Questo numero di sottostazioni, considerando la lunghezza della linea ed il tipo di alimentazione a bassa tensione, è abbastanza esiguo e potrebbe facilmente portare a cadute di tensione sulla linea.

Nella tabella 1 sono riportate tutte le stazioni della linea e le sottostazioni elettriche associate alla distanza in metri dal punto considerato 0 metri, cioè Bordeaux.

Stazione	Posizione [m]	Sotto-stazione	Posizione [m]
Bordeaux	0	La Medoquine	4000
Merignac-Arlac	7270	Blanquefort	17351
Cauderan-Merignac	9089	Labarde	31696
Bruges	15088	Pauillac	57500
Blanquefort	18885	Lesparre	77195
Parempuyre	21737	Soulax	103668
Ludon	25227		
Macau	28705		
Margaux	35244		
Moulis en Medoc	42455		
Pauillac	57257		
Lesparre Medoc	77195		
Soulac sur mer	103815		
Le Verdon sur mer	110681		

Tabella 1 : Elenco delle stazioni e delle sottostazioni elettriche presenti sulla linea, associate alla posizione in metri.

Nel lavoro di questa tesi sono state affrontate tre prospettive differenti:

- Analisi di una mattina infrasettimanale considerando varie possibilità di non elettrificazione e considerando tutti i treni realmente presenti sulla linea
- Analisi di fattibilità di non elettrificazione considerando il tragitto di un singolo treno, andata e ritorno

#### 4.1 Modellizzazione della linea ferroviaria Bordeaux - Le Verdon sur mer

I dati esposti sulla linea Bordeaux - Le Verdon sur mer sono sufficienti per definire un modello di linea ferroviaria. In generale i dati di posizione dei treni (in funzione del tempo di simulazioni) vengono raccolti dal software per effettuare la “divisione in nodi della linea”, come spiegato nel capitolo 3 (figura 19). Il tipo di modellizzazione spiegato nel capitolo 3, necessita che la linea ferroviaria inizi e termini con la presenza di una sottostazione elettrica. La sottostazioni elettriche sono riportate nella tabella1, associate alla distanza in chilometri dal punto zero della simulazione, la stazione ferroviaria di Bordeaux. Si può notare che la linea ferroviaria non inizia né termina con una sottostazione elettrica, è dunque necessario inserire nel programma due sottostazioni fittizie allo scopo di rendere possibile la modellizzazione. Le SSE sono inserite al metro 0 e al metro 110681 della linea. Tale circostanza rappresenta un limite del modello, ma non influenza la simulazione a livello di tensione di linea, in quanto entrambe le nuove SSE si trovano nei pressi di due sottostazioni reali.

Nella figura 29 è rappresentata la divisione in nodi per la linea Bordeaux- Le Verdon sur mer. Sulla linea sono presenti 36 nodi, di cui 8 fissi (quadrati azzurri) rappresentanti le sottostazioni e 28 mobili (punti arancioni). Nella figura 29 sono rappresentate la via di andata (parte superiore del modello) e quella di ritorno (parte inferiore del modello), questa parte della modellizzazione è fissa per tutto il tempo della simulazione.

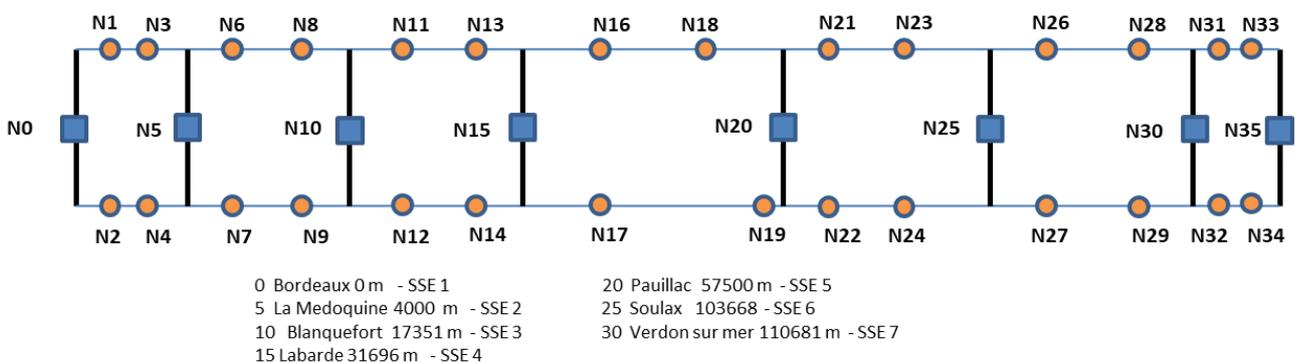


Figura 29: Modellizzazione della linea ferroviaria della linea Bordeaux - Le Verdon sur la mer. Le SSE sono rappresentate come nodi fissi (quadrati blu), gli altri sono nodi mobili (punti arancioni)

## 4.2 Analisi “mattina infrasettimanale”

Il programma utilizzato per questa tesi necessita di stabilire una missione ferroviaria da simulare. In particolare, devono essere forniti come entrate dei vettori che contengono informazioni sulle posizioni dei treni in funzione del tempo, delle potenze domandate dal motore e informazioni generali sulla linea ed il traffico.

In questo caso studio, si è deciso di considerare la situazione di traffico durante una mattina infrasettimanale (il pomeriggio è stato escluso dal calcolo per rendere più rapida la simulazione). Per la raccolta dati è stato utilizzato il sito ufficiale di SNCF; è stato così possibile simulare con precisione l’andamento dei treni sulla linea, rispettando orari e stazioni di partenza ed arrivo. Durante la mattina selezionata sono presenti 14 treni sulla linea, 6 in direzione di Bordeaux e 8 in direzione opposta. La simulazione inizia alla partenza del primo treno alle ore 5.40 ed ha una durata di 15852 secondi. L’andamento del traffico è rappresentato nel grafico in figura 30 in cui la distanza da Bordeaux è in funzione del tempo di simulazione.

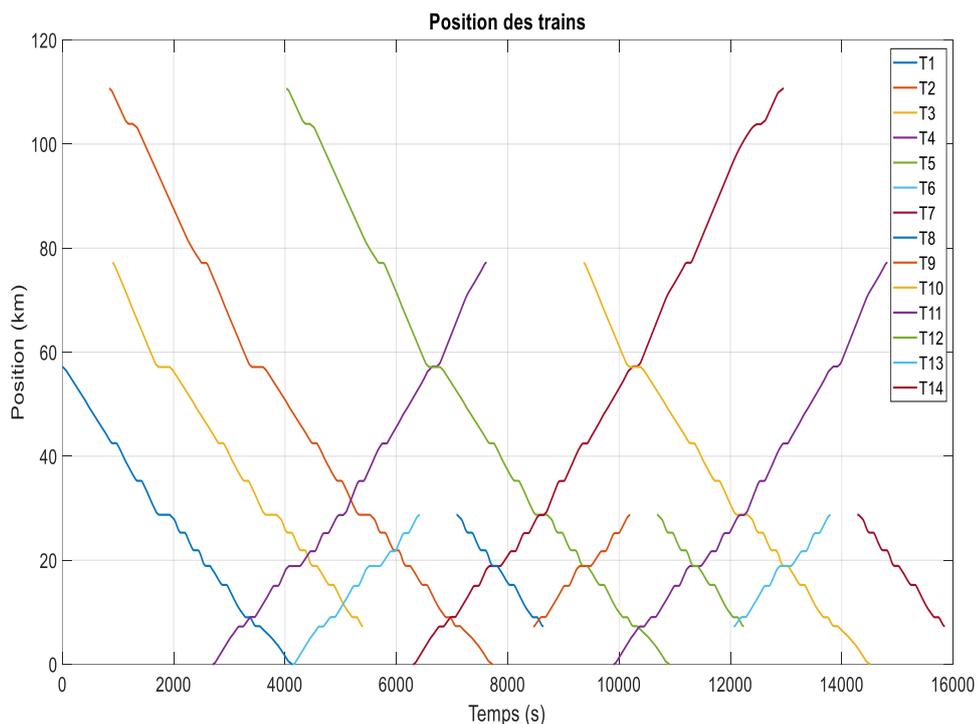


Figura 30: Grafico delle posizioni dei treni in funzione del tempo di simulazione. Il tempo di simulazione totale è di 15852 s

Per questo caso di studio sono stati presentati dall’azienda tre scenari di non elettrificazione di cui è stato necessario verificare la fattibilità:

- Prima opzione: non elettrificazione tra la sottostazione di Pauillac alla sottostazione di Lesparre (figura 31)

- Seconda opzione: non elettrificazione da Pauillac a Soulux (figura 32)
- Terza opzione: non elettrificazione da Labarde a Soulux (figura 33)

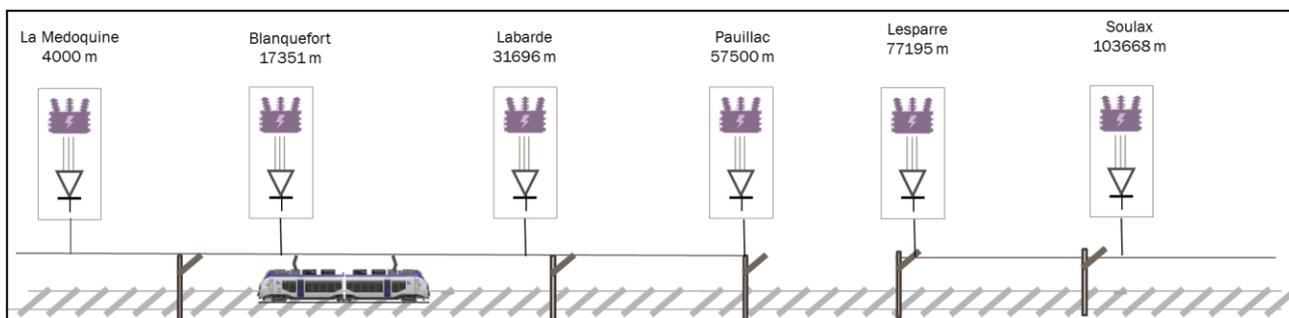


Figura 31 : Scenario di non elettrificazione della linea ferroviaria tra la SSE di Pauillac e la SSE di Lesparre (prima opzione)

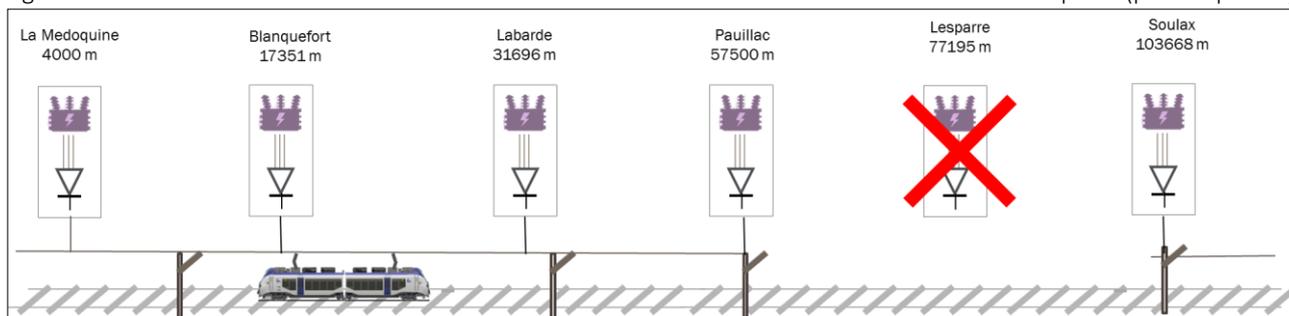


Figura 32: Scenario di non elettrificazione della linea ferroviaria tra la SSE di Pauillac e la SSE di Soulux (seconda opzione)

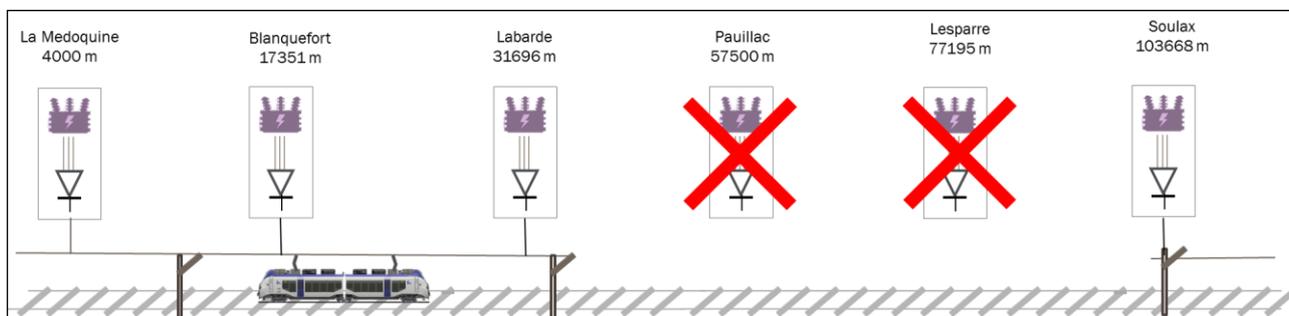


Figura 33 : Scenario di non elettrificazione della linea ferroviaria tra la SSE di Labarde e la SSE di Soulux (terza opzione)

La terza possibilità di simulazione, che temporalmente è stata svolta successivamente, consiste nel considerare il tragitto di un singolo treno e di valutare la fattibilità di percorso a livello di autonomia energetica. Lo studio consiste nel verificare che il treno possa percorrere intere parti non elettrificate e dopo una breve ricarica percorrere il medesimo percorso in direzione opposta. Il tutto deve verificarsi garantendo che lo stato di carica della batteria non sia mai superiore od inferiore ad alcuni parametri di sicurezza consigliati dal costruttore. In questo caso gli scenari di non elettrificazione considerati sono stati forniti direttamente da SNCF, in base alle sezioni di linea in cui siano necessarie modifiche alla struttura o, in alcuni casi, la ristrutturazione totale della tratta.

## 5 Modifiche del programma di simulazione

### 5.1 Inserimento delle zone non alimentate

Il programma [4] è stato creato per analizzare linee in cui transitano treni o ibridi o in cui il sistema di accumulo aiuta la catenaria per fornire la potenza necessaria alla trazione. Le linee trattate nel corso di quest'opera [4] sono linee interamente elettrificate e lo scopo del sistema di accumulo (sempre inteso come batterie in cooperazione con super-condensatori) è quello di sostenere la catenaria per evitare cadute di tensione sulla linea di contatto e di ottimizzare la gestione energetica per ottenere un risparmio di energia elettrica. Lo scopo di questo lavoro di tesi è l'analisi di linee in cui siano presenti intere sezioni non elettrificate, quindi è necessario apportare delle modifiche al software. Per questo particolare studio si è supposto che il sistema di accumulo sia composto dalle sole batterie, non verrà quindi considerato alcun super-condensatore. In questo capitolo saranno illustrate tutte le modifiche eseguite sul software già esistente.

#### 5.1.1 Potenza fornita dalla catenaria nulla

La prima modifica effettuata per considerare la presenza di zone non elettrificate è stata di modificare la gestione energetica senza modificare, per il momento, la modellizzazione della linea. Il primo passo è stato di aggiungere una parte di codice nella gestione energetica per controllare se un determinato treno si trovi in una zona non elettrificata in un determinato istante di tempo.

La gestione energetica è stata modificata in modo tale da imporre che la potenza della catenaria (per un determinato treno) sia uguale a 0 se il treno si trova in una zona identificata come non elettrificata (vedi figura 28).

A livello di potenza fornita questa modifica è risultata efficace in quanto, quando un treno si trova in una zona non elettrificata, viene negata la possibilità di utilizzare la catenaria (imponendo la potenza fornita dalla catenaria uguale a 0) ed è quindi necessario che usi le batterie.

Il problema sorge nel momento in cui vengono analizzate le correnti delle sottostazioni. L'analisi delle correnti delle sottostazioni risulta una verifica efficace delle modifiche apportate, perché mostra chiaramente se la simulazione viene influenzata correttamente dalla presenza di zone non elettrificate.

Nella figura 34 viene rappresentata una situazione reale che abbiamo incontrato nell'analisi della linea ferroviaria utilizzata come test. Un treno transitante sulla linea di ritorno (in basso in figura 34) è collegato al nodo mobile 19 ad inizio simulazione. Il nodo in questione è al di fuori della zona non elettrificata, dunque in una situazione reale la sottostazione numero 4 non può fornire corrente al

nodo, perché non collegati da alcuna linea. La SSE 4 inizierà a fornire corrente al nodo 19 solo nel momento in cui il treno uscirà dalla zona non elettrificata, a quel punto sarà la SSE 5 a non fornire più corrente.

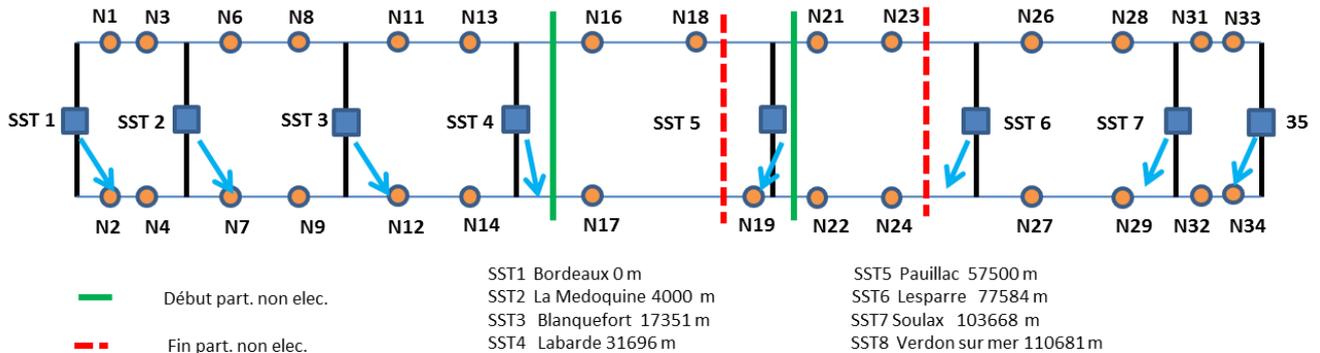


Figura 34: Dettaglio della modellizzazione della linea di test, sono evidenziati i contributi in corrente di ognuna delle 8 sottostazioni elettriche.

Nella figura 35 sono indicate le correnti delle due sottostazioni in questione (SSE 4 e SSE 5) in funzione del tempo. Si può notare che quando il treno si trova nella zona non elettrificata, le correnti di entrambe le sottostazioni sono nulle, indicazione di un buon funzionamento dell'algoritmo. Allo stesso tempo, prima che il treno entri nella zona non elettrificata, la corrente della SSE 4 non è nulla ma in certi punti tende a superare la corrente della SSE 5 ed a raggiungere valori di 500 A, questo risultato è fisicamente sbagliato. Si può concludere che per simulare la presenza di zone non elettrificate sulla linea non è sufficiente modificare l'algoritmo della gestione

energetica.

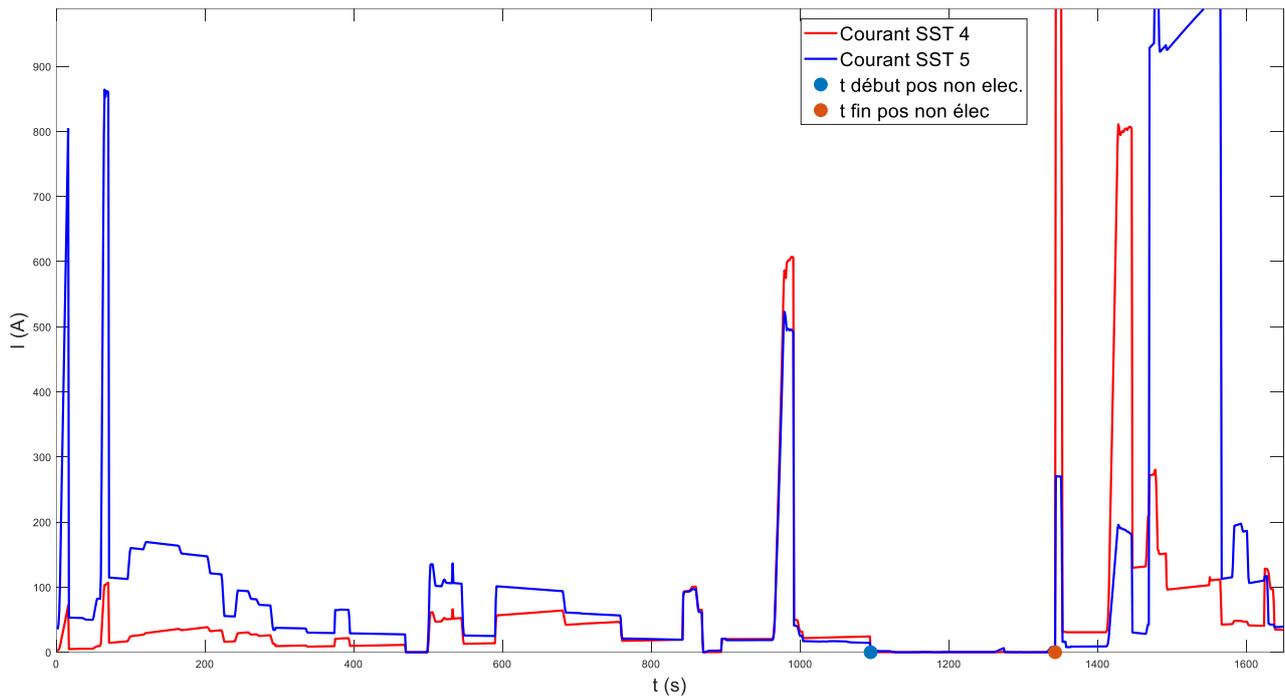


Figura 35 : Correnti fornite dalle sottostazioni elettriche in funzione del tempo. In rosso la corrente relativa alla SSE 4 e in blu la corrente relativa alla SSE 5.

### 5.1.2 Modifica della modellizzazione linea

La modifica della sola gestione energetica è stato un primo tentativo per considerare la presenza di zone non elettrificate sulla linea ferroviaria. Il problema principale è che l'attuale modello della linea non prende in conto questa eventualità e di conseguenza il circuito elettrico equivalente non è corretto in corrispondenza di una zona non elettrificata. Questo è il motivo per cui alcuni valori di grandezze elettriche della simulazione sono errati. Il programma [4], non è stato originariamente creato per modellizzare linee ad elettrificazione parziale, quindi l'opzione di avere sezioni di linea senza catenaria non è applicabile con questo software.

L'unica cosa che è possibile fare, non essendo possibile riscrivere l'intero codice, è modificare opportunamente il circuito equivalente ogni volta che sia necessario. La soluzione trovata è di identificare le sezioni di linea problematiche (nel caso della figura 34, la sezione tra il nodo 19 ed il nodo 17) e di modellarle con una resistenza elevata, in modo da simulare, a livello matematico, l'equivalente di un circuito aperto.

Ogni sezione di linea (intesa come distanza tra due nodi) ha una resistenza elettrica che è in funzione della sua lunghezza ed è in continua evoluzione, per modellizzare lo spostamento dei treni e la variazione di corrente richiesta alle sottostazioni. Come spiegato nell'introduzione del software, nel capitolo 3, per ogni intervallo di tempo viene valutata la posizione di ogni treno, calcolate le

resistenze di ogni spezzone di linea ed infine costruita la matrice delle ammettenze, che viene aggiornata per ogni passo di calcolo.

La strategia scelta è stata di modificare la matrice delle ammettenze, dopo la sua modifica automatica dovuta al cambiamento di posizione dei treni, per cambiare l'ammettenza equivalente tra i due nodi interessati, imponendola ad un valore prossimo allo zero. Per rispettare la simmetricità della matrice delle ammettenze veniva anche modificato l'elemento simmetrico, come descritto nello schema nella figura 36.

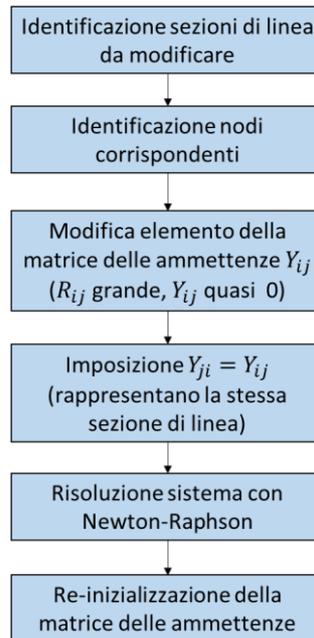


Figura 36: Algoritmo di modifica della matrice delle ammettenze Y

Questa modifica porta ad un errore nella applicazione del metodo di Newton-Raphson, specificatamente un errore di convergenza, cioè il sistema non riesce a raggiungere una soluzione di precisione stabilita (per alcuni istanti di tempo) senza superare il numero massimo di iterazioni stabilito. Questo errore deriva dal fatto che modificare la matrice delle ammettenze è come modificare il circuito elettrico equivalente; le modifiche fatte hanno dunque dato luogo ad un circuito equivalente assurdo.

Una delle regole di costruzione per una matrice delle ammettenze, fondamento per la costruzione per ispezione della matrice, è riportata nell'espressione (5.1):

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^{NN} |Y_{ij}| \quad (5.1)$$

L'algoritmo riportato in figura 36 si occupa trovare le sezioni di linea adiacenti alle sezioni non elettrificate, modificare la matrice delle ammettenze per simulare la presenza di una grande

resistenza (quindi di un circuito aperto) e modificare ulteriormente la matrice perché risulti essere simmetrica. Questa modifica non rispetta completamente le regole di costruzione per ispezione della matrice delle ammettenze spiegate nel capitolo 3, in particolare non viene applicata la relazione (5.1). Risulta infatti necessario che la somma dei valori assoluti delle ammettenze fuori diagonale della stessa riga sia uguale all'elemento in diagonale della stessa riga.

Le modifiche eseguite sulla matrice non rispettano dunque la struttura della matrice delle ammettenze, risulta necessario modificare anche l'elemento in diagonale sulla stessa linea modificata precedentemente. L'algoritmo finale di modifica della matrice è spiegato nella figura 37.

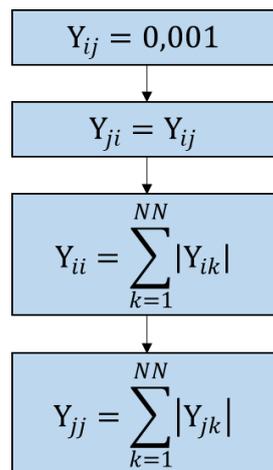


Figura 37: Algoritmo di modifica definitivo della matrice delle ammettenze Y

Riassumendo, il nuovo algoritmo individua le zone non elettrificate e quando un treno si trova all'interno di esse, impone che la potenza domandata alla catenaria sia uguale a 0. Nel caso in cui il treno si trovi in una sezione di linea compresa tra una sottostazione elettrica ed una zona non elettrificata, l'algoritmo modifica opportunamente la matrice delle ammettenze, per simulare un circuito aperto sulla linea, lato zona non elettrificata. Il risultato ottenuto è che le sottostazioni elettriche non possono fornire corrente a treni che si trovano dall'altro lato di una zona non elettrificata.

### 5.1.3 Verifica valori correnti delle sottostazioni elettriche

L'algoritmo integrato per simulare la presenza di zone non elettrificate, inserendo piccole ammettenze sulla linea, non provoca problemi di calcolo e conduce a risultati attendibili a livello di tensioni sulla linea e di equilibri energetici (a livello locale). Si rende necessario tuttavia una verifica a livello delle correnti delle sottostazioni, per verificare che effettivamente il circuito elettrico veda le zone non elettrificate come un circuito aperto.

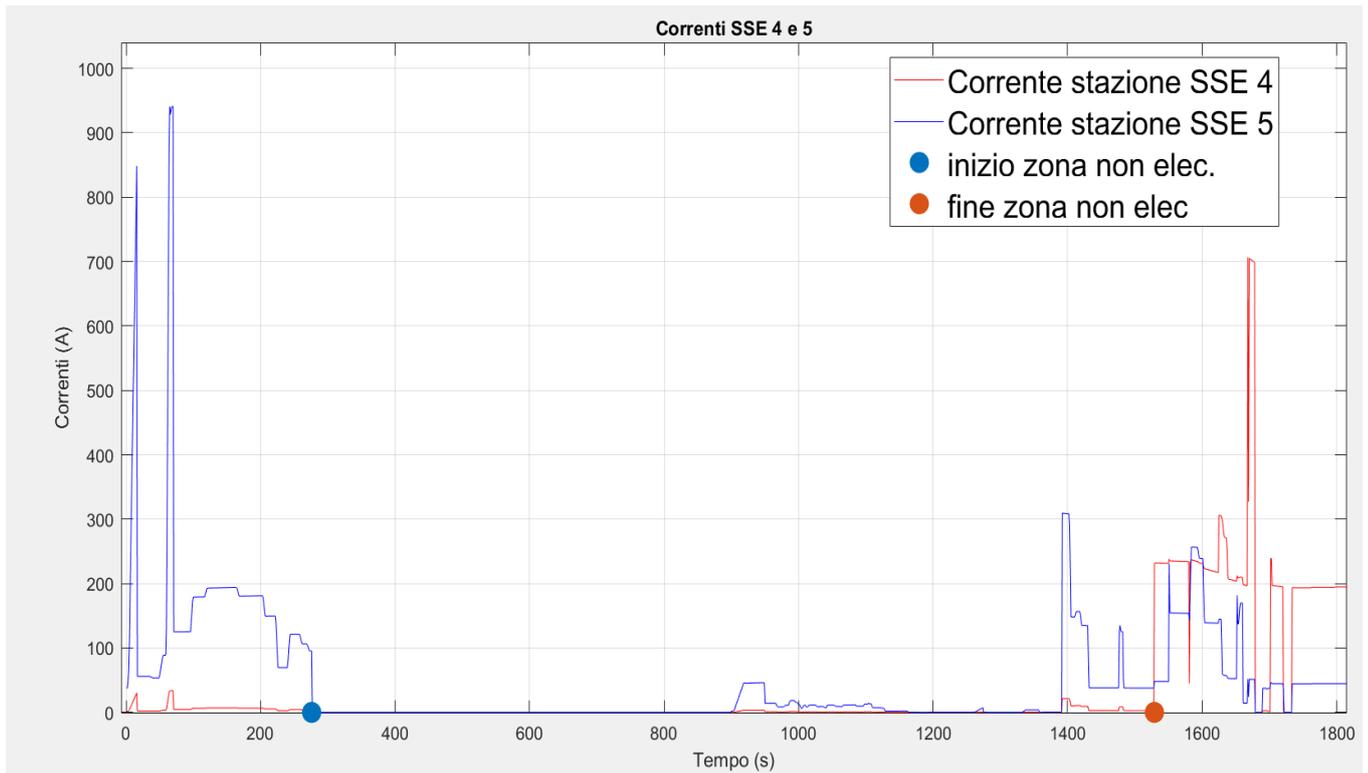


Figura 38: Correnti fornite dalle sottostazioni elettriche in funzione del tempo. In rosso la corrente relativa alla SSE 4 e in blu la corrente relativa alla SSE 5

Si considerino allora le correnti relative alla sottostazione numero 4 e alla sottostazione numero 5 nella figura 38, come nel paragrafo precedente. Nei primi istanti la corrente della sottostazione 4 (in blu) deve essere nulla, infatti l'unico treno circolante sulla linea si trova dall'altra parte della zona non elettrificata. Nel grafico in figura 38 si può notare che la corrente della SSE 4 (tratto rosso) è praticamente nulla e, dove non lo è, raggiunge un valore massimo del 3% rispetto alla corrente della SSE 5 (in blu). In base a questa analisi si può dire che il modello non sia perfetto (la corrente della SSE 4 non è esattamente uguale a zero), ma in campo di simulazione si possa ritenere sufficientemente accettabile.

Nella figura 34 è rappresentata la linea modellizzata e sono evidenziate le sottostazioni che contribuiscono, fornendo corrente (freccie blu), ad alimentare un treno collegato alla catenaria. Si supponga di avere un treno collegato al nodo 12, esso riceverà un contributo in corrente dalle sottostazioni adiacenti (SSE 3 e SSE 4). In questo caso specifico l'algoritmo di modifica della matrice delle ammettenze non viene utilizzato, l'algoritmo infatti deve intervenire solo nel momento in cui il nodo è compreso tra una sottostazione ed una zona non elettrificata. Se la matrice delle ammettenze non viene modificata non vi è alcuna ragione per cui anche le sottostazioni numero 5, 6 e 7 non possano contribuire. Il circuito equivalente non varia in alcun modo, non essendo stata modificata la matrice delle ammettenze. L'errore del modello sta nel fatto che alcune sottostazioni elettriche alimentino un treno nonostante siano separate da esso da una zona non elettrificata.

Nello svolgimento della tesi non è stato possibile correggere questo errore di modellizzazione, in quanto sarebbe stato necessario cambiare completamente il tipo di modellizzazione, il problema è tutt'ora aperto e potrà essere migliorato in futuro. Questo errore nel modello non provoca problemi rilevanti a livello di calcolo della tensione sulla linea, e non provoca squilibri nel sistema della gestione energetica. Un possibile errore si potrebbe riscontrare nel calcolo di quanta energia è fornita da ogni sottostazione elettrica, ma una verifica ha garantito che questo errore è trascurabile.

## 5.2 Modifica gestione energetica

Il lavoro successivo è stato un'analisi per verificare il buon funzionamento dell'algoritmo modificato. L'analisi delle correnti fornite dalle sottostazioni elettriche ha dimostrato un buon funzionamento dell'aggiunta di una grande resistenza elettrica nella matrice delle ammettenze.

Allo stesso tempo durante la simulazione si sono ancora riscontrati dei problemi di convergenza del metodo di Newton-Raphson in determinati passi di tempo della simulazione. In generale, quando si hanno dei problemi di convergenza, è utile identificare gli istanti di tempo interessati e studiare i vettori e le matrici degli input e degli output del programma per capire il problema. Il problema della matrice delle ammettenze è stato risolto visualizzando a schermo la matrice, per esempio.

In questo specifico caso si è notato che i problemi di risoluzione iniziano in corrispondenza dell'uscita dei treni da zone non elettrificate. Analizzando infatti i vettori interessati, all'uscita del treno dalla zona non elettrificata, i valori della potenza domandata alla catenaria subiscono una brusca variazione. I valori passano da essere nulli (zona non elettrificata) ad un valore di 2,3 MW, che domanda il treno alla linea elettrica. La potenza della catenaria domandata da ogni nodo è un vettore di entrate del sistema di equazioni che caratterizza la linea (capitolo 2). In modo intuitivo si può comprendere che, ad una potenza della catenaria nulla, corrisponderà una corrente della SSE adiacente quasi nulla, mentre per una grande potenza domandata si avrà una grande corrente fornita. La corrente delle sottostazioni elettriche è contenuta in un vettore di incognite. Nella risoluzione Newton Raphson, come già visto nel capitolo 2, il risultato dell'intervallo di tempo precedente è parte del calcolo; se il sistema deve trovare una soluzione in cui ci sia questo immenso cambiamento di ordine di grandezza, è possibile che fatichi ad arrivare ad una soluzione. Una possibile risoluzione al problema è quello di evitare questi sbalzi di potenza richiesta, nonostante questi possano essere fisicamente accettabili.

Analizzando il profilo di potenza della figura 39, si nota che nell'istante in cui il treno esce dalla zona non elettrificata (punto giallo in figura 39), la potenza domandata è di circa 250 kW (curva in blu). La gestione energetica (figura 28) stabilisce di fornire la potenza disponibile, non utilizzata dal treno, per caricare la batteria ( $p_{batt}=p_{cat}-P_{train}$ ). Si può infatti vedere che la batteria viene caricata con 1.3 MW (tratto verde in figura 39, per convenzione la potenza negativa implica una carica della

batteria) e quindi la catenaria passa da fornire 0 kW (zona non elettrificata) ad erogare circa 1.7 kW (curva rosa in figura 39) in tempo molto breve.

Di norma non è necessario caricare la batteria alla potenza massima disponibile della rete (potenza massima calcolata in modo tale da non avere una caduta di tensione, espressione 3.6), quindi questo problema può essere risolto modificando il codice della gestione energetica ed imponendo che le batterie siano caricate più gradualmente.

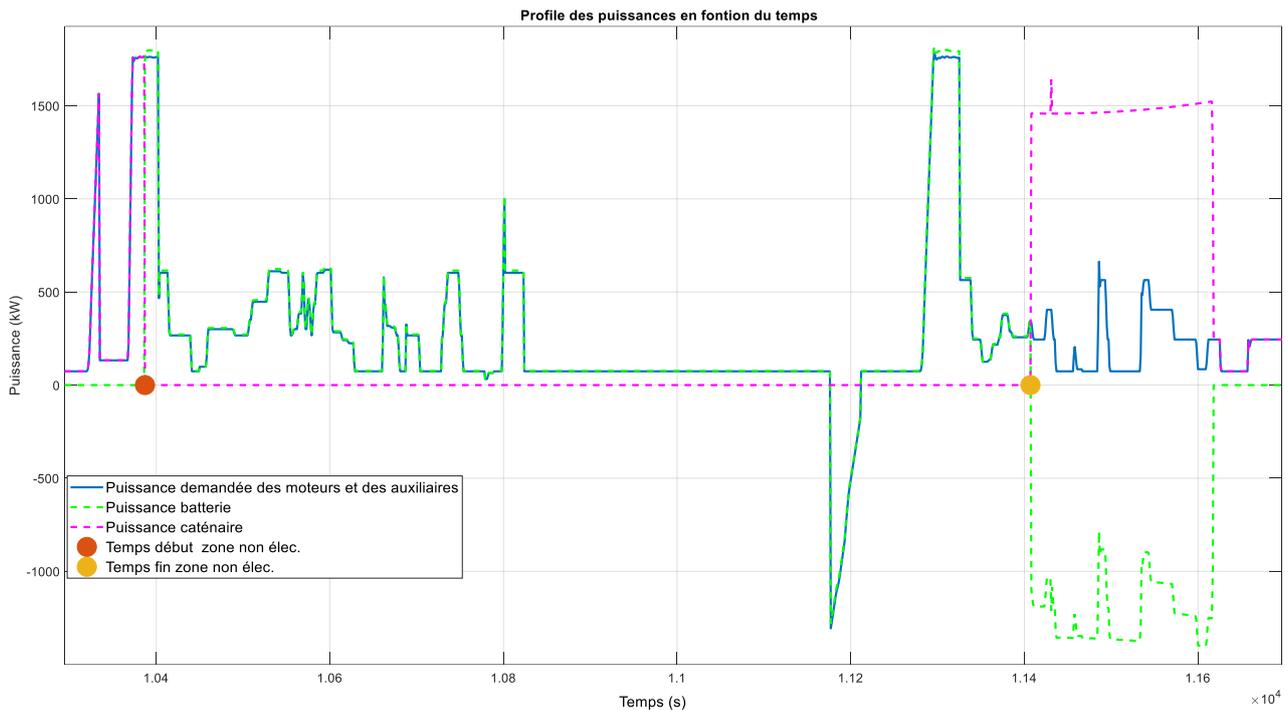


Figura 39 :Potenze caratteristiche della linea ferroviaria in funzione del tempo di simulazione. In blu la potenza domandata dal motore e dagli ausiliari, in verde la potenza fornita dalla batteria e in rosa la potenza fornita dalla catenaria. Il punto arancione e il punto giallo sono rispettivamente l'inizio e la fine della zona non elettrificata.

La brusca variazione di potenza sulla linea, nonostante sia ingente, è fattibile da un punto di vista fisico, se l'elettronica di potenza è dimensionata, ma risulta non gestibile a livello computazionale. Questa situazione rappresenta dunque un limite per il programma di simulazione, che deve modificare la gestione energetica per compensare un limite di calcolo.

### 5.3 Modellizzazione delle batterie

Lo studio delle batterie è stata una parte fondamentale di questo lavoro di tesi. In particolare, è stato necessario implementare un algoritmo che simulasse la presenza di batterie in modo più realistico.

Queste sono le modifiche che sono state eseguite al software preesistente:

- La batteria viene considerata come un sistema complesso, insieme di più moduli (composti da più celle in serie e in parallelo).
- Il numero totale di moduli a bordo deve essere multiplo di un numero prestabilito di moduli, chiamato rack ferroviario
- In questo nuovo modello la tensione della singola cella e la corrente erogabile vengono considerati come dipendenti dalla carica della batteria.

### 5.3.1 Presentazione modulo Toshiba

La parte più elementare di una batteria è la cella, che attraverso le sue caratteristiche elettrochimiche, garantisce una differenza di potenziale elettrico. Per il modello sono state considerate delle celle Toshiba già in uso presso SNCF. La tensione nominale di ogni singola cella è di 2.3 V e la corrente massima erogabile è di 20 A. La capacità di ogni cella è di 20 Ah e può essere ricaricata in diversi intervalli di tempo, dipendentemente dal regime di carica utilizzato. Il regime di ricarica a 20 A dura un'ora ed è denominato 1 C, quello a 40 A dura mezz'ora ed è chiamato 2C e di conseguenza gli altri regimi. Gli stessi regimi possono essere utilizzati per la fase di scarica della cella; una cella erogando 20 A si scaricherà totalmente in un'ora di utilizzo.

In particolare, Toshiba mette a disposizione di SNCF dei moduli del tipo 2P12S, composti dunque da due rami in parallelo composti dalla serie di 12 cellule. Le principali caratteristiche del modulo sono riportati nella tabella 1. In particolare, si può notare che questo tipo di modulo può effettuare un esercizio continuo per un regime di ricarica e scarica a 120 A (3C); in realtà i sistemi di raffreddamento a disposizione di SNCF permettono un utilizzo in regime continuo di 5C (200 A) senza particolari problemi termici. Eccezionalmente la batteria può essere anche usata ad un regime di 300 A, ma per una durata massima di 10 secondi, per evitare un surriscaldamento successivo.

Modello	AM01202CCA05A (2P12S)
Configurazione modulo	2 rami in parallelo x 12 celle in serie (24 celle x 20 Ah)
Capacità nominale	40 Ah
Tensione nominale singola cella	2.3 V
Tensione nominale modulo	27.6 V
Intervallo di lavoro della tensione	18.0 V-32.4 V
Corrente massima di carica/scarica	120 A (3C), 300 A (max per 10 s) (Temperatura < 50°C, circa 25 °C)

Tabella 2 : Specifiche tecniche modulo Toshiba 2P12S

### 5.3.2 Test di carica e scarica di una singola cella

La tensione della cella dipende fortemente dallo stato di carica. Il costruttore fornisce dei grafici che rappresentano il valore di tensione del modulo in funzione della percentuale di carica, misure che spesso sono qualitative e non donano valori troppo affidabili in ambito di simulazione. Per la modellizzazione della batteria abbiamo quindi utilizzato dei dati raccolti in uno studio per SNCF. I dati considerati sono raccolti considerando la tensione della singola cella e sono analizzati direttamente dal programma. Nella figura 40 sono raffigurate la tensione e la corrente di una cella in funzione dello stato di carica durante la ricarica della batteria.

Sul secondo grafico si può notare che il regime di funzionamento 5C può limitare il processo di carica: la batteria può essere ricaricata con questa corrente solo fino al 75 %, da questo valore è necessario utilizzare una corrente gradualmente decrescente. Un accorgimento che può essere tenuto nell'algoritmo di gestione della batteria è la possibilità di switch da un regime di corrente all'altro secondo la convenienza a livello di prestazioni. Nel caso di questa cella, guardando il secondo grafico in figura 34, potrebbe essere conveniente utilizzare la batteria ad un regime 5C fino a 88% di stato di carica, per poi passare ad il regime 1C, ottenendo maggiori prestazioni. Il programma è stato ottimizzato perché la batteria utilizzi comodamente i 5 regimi, a seconda delle prestazioni richieste.

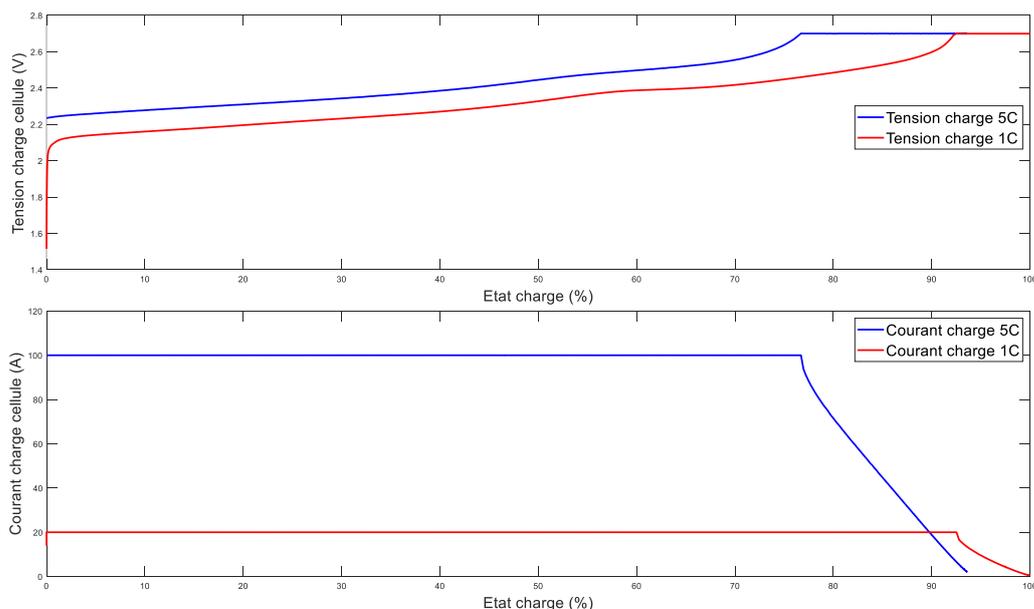


Figura 40 : Tensione (primo grafico) e corrente (secondo grafico) di una cella in funzione dello stato di carica durante una prova di carica

### 5.3.3 RACK ferroviario

In genere le batterie utilizzate per la trazione ferroviaria operano ad una tensione compresa tra 750 e 900 V; è necessario dunque scegliere un numero di moduli da disporre in serie per raggiungere una tensione ammissibile. In fase di progetto è stato scelto di posizionare 30 moduli in serie, raggiungendo così una tensione nominale di 824 V. La serie di questi moduli in ambito ferroviario viene chiamato RACK. La tensione del RACK dipende dallo stato di carica della batteria, quindi nella realtà la tensione operativa oscilla in un intervallo di valori in un intorno della tensione nominale.

I moduli dello stesso RACK sono in serie e dunque condividono la stessa corrente. Per aumentare la corrente e dunque la potenza erogabile è necessario aggiungere dei RACK in parallelo, mantenendo la stessa tensione nominale. La capacità totale del pacco batteria può essere calcolata come:

$$C_{tot} = C_{modulo} \cdot N_{modulo} \quad [Ah] \quad (5.2)$$

$$E_{batteria} = C_{tot} \cdot V_{nominale} \quad [J] \quad (5.3)$$

Dove

$C_{modulo}$ : capacità del singolo modulo in Ah

$N_{modulo}$ : numero di moduli in serie o in parallelo

$V_{nominale}$ : tensione nominale del RACK

Nella figura 41 è illustrata la struttura del sistema di accumulo a cui si riferisce in questo lavoro di tesi, in particolare si evidenziano la composizione interna e le differenze tra collegamenti in parallelo ed in serie, fondamentali per determinare le prestazioni della batteria. In sede di dimensionamento del sistema di accumulo sarà necessario calcolare il numero di RACK in parallelo perché sia possibile fornire sufficiente energia e potenza. Nel modello di batteria della tesi di dottorato [4] la batteria è rappresentata come semplice insieme di più celle.

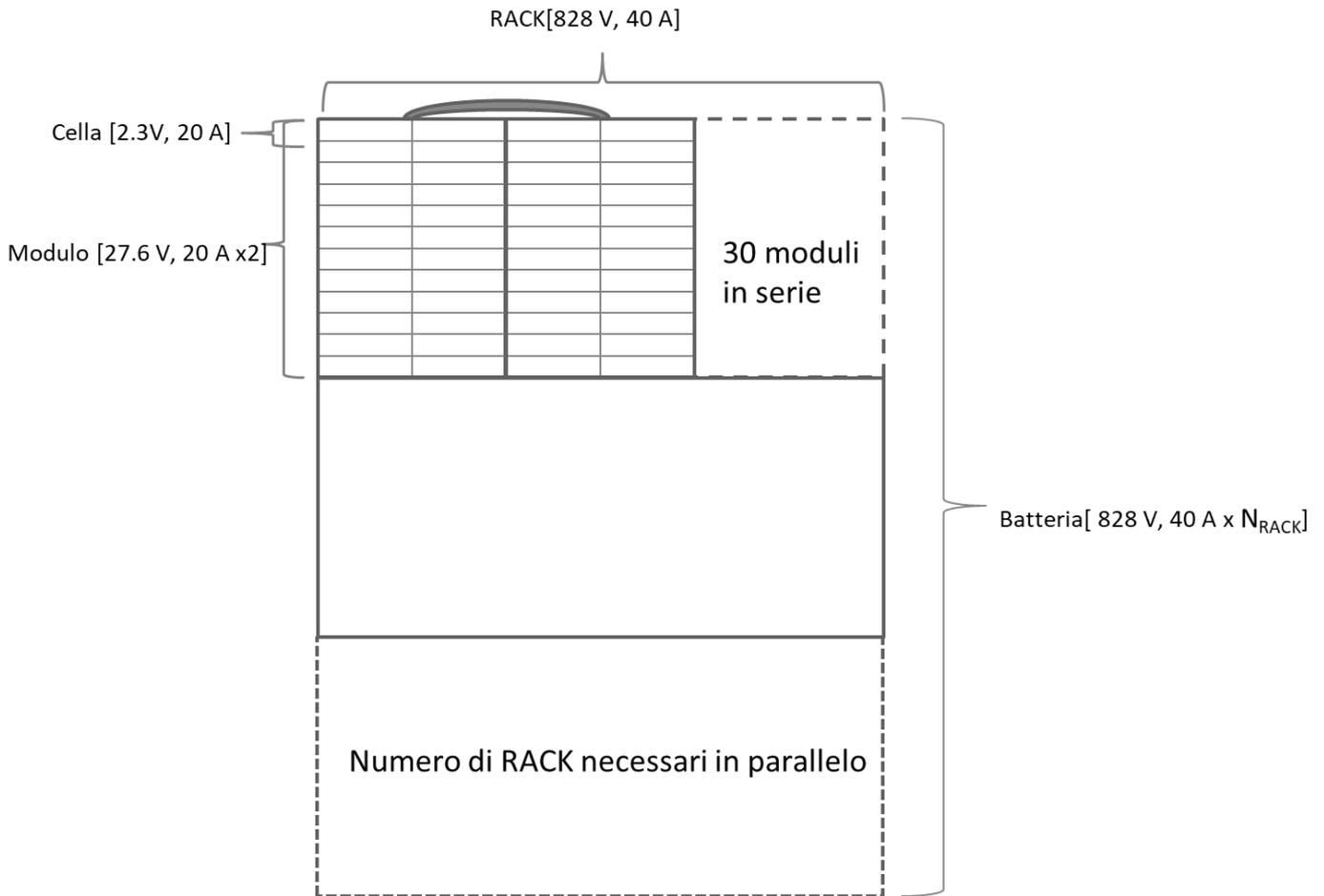


Figura 41 : Struttura pacco batterie ferroviario, sono evidenziati i RACK, i moduli e le singole celle.  $N_{RACK}$  è il numero di RACK in parallelo

### 5.3.4 Algoritmo di gestione energetica della batteria

Il programma deve controllare, ad ogni passo di calcolo, che la batteria scelta per la tratta sia sufficiente per soddisfare la domanda di potenza del motore e degli ausiliari del treno. Una delle modifiche apportate in questa tesi è stata quella di aggiungere, all'interno del codice, la possibilità di scegliere tra tre regimi di carica/scarica della batteria: 1C, 5C e 300 A (max 10s). L'obiettivo dell'algoritmo è di verificare che la batteria sia sufficiente per il caso studio e di indicare a quale regime deve operare per soddisfare la domanda di potenza. Il funzionamento dell'algoritmo è riportato in figura 42. La gestione energetica stabilisce quanta energia debba essere fornita dalla batteria, in base alla percentuale di carica l'algoritmo stabilisce se sia possibile sostenere la potenza domandata (in base ai dati riportati in figura 42) e a quale regime di carica/scarica. Nell'algoritmo è stato inoltre aggiunta la possibilità di visualizzare a schermo il tempo dell'utilizzo del regime a 300 A. Teoricamente le specifiche fornite da Toshiba indicano un tempo massimo di utilizzo di 10 secondi, ma l'utilizzo di moderni impianti di refrigerazione può anche la possibilità di usarlo più a lungo. I punti in cui la batteria deve essere usata a lungo con regime 300 A sono considerati singolarmente e si può valutare una soluzione per il caso specifico.

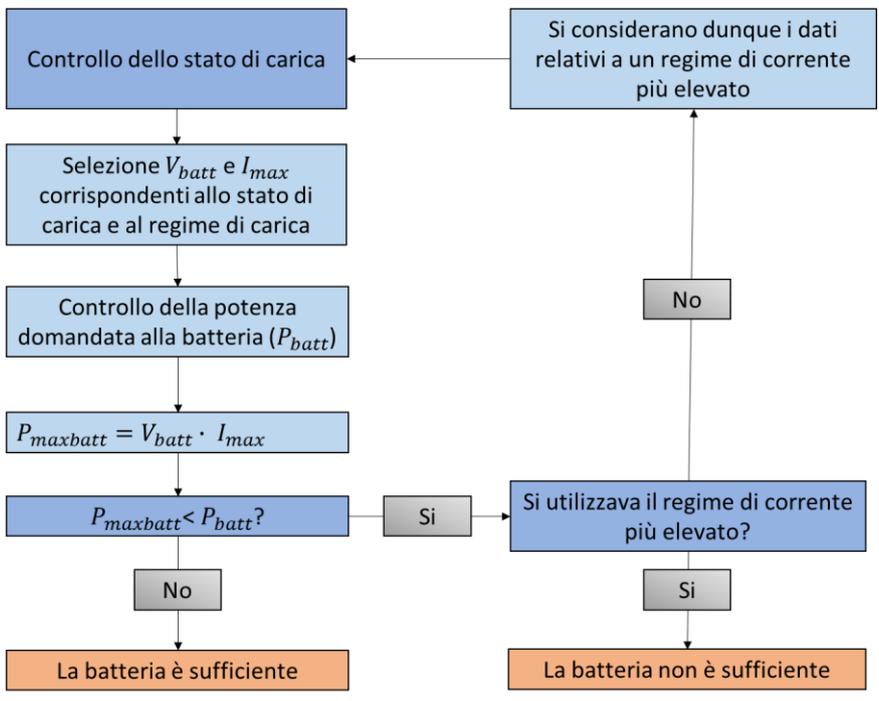


Figura 42: Schema dell’algoritmo di regolazione della batteria. In base alla potenza domandata l’algoritmo verifica che la batteria sia sufficiente per soddisfare la domanda.

## 6 Studio impatto ibridazione su una linea urbana di Parigi

In particolare, il primo studio è stato fatto su una linea urbana e suburbana di Parigi, la cui flotta è composta da 69 treni, attualmente alimentati da una linea in corrente continua e da un motore diesel. I dati raccolti comprendono il transito dei 69 treni durante un arco temporale di 90 minuti. L'obiettivo di questa prima simulazione è stato di valutare l'impatto della percentuale di treni ibridi (intesa come il rapporto tra il numero totale di treni e il numero di treni) sulle seguenti grandezze:

- l'energia consumata a livello delle sottostazioni elettriche per la durata totale della missione
- la tensione della linea elettrica, a livello di catenaria
- l'energia dissipata dal freno meccanico (energia non recuperabile dal sistema di accumulo)

Per questo primo studio, utile anche per capire in che modo la presenza di batterie possa influenzare il rendimento energetico dell'intera linea ferroviaria, si è deciso di simulare la situazione sulla linea considerando diverse percentuali di treni ibridi.

Come criterio per scegliere quali treni rendere ibridi si è deciso di dare la precedenza nello studio ai treni che più gioverebbero della presenza di una batteria, quindi i treni con energia dissipata dai freni maggiore, dove quindi la batteria sarebbe ricaricata più spesso. Questa strategia è stata seguita per percentuali di treni ibridi compresi tra 0% a 50 %, successivamente è stato seguito un ordine casuale, lasciando ibridi i treni che lo erano già.

### 6.1 Variazione del consumo di energia delle SSE

Il consumo energetico viene calcolato come la somma dell'energia fornita da ogni sottostazione durante la fascia oraria considerata. La tabella 3 mostra l'energia totale consumata per ogni tasso di ibridazione. Il grafico riportato in figura 43 riporta una curva creata con i dieci punti ibridazione-energia raccolti durante la simulazione.

Percentuale di treni ibridi	0%	10%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%
Energia [MWh]	7.4	7.1	6.7	6.6	6.4	6.2	6.1	6.1	6	5.9	5.9	5.9	5.8

Tabella 3 : Tasso di treni ibridati e energia fornita dalle sottostazioni

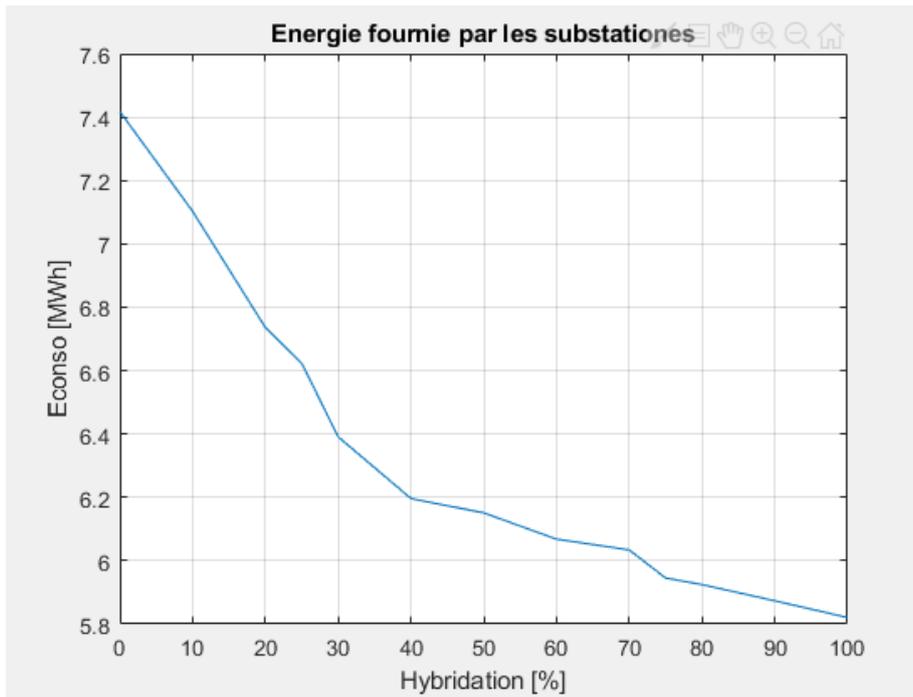


Figura 43 : Energia fornita dalle sottostazioni elettriche in funzione della percentuale di treni ibridati

Generalmente l'energia fornita dalle sottostazioni diminuisce sensibilmente con l'aumentare del numero di treni ibridi, l'effetto è più rilevante per basse percentuali di ibridazione (0-40%). Se il 40% della flotta fosse composta da treni ibridi la linea risparmierebbe 1,2 MWh ogni ora e mezza di servizio.

## 6.2 Variazione della tensione della linea di contatto

La norma ferroviaria francese impone 3 criteri sulla tensione della linea di contatto: tensione minima, tensione massima e tensione media. Le tabelle sottostanti ci forniscono come questi valori sono influenzati da una maggiore ibridazione della linea.

Percentuale di treni ibridi	0%	10%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%	Criterio
Tensione minima [V]	909	909	1111	1210	1211	1263	1263	1263	1263	1284	1284	1398	1608	> 1000
Tensione massima [V]	1950	1950	1926	1926	1926	1926	1926	1911	1911	1871	1871	1869	1770	< 1950
Tensione media [V]	1653	1654	1655	1655	1654	1654	1654	1655	1654	1654	1654	1654	1681	> 1350

Tabella 4 : Valori della tensione massima, minima e media al variare della percentuale dei treni ibridati

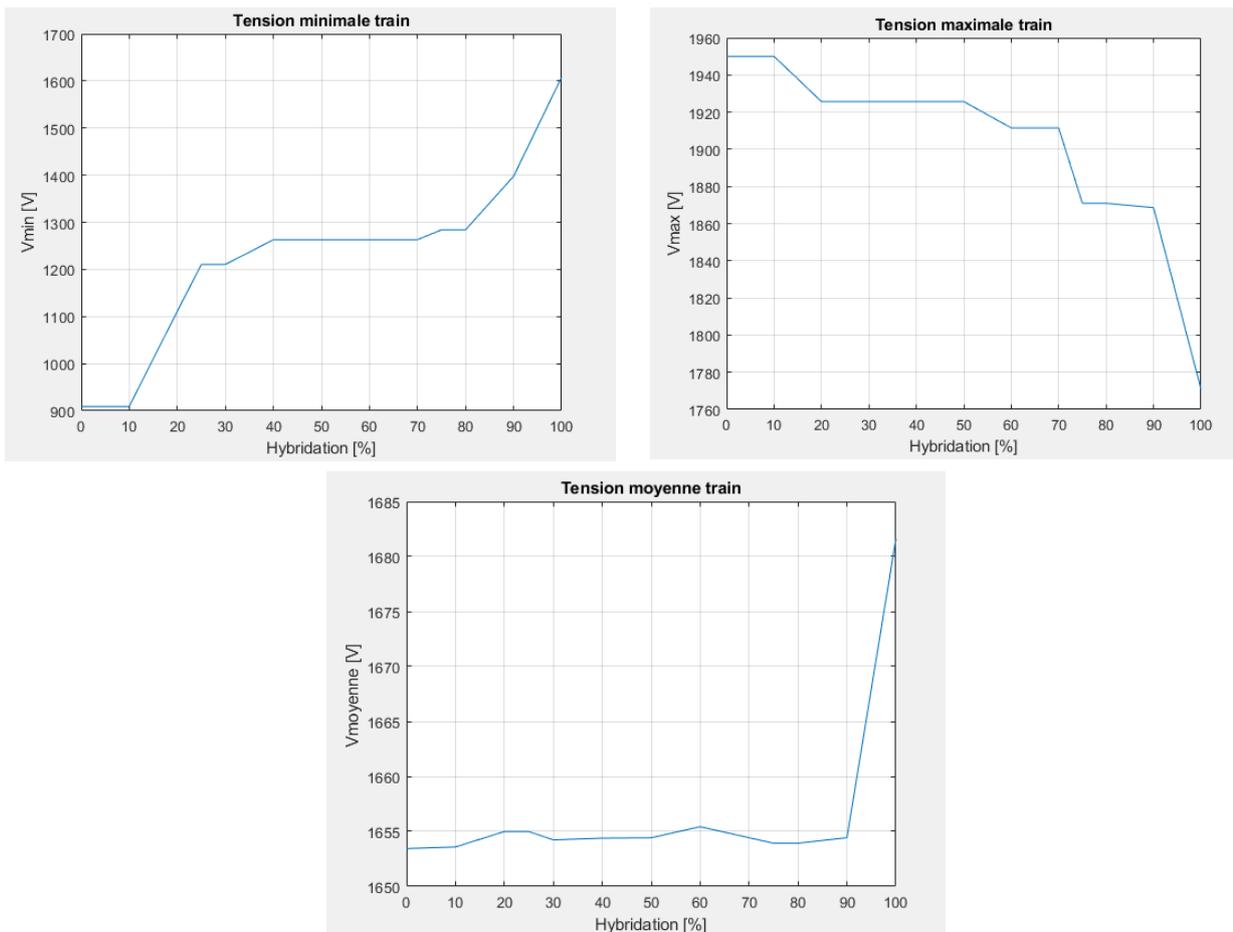


Figura 44 : In alto a sinistra la tensione minima, in alto a destra la tensione massima e in basso la tensione media, il tutto in funzione della percentuale di treni ibridati.

I grafici riportati nella figura 44 mostrano che l'implementazione di un sistema di batterie abbinato alla gestione energetica per soglia portano ad un notevole miglioramento del controllo della tensione della catenaria, la tensione massima diminuisce, quella minima aumenta, quindi il range di oscillazione della tensione si riduce.

### 6.3 Variazione della potenza dissipata dal freno meccanico

In questo caso studio i treni non ibridi possono rinviare alla catenaria la potenza recuperata durante la frenata, a condizione che la tensione di linea non superi 1950 V. I treni ibridi non possono rinviare energia alla catenaria ma hanno la possibilità di immagazzinare quest'energia nel sistema di accumulo. L'energia che la batteria non può ricevere, per motivi legati alla corrente massima di carica, deve essere dissipata dal freno meccanico. Lo studio della percentuale di energia dissipata dal freno meccanico è fondamentale sia per definire l'usura del sistema frenante, sia per conoscere la percentuale di energia del sistema che viene "sprecata". La tabella 5 mostra l'influenza del numero di treni ibridi sull'utilizzo del freno meccanico.

Percentuale di treni ibridi	0%	10%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%
Potenza freno meccanico (%)	4.6	3.8	2.8	2.5	2.2	2	1.8	1.4	1.3	1	1	0.7	0.1

Tabella 5 : Percentuale di potenza dissipata dal freno meccanico

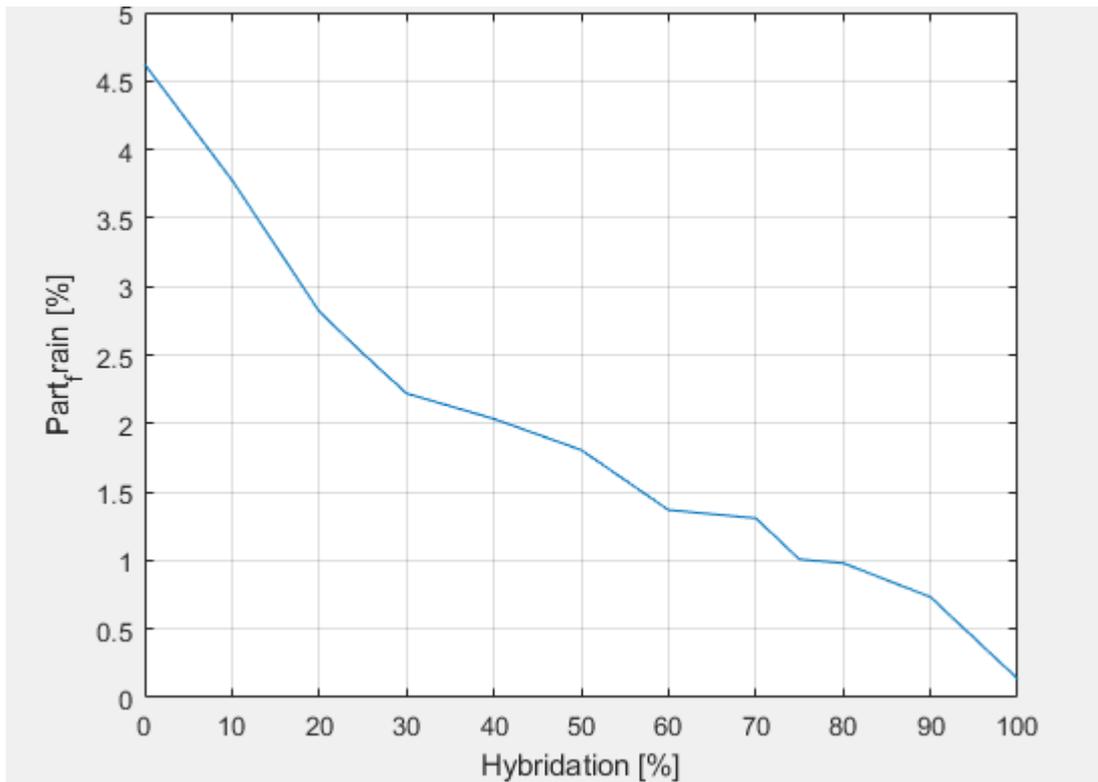


Figura 45 : Percentuale di potenza dissipata dal freno meccanico in funzione della percentuale di treni ibridi.

La tendenza è, come illustrato nella figura 45, una diminuzione dell'uso del freno meccanico aumentando il numero di treni ibridi. Questo avviene principalmente perché, per i treni non ibridi, durante la frenata solo parte dell'energia è rinviata in rete. Infatti durante la frenata si possono creare molto facilmente sovratensioni sulla linea, dunque la restante parte di energia deve obbligatoriamente essere dissipata dal freno meccanico.

Le simulazioni eseguite hanno portato a risultati attesi e a curve quasi sempre coerenti. I punti che, in alcuni grafici, si trovano al di fuori della tendenza della curva possono essere spiegati con il differente apporto energetico che ogni treno (caratterizzato dal proprio specifico tragitto e dalla propria domanda di potenza), aggiunto alla lista dei treni ibridi, porta alla somma dell'energia consumata.

## 7 Primi risultati di simulazione per la linea Bordeaux-Verdon

Come detto nella parte introduttiva dei casi studio (capitolo 4), la seconda parte di simulazione del lavoro di tesi ha avuto come scopo quello di istituire un protocollo di verifica del caso studio e determinare la dimensione della batteria per ogni scenario di non elettrificazione.

In primo luogo è stato preso in considerazione lo scenario di non elettrificazione più ristretto: non elettrificazione tra le sottostazioni elettriche di Pauillac e Lesparre (vedi figura 46). In questo caso non si rivela necessaria la soppressione di una sottostazione elettrica.

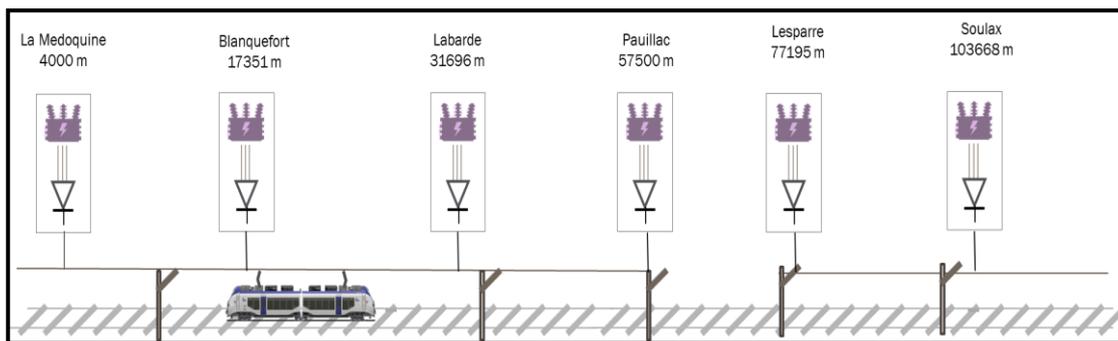


Figura 46 : Primo scenario di non elettrificazione sulla linea Bordeaux- Le Verdon sur mer

Per determinare la batteria necessaria per una determinata tratta senza catenaria, è sufficiente valutare i risultati ottenuti dalla simulazione: l'algoritmo di controllo creato nel corso di questa tesi indica se la batteria inizialmente sia adatta per il caso studio. Allo stesso modo è importante, per comprendere pienamente il processo, analizzare il profilo di potenza domandato dal treno e dagli ausiliari (in blu nella figura 46).

Il software di simulazione dà la possibilità di controllare che la potenza massima erogabile dalla batteria (in funzione del suo stato di carica) sia sufficiente per soddisfare la domanda di potenza del treno. Un secondo controllo è effettuato per verificare che la capacità della batteria sia abbastanza grande per permettere al treno di percorrere la zona non elettrificata. La variabile che bisogna dimensionare è il numero di RACK in parallelo, per raggiungere una corrente sufficiente, e dunque una potenza sufficiente.

Nella figura 47 è presentato un dettaglio del profilo di potenza riguardante la zona non elettrificata in analisi. Occorre precisare che il profilo varia se si considera un treno percorrente la tratta Bordeaux-Le Verdon sur mer oppure un treno transitante in direzione opposta. Nel seguito si riportano i risultati del caso della direzione Bordeaux-Le Verdon sur mer.

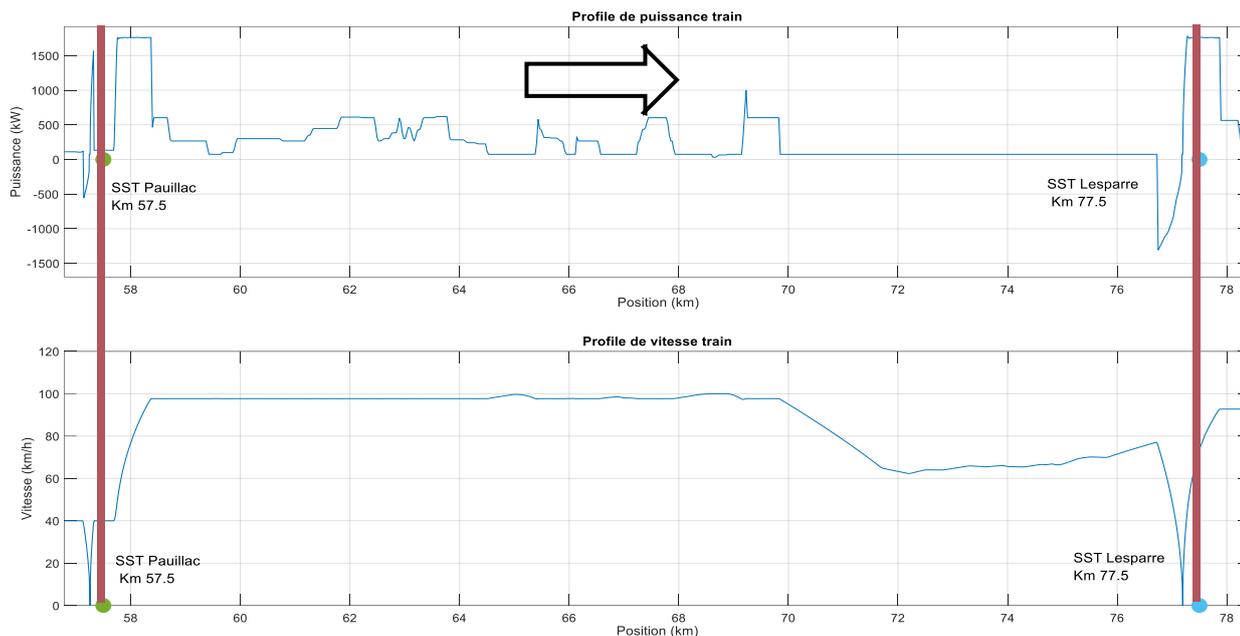


Figura 47 : In alto il profilo di potenza domandata dal treno. In basso la velocità del treno, entrambi in funzione della posizione chilometrica. La linea rossa a sinistra è l’inizio della zona non elettrificata, la linea a destra la fine

Il picco di potenza più alto è posizionato dopo la sottostazione di Pauillac, in corrispondenza dell’avvio del treno, con un valore di 1760 kW. Sul grafico della potenza in funzione del tempo si può vedere che questa potenza è richiesta per più di 10 s, quindi il massimo regime di scarica utilizzabile è di 5C. Il pacco batteria che soddisfa questa richieste di potenza è composto da 11 RACK ferroviari in parallelo (le caratteristiche sono riportate in tabella 5).

Max ch/dch	I [A]	P [MW]	E [kWh]
1C	440	0,24:0,43 (0.36)	364
4C	1760	0,95:1,71 (1.46)	
5C	2200	1,18:2,14 (1.82)	
300A10s	3300	1,78:3,2 (2,7)	

Tabella 6 : Specifiche tecniche della batteria composta da 11 RACK in parallelo. Per la potenza sono indicati gli intervalli di valori, variabili con l’SoC, tra parentesi la potenza nominale.

Scegliendo una batteria che soddisfi questa potenza, l’output del programma rivela che la batteria è notevolmente sovradimensionata a livello energetico. La ragione principale sono le rampe di velocità che la batteria deve sostenere nei pressi delle due sottostazioni (la batteria è di dimensioni elevate per l’ingente potenza istantanea che deve sostenere). Un’idea interessante è quella di

elettrificare qualche chilometro in più (come mostrato in figura 48), in modo tale da evitare le rampe di velocità (la potenza di 1,7 MW sarebbe così fornita dalla catenaria), risparmiando sul costo della batteria (utilizzando più risorse per l'elettrificazione). Nelle figure 47 e nella tabella 7 è riportato l'impatto di questa scelta sulla dimensione della batteria.

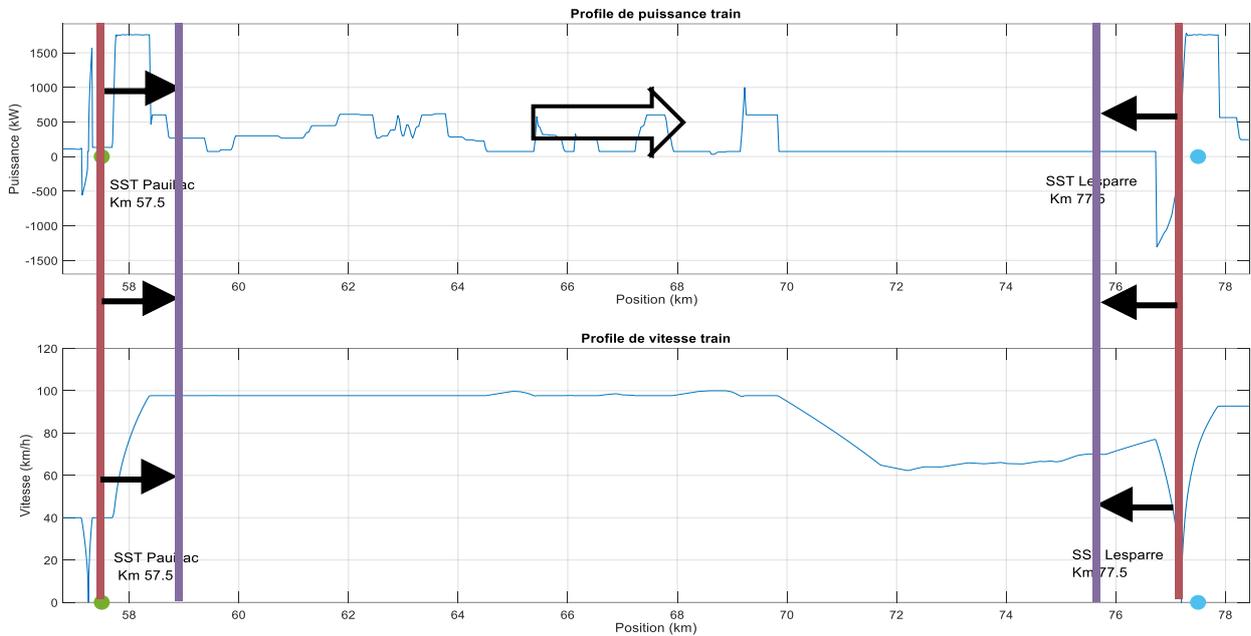


Figura 48 : In alto il profilo di potenza domandata dal treno. In basso la velocità del treno, entrambi in funzione della posizione chilometrica. Le due linee viola rappresentano i limiti della nuova zona non elettrificata

Seguendo la seconda opzione (figura 48), il picco di potenza massima è minore, è dunque necessario utilizzare solamente 5 RACK, un notevole risparmio dal punto di vista economico. Le considerazioni fatte non possono essere realizzate automaticamente dal software di simulazione, in quanto nel programma studiato la lunghezza e la posizione delle sottostazioni elettriche sono delle entrate ed in quanto tali fisse. L'utilizzo di un software di ottimizzazione potrebbe invece portare alla possibilità di risolvere questi scenari in modo automatico. La tabella 7 riporta le specifiche tecniche di un pacco batterie composto da 5 RACK in parallelo.

Max ch/dch	I [A]	P [MW]	E [kWh]
1C	200	0,11:0,19 (0,17)	165
4C	800	0,43:0,78 (0,66)	
5C	1000	0,54:0,97 (0,83)	
300A10s	1500	0,81:1,46 (1,24)	

Tabella 7 : Specifiche tecniche della batteria composta da 5 RACK in parallelo. Per la potenza sono indicati gli intervalli di valori, variabili con l'SoC, tra parentesi la potenza nominale.

## 7.1 Convalida modello

Una volta selezionata la batteria sufficiente per una determinata zona non elettrificata, è possibile avviare l'intera simulazione per tutti e 14 i treni (flotta del caso studio BX-VSM) per verificare le tensioni sulla linea, il consumo energetico totale delle sottostazioni e l'energia delle batterie in funzione del tempo di simulazione.

Nella figura 49 è rappresentato un grafico in cui viene mostrato l'andamento di tutte le potenze coinvolte nella gestione energetica (per un singolo treno), nell'area prossima alla zona non elettrificata. Nella parte inferiore è anche illustrato l'andamento dello stato di carica del sistema di accumulo. Si può notare che la batteria utilizza solamente il 25 % della sua capacità totale.

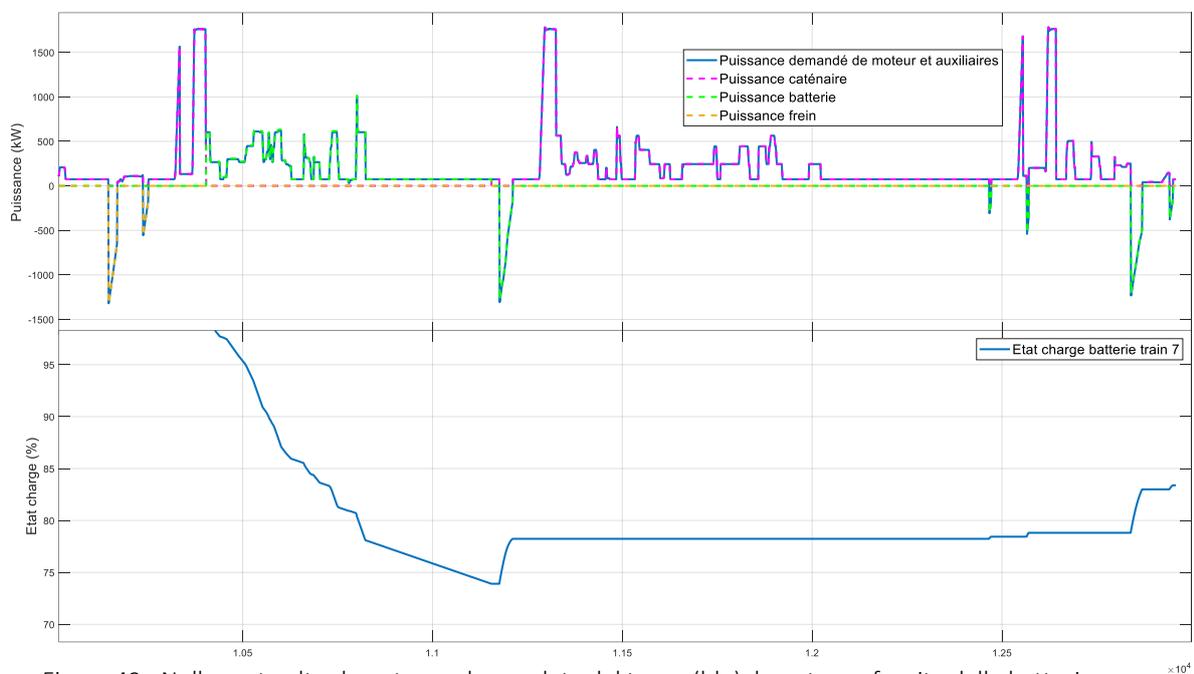
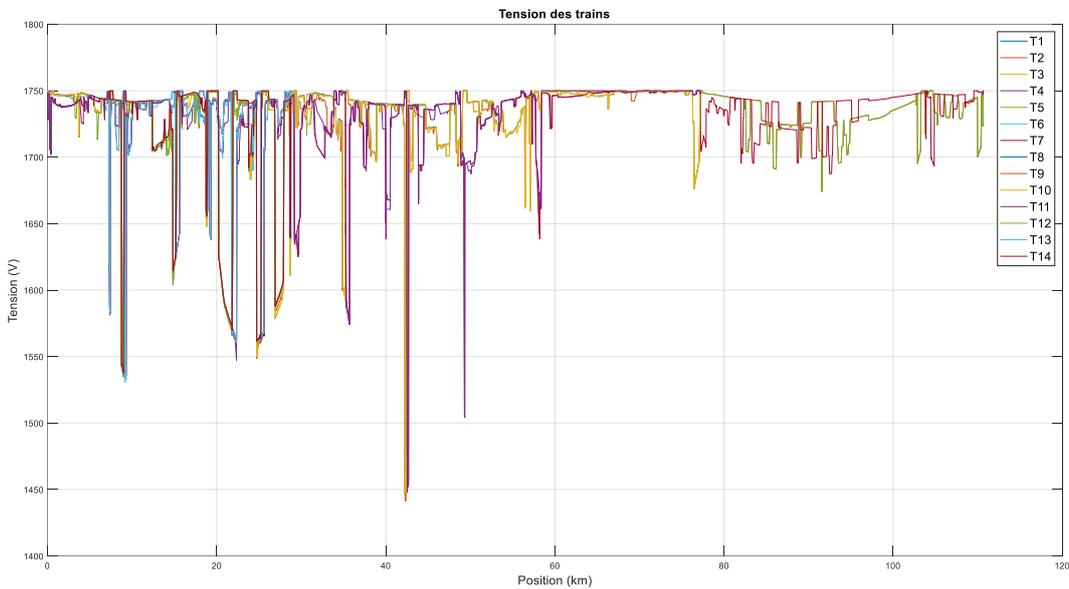


Figura 49 : Nella parte alta la potenza domandata dal treno (blu), la potenza fornita dalla batteria (verde), la potenza della catenaria (rosa) e la potenza dissipata dai freni (giallo). In basso l'SoC della batteria. Il tutto in funzione del tempo di simulazione.

Il grafico (figura 49) mostra che la potenza della catenaria (in rosa) si annulla in corrispondenza della zona non elettrificata e viene sostituita dalla potenza della batteria (in verde). Inoltre, si può notare che, quando il treno frena (potenza negativa) la potenza viene assorbita dalla batteria che si ricarica.

Si consideri ora una simulazione in cui sono presenti tutti i 14 treni. Normalmente, una gestione energetica basata sul controllo della tensione (come la gestione energetica di soglia, capitolo 3) è efficace, ma in questo caso non è necessaria (bassa densità di traffico sulla linea) e rischia di fuorviare da una migliore ottimizzazione energetica. Nel grafico sottostante si può infatti vedere che la bassa densità di traffico permette di avere cadute di tensione accettabili, nonostante la grande

distanza tra le sottostazioni elettriche. In figura 50 sono riportate le tensioni della catenaria, relative ai 14 treni del caso studio, in funzione della posizione chilometrica. La tensione più bassa del grafico (figura 50) è 1450 V, quindi con questa gestione energetica non vi sono problemi di rispetto della norma ferroviaria.



La verifica relativa allo stato di carica delle batterie viene eseguita anche per il caso studio relativo ai 14 treni e, come è visibile nel grafico in figura 51, tutti i pacchi batterie utilizzano circa il 25% della carica disponibile. Il problema di sovradimensionamento della batteria sussiste per tutti i treni; questo è il motivo per cui spesso le batterie vengono utilizzate in sincronia con dei supercondensatori, che a parità di peso possono fornire più potenza (vedi il piano di Ragone, figura 8).

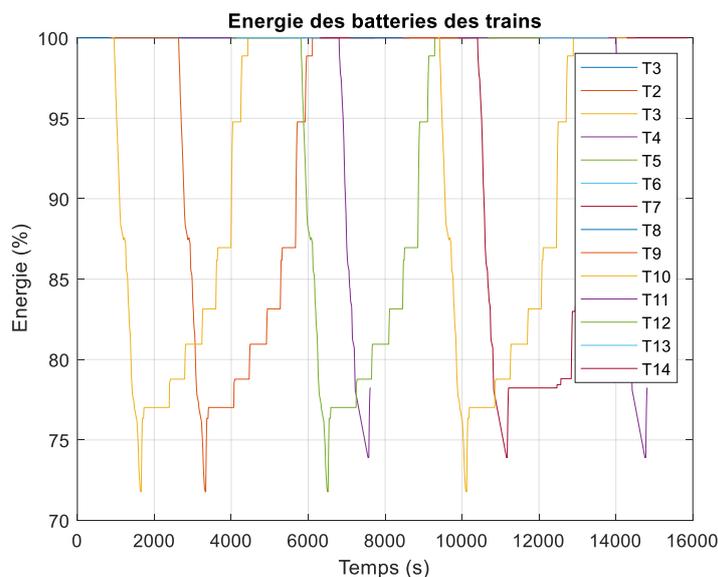


Figura 51: SoC del pacco batteria di ogni treno in funzione del tempo di simulazione

## 7.2 Modifica della gestione energetica e verifica SoC nello scenario più sfavorevole

Gli studi sull'elettrificazione parziale non sono così avanzati o diffusi nel mondo, si tratta infatti di una sperimentazione all'avanguardia e di una sfida tecnica complessa sia lato linea ferroviaria sia lato sistemi di accumulo. In generale si concorda sul fatto che la lunghezza di una zona non elettrificata, su una linea ferroviaria, non possa superare la lunghezza di 50 km.

Il dato di 50 km è un parametro limite comunque non realizzabile, sia per ragioni di sicurezza sia per le regole di ridondanza che vengono applicate all'alimentazione di una linea ferroviaria. In generale si deve garantire che, anche in caso di default di una sottostazione elettrica, il servizio possa essere fornito su tutta la linea senza causare cadute di tensione fuori dalla norma. Nel caso dell'elettrificazione parziale si deve garantire che, in caso di guasto di una sottostazione elettrica, il treno abbia comunque la possibilità di concludere la sua tratta, senza doversi fermare sulla via per esaurimento carica delle batterie.

Lo studio di una tratta (considerando andata e ritorno) di un treno su una linea in cui è presente una zona non elettrificata di 50 km, permette di garantire un funzionamento al limite del sistema di accumulo scelto e della gestione energetica utilizzata. Durante lo studio del limite delle prestazioni della batteria si è riscontrata la necessità di imporre che la batteria lavorasse in un intervallo di valori di carica salubri, anche in condizioni limite di non elettrificazione. In generale si è verificato che la percentuale di vita di una batteria si allunghi notevolmente se questa lavora in un intervallo di valori compreso tra il 20 % e l'80 %.

Per mantenere la carica della batteria in questo intervallo è stato necessario modificare, a livello software la gestione energetica. Come primo passo si è imposto il valore 80 % come iniziale SoC. Successivamente si è modificata la gestione energetica in modo tale da imporre al treno l'utilizzo della batteria in zona non elettrificata, se superato il dell'80 % del SoC. Allo stesso modo è stato inserito un controllo per verificare che la percentuale di carica della batteria non scendesse mai al di sotto del 20 %.

Nei due grafici in figura 52 e figura 53 sono riportati i dati raccolti simulando questa situazione di elettrificazione parziale con il sistema di accumulo selezionato in precedenza (150 moduli Toshiba 2p12s) e la nuova gestione energetica. Nella figura 52 si può notare che ogni volta che la batteria supera l'80% di SoC la gestione energetica impone che la batteria fornisca potenza fino ad una carica inferiore all'80% (picchi blu visibili nella figura 52 al centro).

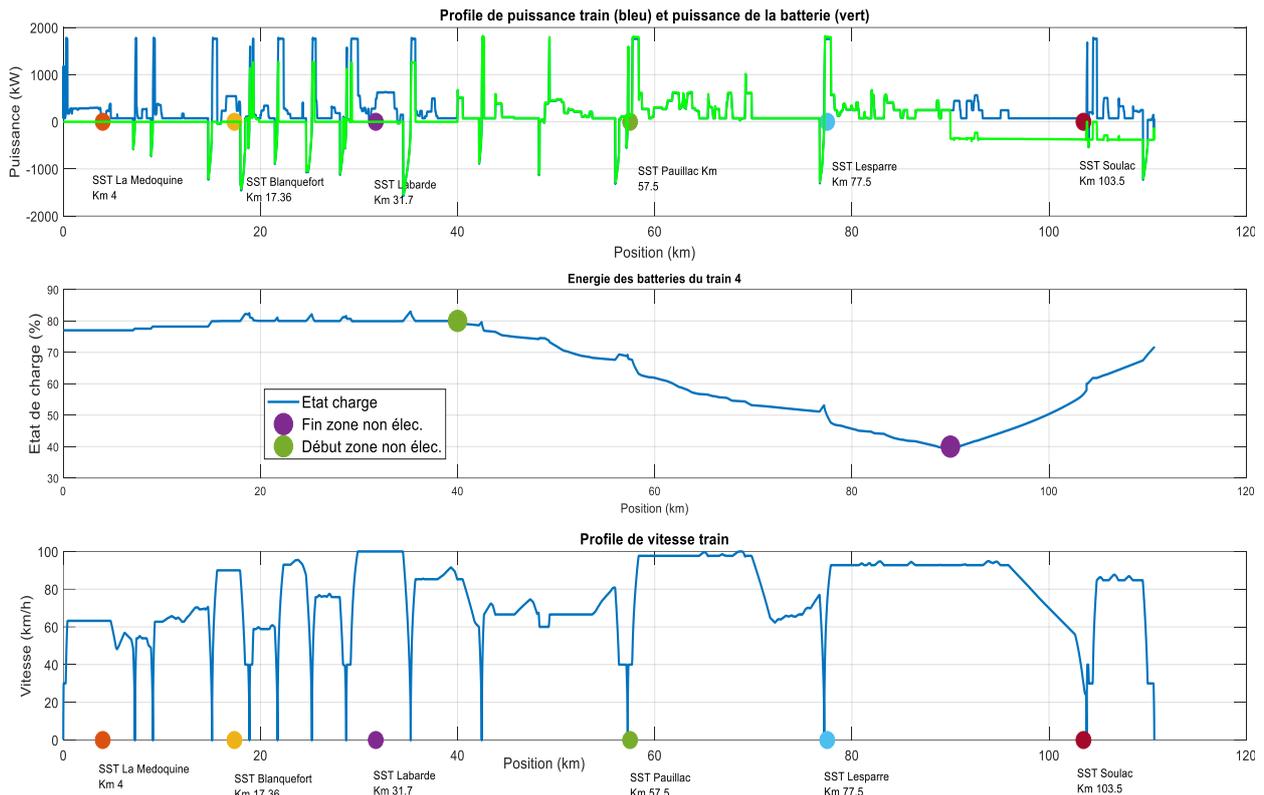


Figura 52 : In alto il profilo di potenza domandato (in blu) e la potenza fornita dalla batteria (in verde), in centro l'SoC della batteria e in basso il profilo di velocità del treno, il tutto in funzione della posizione chilometrica. Il punto verde indica l'inizio della zona non elettrificata, il punto viola la fine. Tragitto di andata.

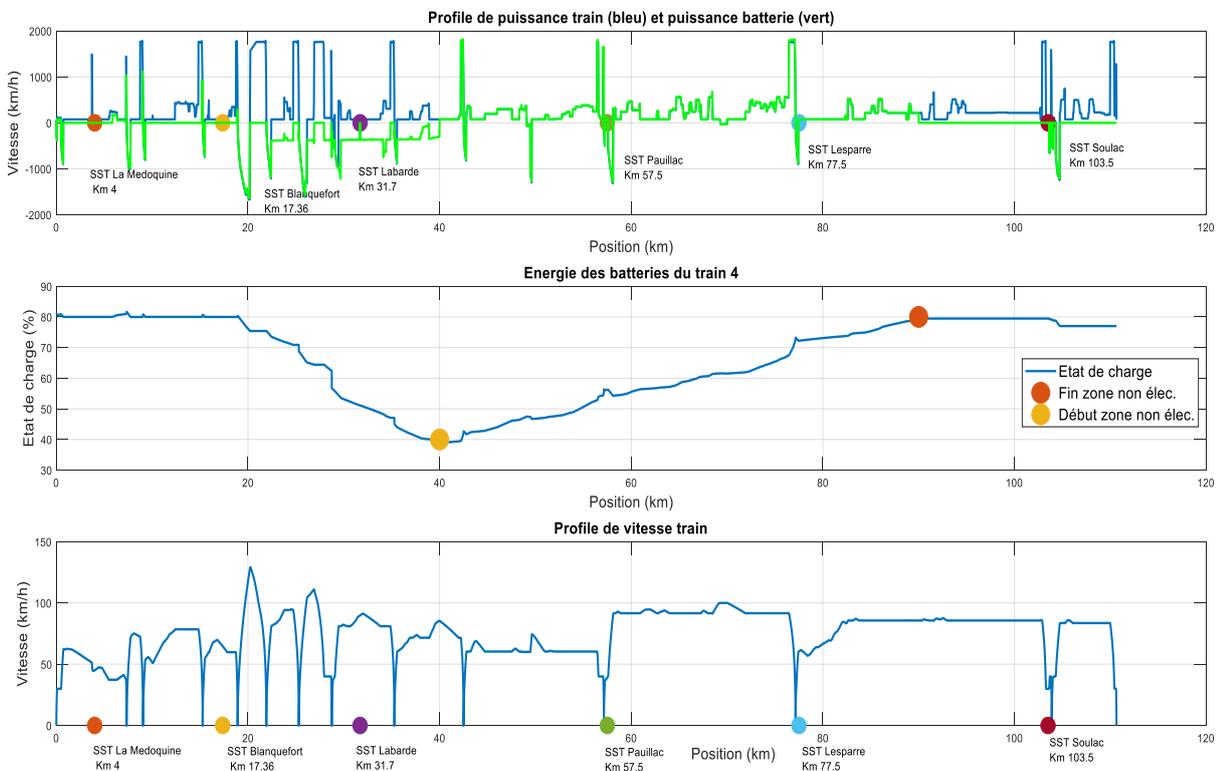


Figura 53 : In alto il profilo di potenza domandato (in blu) e la potenza fornita dalla batteria (in verde), in centro l'SoC della batteria e in basso il profilo di velocità del treno, il tutto in funzione della posizione chilometrica. Il punto giallo indica l'inizio della zona non elettrificata, il punto arancione la fine. Tragitto di ritorno

### 7.3 Studio fattibilità di diversi scenari di non elettrificazione

Il sovradimensionamento energetico della batteria, nel caso studiato nel paragrafo precedente, porta a considerare l'opzione di avere zone non elettrificate più estese, utilizzando in modo più ottimale la capacità delle batterie installate. Questa possibilità viene affiancata a diverse esigenze dei treni, a livello di batteria e di tratte.

Nell'immagine sottostante sono riportati degli scenari di non elettrificazione reali per la linea Bordeaux-Le Verdon sur mer. Come spiegato nel capitolo introduttivo del caso studio, la linea è già esistente ma deve essere rinnovata elettricamente per la maggior parte dei chilometri. Lo scopo è comprendere dove è possibile risparmiare sulle spese di elettrificazione. Nello schema sottostante in alcune zone è considerata necessaria la catenaria per un alto traffico di treni (inizio linea) o per la necessità di ridondanza delle sottostazioni elettriche. Per quest'ultimo motivo, negli scenari sotto illustrati viene considerata in una sola occasione la possibilità di sopprimere una sottostazione.

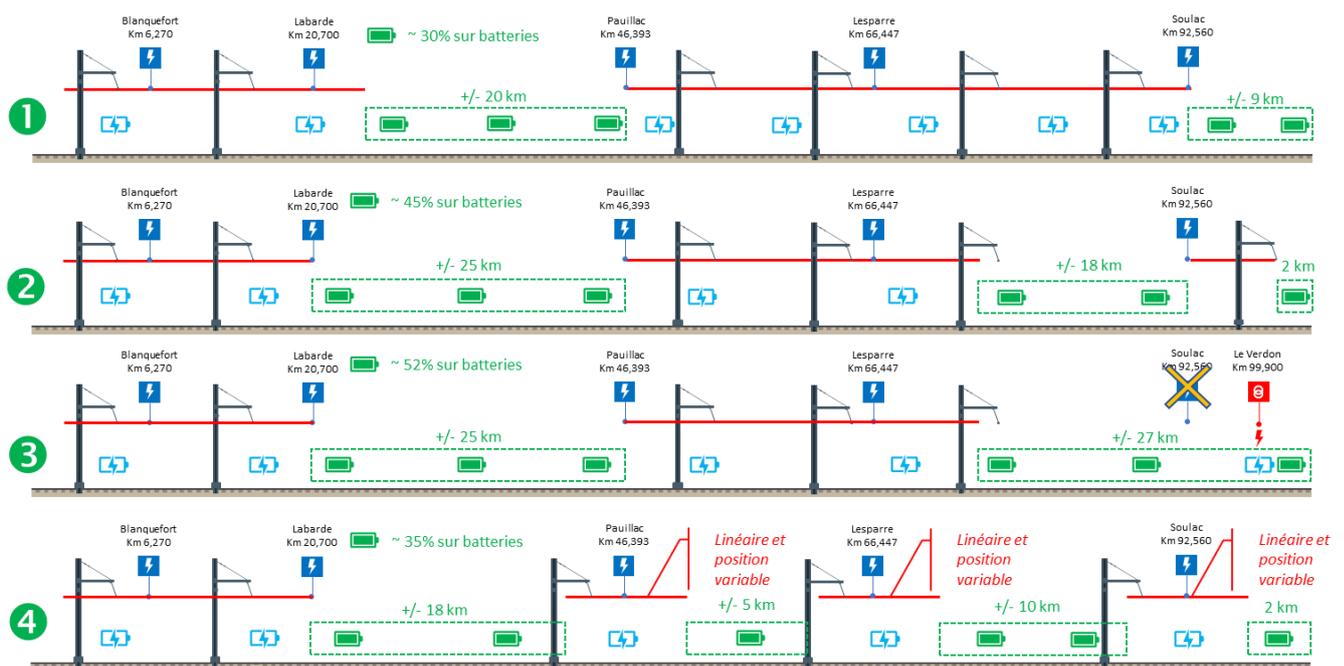


Figura 54: Scenari di non elettrificazione reali per la linea Bordeaux- Verdon sur mer. In verde, nella parte sinistra di ogni scenario, sono indicate in verdi le percentuali di non elettrificazione sulla linea.

Le prove fatte per ciascun caso di studio seguono lo stesso protocollo eseguito per il caso limite analizzato nel paragrafo precedente: si analizza il tragitto di un treno che parta con l'80% di carica della batteria per la tratta di andata, ed al ritorno l'SoC iniziale è impostato allo stesso valore di quello finale del caso dell'andata.

Nell seguenti pagine, per brevità, verranno riportate le simulazioni relative allo scenario di non elettrificazione 2 (riportato in figura 54). Si riporta questo due esempi perché ritenuto più adatto ad un progetto futuro a livello di sicurezza, non essendo presenti eccessive lunghezze non elettrificate e non essendo eliminata nessuna sottostazione elettrica.

### 7.3.1 Scenario di non elettrificazione 2: tre zone non elettrificate, percentuale di non elettrificazione 45%

Questo scenario è caratterizzato da una percentuale di linea non elettrificata del 45%. Considerando la lunghezza della linea di 110 km, ed il costo di circa un milione di euro per chilometro di catenaria restaurata, questa possibilità porta ad un risparmio (a livello di infrastruttura) di 49,5 milioni di euro. In figura 55 e figura 56 si mostra il profilo delle potenze, l’SoC e il profilo di velocità relative allo scenario 2. Le informazioni che è necessario cogliere dai due grafici sono l’SoC sempre mantenuto in un intervallo considerato “sano” per la batteria, un utilizzo frequente della frenata rigenerativa e la capacità della batteria di sostenere anche i picchi di potenza più elevati (vedi i Picchi tra Lesparre e Pauillac, figura 55).

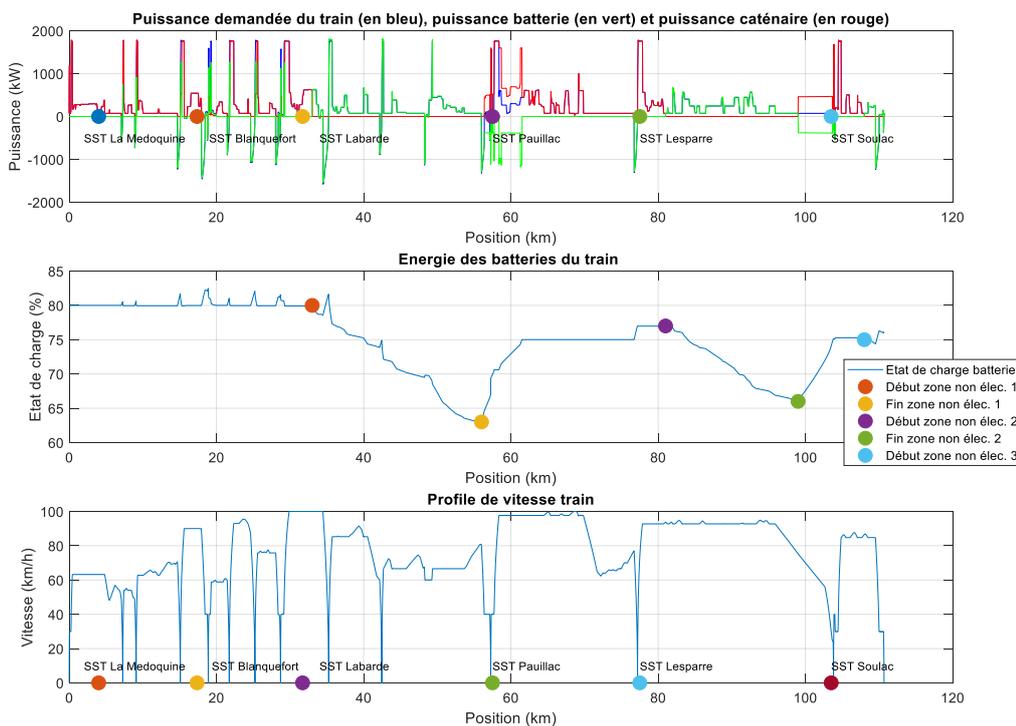


Figura 55 : In alto il profilo di potenza domandato (in blu) e la potenza fornita dalla batteria (in verde), La potenza fornita dalla catenaria (rosso). In centro l’SoC della batteria e in basso il profilo di velocità del treno, il tutto in funzione della posizione chilometrica. Il punto rosso indica l’inizio della prima zona non elettrificata, il punto giallo la fine. Il punto viola l’inizio della seconda ed il punto verde la fine. Il punto azzurro l’inizio dell’ultima. Tragitto di andata.

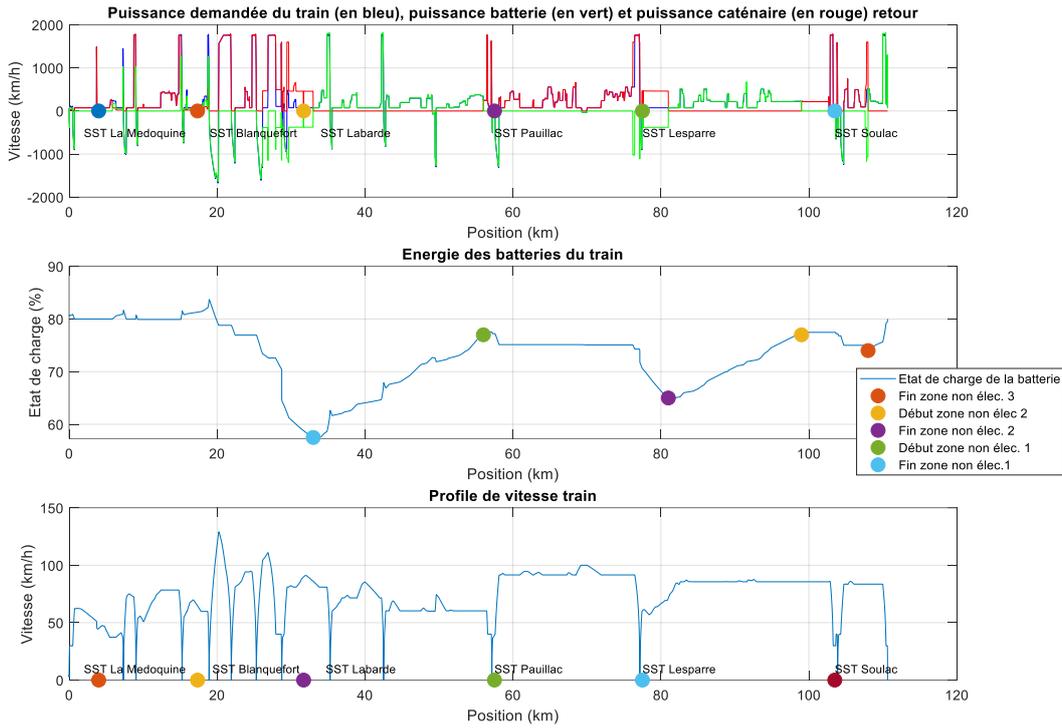


Figura 56 : In alto il profilo di potenza domandato (in blu) e la potenza fornita dalla batteria (in verde), La potenza fornita dalla catenaria (rosso). In centro l’SoC della batteria e in basso il profilo di velocità del treno, il tutto in funzione della posizione chilometrica. Il punto rosso indica la fine della prima zona non elettrificata, il punto giallo l’inizio della seconda. Il punto viola la fine. Il punto verde l’inizio della terza. Il punto azzurro la fine. Tragitto di ritorno.

# 8 Problemi di ottimizzazione e software per il dimensionamento

In ambito industriale vengono normalmente utilizzati due metodi di dimensionamento [4]:

- Il metodo diretto: si rappresenta un sistema partendo dalle sue equazioni funzionali e si valutano le sue prestazioni (come fatto a livello di simulazione per questa tesi)
- Il metodo inverso: le prestazioni del modello vanno a determinare le variabili di dimensionamento (si rivela necessario l'utilizzo di un algoritmo di ottimizzazione)

Nel lavoro di simulazione esposto nel capitolo 7 i parametri di entrata sono fissi, stabiliti a priori in base ad esperienze precedenti e conoscenze della linea (metodo diretto). Le lunghezze delle zone non elettrificate, oppure la dimensione della batteria, erano scelti come parametri d'entrata ed in seguito erano analizzati i risultati, come l'energia fornita dalle sottostazioni.

Una buona parte del lavoro di tesi è consistita nell'analisi del caso di studio già considerato (linea Bordeaux- Le Verdon sur mer) e del dimensionamento del sistema di accumulo tramite un processo di ottimizzazione. Il concetto base dell'ottimizzazione è quello di lasciare come variabili i parametri di entrata in modo tale da ottenere un'uscita il più conveniente possibile; nel caso dell'energia fornita dalle sottostazioni elettriche il valore minimo.

## 8.1 Metodo diretto

Lo studio di un problema attraverso il metodo diretto consiste nel determinare le prestazioni di un sistema a partire dalle sue caratteristiche, stabilite in precedenza, lo scopo è quindi di analizzare il comportamento di un sistema, attraverso dei metodi di simulazione.

Il metodo diretto si svolge in tre tappe principali: determinazione della struttura del sistema (specifiche), modellizzazione del sistema e simulazione per ottenere dei risultati ed analizzare le prestazioni.

Utilizzando questo metodo può essere necessario modificare i parametri d'ingresso manualmente, avendo compreso la dinamica del sistema, per migliorare i risultati della simulazione (come visto nel capitolo 7). Questa pratica rischia di essere poco efficace per sistemi particolarmente complessi, e richiede una particolare esperienza pratica.

## 8.2 Metodo inverso

Lo scopo del metodo inverso è di determinare le caratteristiche in ingresso del sistema in modo da ottimizzare le prestazioni in uscita. In questo caso bisogna inizialmente stabilire le grandezze desiderate in uscita per poi risalire alle caratteristiche d'ingresso del sistema che permettano di garantire determinate prestazioni. La pratica di invertire tutte le equazioni del sistema può essere molto complessa, spesso conviene quindi usare un algoritmo di ottimizzazione.

Un problema di ottimizzazione è dunque un problema inverso, che può essere generalmente formulato come nel sistema (4.1) [4]:

$$\begin{cases} \min (f_{obb}(x, p)) \\ g(x, p) \leq 0 \\ h(x, p) = 0 \\ x_i \in [x_i^{min}, x_i^{max}] \forall i \in [1; N] \end{cases} \quad (8.1)$$

Dove

$f_{obb}$ : funzione obiettivo, è la grandezza che deve essere minimizzata

$g$ : funzione che contiene le condizioni di inuguaglianza (ad esempio, la tensione della linea di contatto deve essere al di sotto di un valore massimo)

$h$ : funzione che contiene le condizioni di uguaglianza (ad esempio, la carica della batteria deve avere lo stesso valore all'inizio e alla fine del percorso)

$x = [x_1, \dots, x_N]$ : variabili del problema variabili dimensionanti del sistema (ad esempio, .....

$[x_i^{min}, x_i^{max}]$ : intervallo di valori della variabile  $x_i$

$N$ : numero delle variabili

$p$ : Parametri del modello (assegnati)

Il metodo di dimensionamento per ottimizzazione consiste quindi nell'impostare in ingresso al modello dei valori variabili (entro un certo intervallo), partendo da alcuni parametri fissi (caratterizzanti del sistema studiato) per minimizzare o massimizzare una grandezza (funzione obiettivo), mantenendo entro certi intervalli o valori le altre uscite.

## 8.3 Algoritmi di ottimizzazione

La scelta dell'algoritmo di ottimizzazione è influenzata dalla natura del modello e dalle specifiche [4]:

- Numero delle variabili, che influenza i tempi di calcolo e la memoria occupata sui sistemi informatici. In generale oltre le 50 variabili il sistema può essere considerato complesso
- Distinzione tra variabili continue e variabili discrete

- Distinzione tra funzioni lineari e non lineari, derivabili e non derivabili
- Il numero e la tipologia dei vincoli
- Numero delle funzioni obiettivo

Gli algoritmi di ottimizzazione sono suddivisi in due principali famiglie: algoritmi deterministici e algoritmi stocastici.

Un algoritmo di ottimizzazione è definito deterministico quando, date specifiche condizioni iniziali, fornisce sempre la stessa soluzione. All'interno di questa famiglia si possono distinguere gli algoritmi detti locali e gli algoritmi detti globali. Per una ricerca del punto di ottimo in modo locale, per funzioni derivabili e continue, è normalmente preferibile utilizzare un algoritmo come SQP (Sequential Quadratic Programming) oppure IP (interior point). In caso di ricerca globale sono spesso utilizzati algoritmi come EGO (Efficient Global Optimisation) [4]. La debolezza degli algoritmi deterministici è la loro forte dipendenza dalla scelta del punto iniziale e l'utilizzo del gradiente porta al rischio che l'algoritmo si fermi a dei punti di minimo locale vicini al punto di minimo assoluto ricercato. La loro principale peculiarità sono le loro buone prestazioni nel momento in cui il problema trattato abbia un grande numero di variabili e vincoli.

Gli algoritmi stocastici, che non verranno analizzati approfonditamente, si basano in parte su una scelta aleatoria della direzione di ottimizzazione (a differenza degli algoritmi deterministici che si basano invece sul gradiente), questo può portare a differenti risultati, pur partendo dalle stesse condizioni iniziali. Gli algoritmi stocastici hanno come nota positiva il fatto di non fermarsi al ritrovamento del minimo locale (ottimi dunque per un utilizzo globale) e possono inoltre trattare variabili discrete; sono tuttavia molto onerosi a livello di tempo e di memoria di calcolo.

Il problema di ottimizzazione considerato in questo lavoro di tesi ha le seguenti caratteristiche:

- Variabili continue
- Sistema di equazioni non lineari
- Funzioni derivabili
- Numerosi vincoli
- Numerose variabili

La scelta è dunque ricaduta sull'algoritmo SPQ [4]. Il cui vantaggio principale risiede nella velocità di convergenza rispettando i vincoli imposti; è tuttavia indicato per un utilizzo locale, utilizzando il gradiente. L'utilizzo del gradiente richiede inoltre il calcolo della Jacobiana del sistema, difficoltà aggiuntiva a livello computazionale.

#### **8.4 Utilizzo del software CADES**

In generale, per risolvere problemi di ottimizzazione complessi, si utilizzano software in cui siano integrati gli algoritmi di ottimizzazione illustrati nel paragrafo precedente. Nello svolgimento di

questa tesi è stato utilizzato il software di ottimizzazione CADES, sviluppato dal laboratorio di ingegneria elettrica Ge2lab in collaborazione con l'azienda informatica di Vesta Systems.

Il software presenta un'interfaccia che facilita la decisione dei vincoli e la gestione di tutte le variabili coinvolte, presenta inoltre un ambiente di programmazione per gestire i modelli studiati e può analizzare problemi di ottimizzazione con vari algoritmi, tra cui l'SPQ.

#### 8.4.1 Funzionamento del software CADES

Lo scopo del software CADES è quello di gestire il processo di ottimizzazione spiegato nello schema della figura 57. In CADES il modello che deve essere analizzato tramite l'algoritmo di ottimizzazione può essere scritto in più linguaggi di programmazione: C++, Java, Python e SML (un linguaggio di scrittura d'equazioni interno a CADES) [4]. Il modello (quindi le equazioni che caratterizzano il sistema) possono essere scritte in uno dei linguaggi elencati in precedenza e, se conveniente, si possono scrivere parti differenti in linguaggi differenti e successivamente unire. In seguito, CADES crea, a partire del modello il cosiddetto "muse", che può essere interpretato come una scatola, di cui noi conosciamo solo ingressi ed uscite, e di cui il contenuto non è più importante. Il "muse" può essere utilizzato per effettuare diverse operazioni:

- Un calcolo semplice (chiamato "compute") che, se le variabili d'ingresso sono uguali, deve fornire le stesse uscite fornite dal software di simulazione
- Un'analisi della sensibilità del modello
- Un'ottimizzazione (scopo ultimo del software CADES)

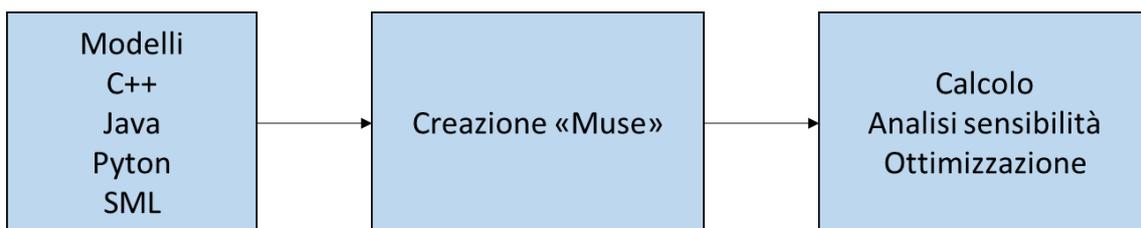


Figura 57 : Schema di funzionamento del software CADES

Il primo passaggio che bisogna effettuare, se si intende ottimizzare una funzione obiettivo relativa ad un determinato modello, è necessario adattare questo modello matematico. Il modello può essere scritto in diversi linguaggi di programmazione (figura 57), in questo lavoro di tesi si è quindi preso il modello utilizzato nel software di simulazione (già scritto in C++), con qualche modifica a livello di codice, per adattarlo al funzionamento di CADES.

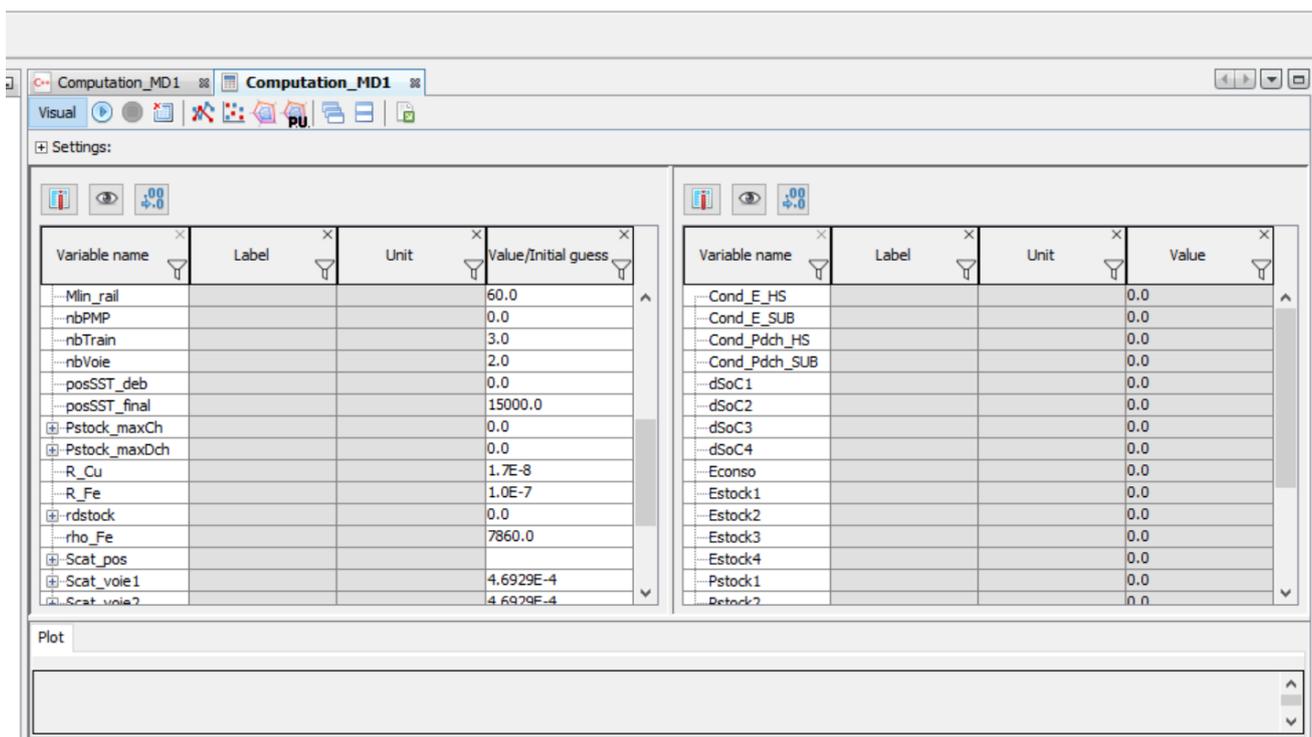


Figura 58: Interfaccia del software CADES durante la fase di calcolo. A sinistra l'elenco degli ingressi. A destra tutte le uscite del sistema. In questo caso sono 0 perché il calcolo deve ancora essere avviato.

In seguito, si crea il file "muse" e si avvia la parte di calcolo (figura 57 a destra). In questo caso il programma ci permette di inserire, tramite interfaccia (figura 58), i valori degli ingressi del sistema (dimensione e tensione nominale batterie, lunghezza delle zone non elettrificate, tensione sottostazioni elettriche, ecc.) ed una volta lanciato il calcolo vengono dati come output tutti i valori delle grandezze in uscita (energia batterie, energia sottostazioni, costo totale). Se questi valori sono identici ad i valori forniti dal software di simulazione la modifica del modello è avvenuta correttamente. Dopo aver verificato il funzionamento del modello tramite la funzione di calcolo è possibile impostare le entrate della simulazione. Per tutte le variabili d'ingresso impostate nella fase di calcolo, nella fase di ottimizzazione è possibile stabilire quali variabili debbano restare fisse (tensione delle sottostazioni, numero treni, ecc.) e quali variabili debbano essere lasciate libere di cambiare all'interno di un intervallo. Lo stesso processo si applica per le uscite del sistema, si seleziona infatti una funzione obiettivo (uscita del sistema da massimizzare o minimizzare), si seleziona quali uscite debbano essere vincolate ad uno specifico intervallo di valori (tensione della catenaria, per esempio) e quali uscite debbano avere un determinato valore. Le uscite che non è importante controllare possono essere lasciate libere.

Variable name	Label	Unit	Type of constraint	Value/Initial guess	Min	Max	Weight	Description
Cond_E_HS			FREE					{type=FREE}
Cond_E_SUB			FREE					{type=FREE}
Cond_Pdch_HS			FREE					{type=FREE}
Cond_Pdch_SU			FREE					{type=FREE}
dSoC1			INTERVAL		-0.01	0.01		{type=INTERVA...
dSoC2			INTERVAL		-0.01	0.01		{type=INTERVA...
dSoC3			FREE					{type=FREE}
dSoC4			FREE					{type=FREE}
Econso			MINIMIZE	8000000.0			1.0	{type=MINIMIZ...
Estock1			FREE					{type=FREE}
Estock2			FREE					{type=FREE}
Estock3			FREE					{type=FREE}
Estock4			FREE					{type=FREE}
Pstock1			FREE					{type=FREE}
Pstock2			FREE					{type=FREE}
Pstock3			FREE					{type=FREE}
Pstock4			FREE					{type=FREE}
UmaxNode			INTERVAL		1750.0	1950.0		{type=INTERVA...
UmaxTrain			INTERVAL		1750.0	1950.0		{type=INTERVA...
UminNode			INTERVAL		1000.0	1750.0		{type=INTERVA...
UminTrain			INTERVAL		1000.0	1750.0		{type=INTERVA...
Umoy			INTERVAL		1350.0	1750.0		{type=INTERVA...

Figura 59 : Interfaccia del software CADES relativa alla fase di ottimizzazione. In particolare, sono mostrati i vincoli imposti sulle uscite

Nella figura 59 si mostrano i vincoli imposti sulle uscite del modello in fase di ottimizzazione. La colonna “Type of constraint” permette di stabilire se il valore di ogni uscita deve essere libero (“free”), compreso in un intervallo (“interval”) oppure da minimizzare (“minimize”). Nella parte bassa dell’immagine si mostrano gli intervalli all’interno dei quali devono stare la tensione massima e la tensione minima. Il parametro “Econso” rappresenta invece l’energia consumata in totale da tutte le sottostazioni elettriche, che deve essere minimizzata nel caso della figura 59; per questo parametro è data anche una stima iniziale (“initial guess”), più questo valore è realistico più i tempi di ottimizzazione saranno contenuti.

#### 8.4.2 Dimensionamento di un pacco batterie con un metodo di ottimizzazione

Il metodo di ottimizzazione spiegato all’inizio del capitolo, applicato tramite l’utilizzo del software CADES, può portare a risolvere in maniera automatica un problema di dimensionamento riguardante la linea Bordeaux-Verdon sur mer. Buona parte del lavoro di tesi è consistita nell’adattamento del modello del software di simulazione per l’utilizzo nel software CADES. In [4] è stato più volte utilizzato il software per determinare la dimensione ottimale delle batterie e supercondensatori per ottenere il minor utilizzo di energia possibile.

Il compito di questa tesi è stato quello di adattare il nuovo modello, che comprende zone non elettrificate ed una nuova modellizzazione dell’elemento batteria, all’ambiente CADES. La difficoltà principale è stata inserire la lunghezza delle zone non elettrificate come variabile di ottimizzazione,

il fatto che le zone non elettrificate possano cambiare lunghezza porta complicazioni a livello di modellizzazione. Il caso studio considerato è la linea Bordeaux\_Verdon sur mer, una linea obsoleta (come spiegato nel capitolo 4) che deve essere rinnovata in certe sezioni. Visto il costo ingente del rinnovamento della catenaria si può pensare di rinnovare meno chilometri di linea percorrendoli tramite una trazione con batteria. Lo scopo di questa parte della tesi è stato di dimensionare le batterie e le zone non elettrificate per ottenere il minor costo totale dell'opera. Intuitivamente si può capire che maggiore è la lunghezza delle zone non elettrificate maggiore è il risparmio a livello di elettrificazione; allo stesso tempo sarà però necessario un maggiore investimento a livello di batterie. Relativamente alle batterie, lo scopo dell'ottimizzazione è di identificare il numero di RACK adatto. Il numero di zone elettrificate è momentaneamente sceso a 1, per poter operare su un modello più snello, a livello di calcolo; lo scopo dell'ottimizzazione è dunque di determinare la lunghezza di una singola zona non elettrificata. Il costo totale è invece suddiviso in tre costi:

- Costo dell'infrastruttura: in prima approssimazione si può considerare che ri-elettrificare una linea ferroviaria costi circa un milione di euro al chilometro. Questo valore può essere calcolato più precisamente considerando le condizioni della linea e le difficoltà oggettive di elettrificazione (gallerie, pendenze, ecc.)
- Costo della batteria: si considera il costo totale delle batterie utilizzate per i 5 treni. Inoltre, si considera che le batterie debbano essere cambiate indicativamente ogni 10 anni e che la durata dell'investimento sia di 100 anni. Il costo delle batterie viene dunque attualizzato ai nostri giorni,
- Costo dell'energia elettrica e di manutenzione: viene considerato il costo dell'energia elettrica delle sottostazioni, che viene anch'esso attualizzato per gli anni successivi. I costi di manutenzione vengono impostati ad un valore fisso, già adoperato da SNCF

Nel lavoro di tesi non è stato possibile ottenere un risultato da questa ottimizzazione, più complessa del caso in [4]. Il motivo risiede in un presunto intoppo informatico nel software di CADES, tutt'ora non risolto dai tecnici dell'azienda informatica Vesta Systems.

Le simulazioni eseguite con CADES, solamente a livello di calcolo e non di ottimizzazione, hanno fornito dei risultati che indicativamente mostrano un vantaggio economico maggiore nel non elettrificare. L'elettrificazione infatti risulta più costosa, anche perché il costo delle batterie tra quarant'anni, attualizzato al giorno d'oggi, è infimo.

# Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono state analizzate le linee ferroviarie ad elettrificazione parziale e il loro impiego rispettando le norme di sicurezza ed i limiti di tensione che caratterizzano il contesto ferroviario. L'esigenza di una linea ferroviaria ad elettrificazione parziale nasce dalla necessità di ammodernamento di alcune linee nel sud-est della Francia che attualmente sono in condizioni precarie, in particolare la linea di contatto. In alcuni casi può essere infatti conveniente, a livello economico, non rinnovare certe parti di linea e stabilire una trazione alimentata dalla sola batteria in questi tratti. Lo scopo era dunque utilizzare un software di simulazione esistente per dimensionare il pacco batteria per diversi scenari di non elettrificazione.

## 8.5 Risultati

Inizialmente si è pensato che la modifica dovesse coinvolgere il solo algoritmo di gestione energetica, imponendo alla potenza fornita dalla catenaria un valore uguale a zero per ogni treno transitante in una zona non elettrificata. Nel corso del lavoro di tesi si è invece reso necessario modificare il software anche a livello di modellizzazione; è stata, infatti, modificata la matrice delle ammettenze per modellizzare con un circuito aperto le zone non elettrificate. Diversi controlli delle correnti erogate dalle sottostazioni elettriche hanno permesso di stabilire che il modello è affidabile nella modellizzazione di zone non elettrificate.

La creazione di un modello di batteria realistico è risultata efficace e ben integrata con un algoritmo di gestione della batteria. Il modello si è basato su il modulo Toshiba 2P12S agli ioni di Litio-Titanio. L'algoritmo seleziona il regime di carica/scarica della batteria per massimizzare la potenza erogabile. Le prestazioni della batteria sono ricavate da uno studio sperimentale che ha misurato la tensione e la corrente della singola cella al variare dello stato di carica.

La modifica del software ferroviario e l'integrazione di un modello più realistico del pacco batteria hanno permesso l'analisi di diversi scenari di non elettrificazione sulla linea Bordeaux-Le Verdon sur mer. In particolare, si è riuscito a stabilire che un pacco batterie composto da 5 RACK ferroviari (150 moduli Toshiba) è in grado di alimentare il treno per la maggior parte degli scenari di non elettrificazione della linea. Il pacco batterie dimensionato ha le seguenti caratteristiche:

- Tensione nominale: 828 V
- Capacità energetica: 165 kWh
- Potenza massima: compresa tra 810 kW e 1460 kW (in base allo SOC) a regime di carica/scarica massimo (per un tempo massimo di 10 s)

In condizioni di tragitto normale si è verificato che il treno potesse compiere il tragitto di andata e ritorno mantenendo uno SoC sempre compreso tra il 40% e l'80%, per allungare la durata di vita

della batteria. Per la maggior parte degli scenari il pacco batteria è risultato sufficiente anche considerando un possibile guasto di una delle sottostazioni elettriche.

Un altro scopo del lavoro di tesi era inizialmente quello di trovare la dimensione ottimale della lunghezza delle zone non elettrificate e la dimensione ottimale delle batterie, per ottenere in uscita il minor costo totale possibile, tramite un software di ottimizzazione (CADES). Mentre nel lavoro di dimensionamento tramite simulazione, gli ingressi del sistema venivano scelti a priori ed in seguito analizzati i risultati, l'utilizzo di software di ottimizzazione permette di dimensionare le variabili d'ingresso per ottenere in uscita il minimo della cosiddetta funzione obiettivo (uscita che si è scelto di ottimizzare). Il software doveva essere utilizzato per minimizzare il costo totale del rinnovamento della linea Bordeaux- Verdon sur mer, trovando la lunghezza ideale delle zone non elettrificate ed il numero di RACK da posizionare in parallelo (per comporre il pacco batteria). Il modello si è rivelato troppo complesso per il software di ottimizzazione che, nonostante i numerosi interventi dell'azienda proprietaria Vesta Systems, non ha mai dato un risultato finale del processo di ottimizzazione. Nonostante questo problema, è stato possibile, tramite simulazioni intermedie, calcolare che per la linea Bordeaux- Verdon sia meglio elettrificare solo in parte la linea. Il prezzo di rinnovo della catenaria risulta infatti maggiore di quello del pacco batterie, considerando anche un rinnovo del sistema di accumulo d'energia ogni dieci anni.

## **8.6 Sviluppi futuri**

Questo lavoro di tesi ha avuto una certa risonanza nel settore "Innovation and research" presso SNCF, perché è stato dimostrato che non solo è possibile un progetto ferroviario ad elettrificazione parziale, ma è inoltre stato calcolato che possa essere più conveniente, a livello economico, delle soluzioni più classiche. Il mio lavoro di tesi ha rappresentato per l'azienda uno studio preliminare, per comprendere le potenzialità dell'elettrificazione parziale nel mondo ferroviario. In seguito, il progetto sarà seguito da altri componenti della squadra "innovation and research" per stabilire preventivi più precisi ed infine cercare finanziatori per il progetto. Per SNCF è di particolare interesse riuscire a risolvere il problema lato ottimizzazione, per poter scegliere la migliore possibilità di non elettrificazione tra i vari scenari.

Dal punto di vista accademico questo lavoro di tesi è stata la continuazione e l'ulteriore sviluppo del lavoro di dottorato della dottoressa Marie Poline che ha portato ad avere un software di simulazione ferroviario più completo. Il software presenta delle imperfezioni che potranno essere corrette in futuro. Uno degli obiettivi, dal punto di vista accademico, ma anche di SNCF, è quello di ottimizzare il codice del software, per renderlo più leggero e veloce nelle simulazioni.

# INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 : PRINCIPALI TIPI DI ALIMENTAZIONE FERROVIARIA IN EUROPA. [1] .....	5
FIGURA 2 : ANDAMENTO DELLO SFORZO DI TRAZIONE IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ PER UN TRENO. [3] .....	7
FIGURA 3: STRUTTURA GENERICA DI UN SISTEMA DI ALIMENTAZIONE FERROVIARIO [4] .....	8
FIGURA 4 : SCHEMA DI ALIMENTAZIONE DI UNA LINEA METROPOLITANA A 750 V DC NEL REGNO UNITO. LE TENSIONI DI ALIMENTAZIONE HANNO VALORI DIVERSI DA QUELLI USATI NORMALMENTE IN ITALIA [5] .....	9
FIGURA 5 : SISTEMA DI TRASMISSIONE E ALIMENTAZIONE PER UNA RETE DI ALIMENTAZIONE DC. [6] .....	11
FIGURA 6 : DETTAGLIO DELLA STRUTTURA DI UNA TIPICA SOTTOSTAZIONE ELETTRICA. [5] .....	12
FIGURA 7 : GRAFICI UTILI ALLO STUDIO DELLA POSSIBILITÀ DI RIGENERAZIONE ELETTRICA IN UNA TRATTA FERROVIARIA. [7] .....	15
FIGURA 8: PIANO DI RAGONE DI RELATIVO A DIVERSI SISTEMI DI ACCUMULO E DI PROPULSIONE. NEL GRAFICO SONO ANCHE INDICATI I RELATIVI TEMPI DI RICARICA. [22] .....	16
FIGURA 9: CIRCUITO EQUIVALENTE DI UNA LINEA FERROVIARIA ALIMENTATA DA 3 SOTTOSTAZIONI ED IN CUI TRANSITANO 18 TRENI. [12] .....	20
FIGURA 10: RAPPRESENTAZIONE CIRCUITALE DI UNA SEZIONE DI LINEA FERROVIARIA SEMPLIFICATA [11] .....	21
FIGURA 11: CURVE DI CARICO PER OGNI TIPO DI MODELLIZZAZIONE DELL'ELEMENTO TRENO. [13] .....	22
FIGURA 12: RAPPRESENTAZIONE DI UNA LINEA A "SCALA" SEMPLIFICATA: DUE TRENI ALIMENTATI DA DUE SSE .....	23
FIGURA 13: RAPPRESENTAZIONE CIRCUITALE DI UNA LINEA ALIMENTATA DA CINQUE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN CUI CIRCOLA UN TRENO. [11] .....	25
FIGURA 14 : RAPPRESENTAZIONE DELL'INTERPRETAZIONE GRAFICA DEL METODO NEWTON- RAPHSON .....	28
FIGURA 15: SCHEMA GENERALE DEGLI INPUT E DEGLI OUTPUT DEL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE E DEL PROGRAMMA DI OTTIMIZZAZIONE ....	29
FIGURA 16: PORZIONE DI LINEA FERROVIARIA, VIA DI ANDATA E DI RITORNO, SU CUI CIRCOLANO 6 TRENI .....	30
FIGURA 17: RAPPRESENTAZIONE CIRCUITALE APPROSSIMATA DELLA LINEA DI ESEMPIO .....	31
FIGURA 18 : SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE FERROVIARIO. IN AZZURRO GLI INPUT ED IN ROSSO GLI OUTPUT .....	31
FIGURA 19: ESEMPIO DI CALCOLO DEL NUMERO DI NODI PER DUE PORZIONI DI LINEA. [4] .....	33
FIGURA 20 : SCOMPOSIZIONE IN NODI PER LA LINEA D'ESEMPIO .....	33
FIGURA 21 : NUMERAZIONE DELLE PORZIONI DI LINEA PER LA LINEA D'ESEMPIO .....	33
FIGURA 22 : MODELLIZZAZIONE ELEMENTO TRENO .....	34
FIGURA 23 : MODELLIZZAZIONE DELL'ELEMENTO SOTTOSTAZIONE ELETTRICA .....	34
FIGURA 24: DETTAGLIO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DELLA SEZIONE DI LINEA CONSIDERATA .....	37
FIGURA 25: DETTAGLIO DELLA SOTTOSTAZIONE ELETTRICA COLLEGATA AL NODO 3 .....	37
FIGURA 26 : CIRCUITO EQUIVALENTE AI FINI DEL CALCOLO DELLA POTENZA MASSIMA DELLA CATENARIA. [4] .....	40
FIGURA 27 : SCHEMA APPROFONDITO DEL FUNZIONAMENTO DELLA GESTIONE ENERGETICA PER SOGLIA. S1 È SOGLIA <sub>1</sub> E S2 È SOGLIA <sub>2</sub> .....	42
FIGURA 28: SCHEMA DELLE GESTIONE ENERGETICA NON DIPENDENTE DALLA TENSIONE DI LINEA .....	43
FIGURA 29: MODELLIZZAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA DELLA LINEA BORDEAUX - LE VERDON SUR LA MER. LA SSE SONO RAPPRESENTATE COME NODI FISSI (QUADRATI BLU), GLI ALTRI SONO NODI MOBILI (PUNTI ARANCIONI) .....	45
FIGURA 30: GRAFICO DELLE POSIZIONI DEI TRENI IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE. IL TEMPO DI SIMULAZIONE TOTALE È DI 15852 S 46	
FIGURA 31 : SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA TRA LA SSE DI PAUILLAC E LA SSE DI LESPARRE (PRIMA OPZIONE) .....	47
FIGURA 32: SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA TRA LA SSE DI PAUILLAC E LA SSE DI SOUYLAX (SECONDA OPZIONE) .....	47
FIGURA 33 : SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA TRA LA SSE DI LABARDE E LA SSE DI SOULAX (TERZA OPZIONE) .	47

FIGURA 34: DETTAGLIO DELLA MODELLIZZAZIONE DELLA LINEA DI TEST, SONO EVIDENZIATI I CONTRIBUTI IN CORRENTE DI OGNUNA DELLE 8 SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE.....	49
FIGURA 35 : CORRENTI FORNITE DALLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN FUNZIONE DEL TEMPO. IN ROSSO LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 4 E IN BLU LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 5. ....	50
FIGURA 36: ALGORITMO DI MODIFICA DELLA MATRICE DELLE AMMETTENZE Y .....	51
FIGURA 37:ALGORITMO DI MODIFICA DEFINITIVO DELLA MATRICE DELLE AMMETTENZE Y.....	52
FIGURA 38: CORRENTI FORNITE DALLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN FUNZIONE DEL TEMPO. IN ROSSO LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 4 E IN BLU LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 5.....	53
FIGURA 39 :POTENZE CARATTERISTICHE DELLA LINEA FERROVIARIA IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE. IN BLU LA POTENZA DOMANDATA DAL MOTORE E DAGLI AUSILIARI, IN VERDE LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA E IN ROSA LA POTENZA FORNITA DALLA CATENARIA. IL PUNTO ARANCIONE E IL PUNTO GIALLO SONO RISPETTIVAMENTE L’INIZIO E LA FINE DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA.....	55
FIGURA 40 : TENSIONE( PRIMO GRAFICO) E CORRENTE (SECONDO GRAFICO) DI UNA CELLA IN FUNZIONE DELLO STATO DI CARICA DURANTE UNA PROVA DI CARICA.....	57
FIGURA 41 : STRUTTURA PACCO BATTERIE FERROVIARIO, SONO EVIDENZIATI I RACK, I MODULI E LE SINGOLE CELLE. $N_{RACK}$ È IL NUMERO DI RACK IN PARALLELO.....	59
FIGURA 42: SCHEMA DELL’ALGORITMO DI REGOLAZIONE DELLA BATTERIA. IN BASE ALLA POTENZA DOMANDATA L’ALGORITMO VERIFICA CHE LA BATTERIA SIA SUFFICIENTE PER SODDISFARE LA DOMANDA. ....	60
FIGURA 43 : ENERGIA FORNITA DALLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE DI TRENI IBRIDATI .....	62
FIGURA 44 : IN ALTO A SINISTRA LA TENSIONE MINIMA, IN ALTO A DESTRA LA TENSIONE MASSIMA E IN BASSO LA TENSIONE MEDIA, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE DI TRENI IBRIDATI. ....	63
FIGURA 45 : PERCENTUALE DI POTENZA DISSIPATA DAL FRENO MECCANICO IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE DI TRENI IBRIDI.....	64
FIGURA 46 : PRIMO SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE SULLA LINEA BORDEAUX- LE VERDON SUR MER .....	65
FIGURA 47 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATA DAL TRENO. IN BASSO LA VELOCITÀ DEL TRENO, ENTRAMBI IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. LA LINEA ROSSA A SINISTRA È L’INIZIO DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA, LA LINEA A DESTRA LA FINE .....	66
FIGURA 48 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATA DAL TRENO. IN BASSO LA VELOCITÀ DEL TRENO, ENTRAMBI IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. LE DUE LINEE VIOLA RAPPRESENTANO I LIMITI DELLA NUOVA ZONA NON ELETTRIFICATA .....	67
FIGURA 49 : NELLA PARTE ALTRA LA POTENZA DOMANDATA DAL TRENO (BLU), LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (VERDE), LA POTENZA DELLA CATENARIA (ROSA) E LA POTENZA DISSIPATA DAI FRENI (GIALLO). IN BASSO L’SOC DELLA BATTERIA. IL TUTTO IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE.....	68
FIGURA 50 : TENSIONI AL PANTOGRAFO RELATIVE A 14 TRENI IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA .....	69
FIGURA 51: SoC DEL PACCO BATTERIA DI OGNI TRENO IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE .....	69
FIGURA 52 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), IN CENTRO L’SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO VERDE INDICA L’INIZIO DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA, IL PUNTO VIOLA LA FINE. TRAGITTO DI ANDATA.....	71
FIGURA 53 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), IN CENTRO L’SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO GIALLO INDICA L’INIZIO DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA, IL PUNTO ARANCIONE LA FINE. TRAGITTO DI RITORNO .....	71
FIGURA 54: SCENARI DI NON ELETTRIFICAZIONE REALI PER LA LINEA BORDEAUX- VERDON SUR MER. IN VERDE, NELLA PARTE SINISTRA DI OGNI SCENARIO, SONO INDICATE IN VERDI LE PERCENTUALI DI NON ELETTRIFICAZIONE SULLA LINEA.....	72
FIGURA 55 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), LA POTENZA FORNITA DALLA CATENARIA (ROSSO). IN CENTRO L’SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO ROSSO INDICA L’INIZIO DELLA PRIMA ZONA NON ELETTRIFICATA, IL PUNTO GIALLO LA FINE. IL PUNTO VIOLA L’INIZIO DELLA SECONDA ED IL PUNTO VERDE LA FINE. IL PUNTO AZZURRO L’INIZIO DELL’ULTIMA. TRAGITTO DI ANDATA..	73
FIGURA 56 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), LA POTENZA FORNITA DALLA CATENARIA (ROSSO). IN CENTRO L’SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE	

DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO ROSSO INDICA LA FINE DELLA PRIMA ZONA NON ELETRIFICATA, IL PUNTO GIALLO L'INIZIO DELLA SECONDA. IL PUNTO VIOLA LA FINE. IL PUNTO VERDE L'INIZIO DELLA TERZA. IL PUNTO AZZURRO LA FINE. TRAGITTO DI RITORNO.	74
FIGURA 57 : SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE CADES.....	78
FIGURA 58: INTERFACCIA DEL SOFTWARE CADES DURANTE LA FASE DI CALCOLO. A SINISTRA L'ELENCO DEGLI INGRESSI. A DESTRA TUTTE LE USCITE DEL SISTEMA. IN QUESTO CASO SONO 0 PERCHÉ IL CALCOLO DEVE ANCORA ESSERE AVVIATO. ....	79
FIGURA 59 : INTERFACCIA DEL SOFTWARE CADES RELATIVA ALLA FASE DI OTTIMIZZAZIONE. IN PARTICOLARE SONO MOSTRATI I VINCOLI IMPOSTI SULLE USCITE .....	80
FIGURA 1 : PRINCIPALI TIPI DI ALIMENTAZIONE FERROVIARIA IN EUROPA. [1].....	5
FIGURA 2 : ANDAMENTO DELLO SFORZO DI TRAZIONE IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ PER UN TRENO. [3].....	7
FIGURA 3: STRUTTURA GENERICA DI UN SISTEMA DI ALIMENTAZIONE FERROVIARIO [4].....	8
FIGURA 4 : SCHEMA DI ALIMENTAZIONE DI UNA LINEA METROPOLITANA A 750 V DC NEL REGNO UNITO. LE TENSIONI DI ALIMENTAZIONE HANNO VALORI DIVERSI DA QUELLI USATI NORMALMENTE IN ITALIA [5] .....	9
FIGURA 5 : SISTEMA DI TRASMISSIONE E ALIMENTAZIONE PER UNA RETE DI ALIMENTAZIONE DC. [6].....	11
FIGURA 6 : DETTAGLIO DELLA STRUTTURA DI UNA TIPICA SOTTOSTAZIONE ELETTRICA. [5] .....	12
FIGURA 7 : GRAFICI UTILI ALLO STUDIO DELLA POSSIBILITÀ DI RIGENERAZIONE ELETTRICA IN UNA TRATTA FERROVIARIA. [7].....	15
FIGURA 8: PIANO DI RAGIONE DI RELATIVO A DIVERSI SISTEMI DI ACCUMULO E DI PROPULSIONE. NEL GRAFICO SONO ANCHE INDICATI I RELATIVI TEMPI DI RICARICA. [22].....	16
FIGURA 9: CIRCUITO EQUIVALENTE DI UNA LINEA FERROVIARIA ALIMENTATA DA 3 SOTTOSTAZIONI ED IN CUI TRANSITANO 18 TRENI. [12].....	20
FIGURA 10: RAPPRESENTAZIONE CIRCUITALE DI UNA SEZIONE DI LINEA FERROVIARIA SEMPLIFICATA[11] .....	21
FIGURA 11: CURVE DI CARICO PER OGNI TIPO DI MODELLIZZAZIONE DELL'ELEMENTO TRENO. [13] .....	22
FIGURA 12: RAPPRESENTAZIONE DI UNA LINEA A "SCALA" SEMPLIFICATA: DUE TRENI ALIMENTATI DA DUE SSE.....	23
FIGURA 13: RAPPRESENTAZIONE CIRCUITALE DI UNA LINEA ALIMENTATA DA CINQUE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN CUI CIRCOLA UN TRENO. [11].....	25
FIGURA 14 : RAPPRESENTAZIONE DELL'INTERPRETAZIONE GRAFICA DEL METODO NEWTON- RAPHSON.....	28
FIGURA 15: SCHEMA GENERALE DEGLI INPUT E DEGLI OUTPUT DEL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE E DEL PROGRAMMA DI OTTIMIZZAZIONE ....	29
FIGURA 16: PORZIONE DI LINEA FERROVIARIA, VIA DI ANDATA E DI RITORNO, SU CUI CIRCOLANO 6 TRENI .....	30
FIGURA 17: RAPPRESENTAZIONE CIRCUITALE APPROSSIMATA DELLA LINEA DI ESEMPIO .....	31
FIGURA 18 : SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL PROGRAMMA DI SIMULAZIONE FERROVIARIO. IN AZZURRO GLI INPUT ED IN ROSSO GLI OUTPUT .....	31
FIGURA 19: ESEMPIO DI CALCOLO DEL NUMERO DI NODI PER DUE PORZIONI DI LINEA. [4] .....	33
FIGURA 20 : SCOMPOSIZIONE IN NODI PER LA LINEA D'ESEMPIO.....	33
FIGURA 21 : NUMERAZIONE DELLE PORZIONI DI LINEA PER LA LINEA D'ESEMPIO .....	33
FIGURA 22 : MODELLIZZAZIONE ELEMENTO TRENO .....	34
FIGURA 23 : MODELLIZZAZIONE DELL'ELEMENTO SOTTOSTAZIONE ELETTRICA .....	34
FIGURA 24: DETTAGLIO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DELLA SEZIONE DI LINEA CONSIDERATA .....	37
FIGURA 25: DETTAGLIO DELLA SOTTOSTAZIONE ELETTRICA COLLEGATA AL NODO 3.....	37
FIGURA 26 : CIRCUITO EQUIVALENTE AI FINI DEL CALCOLO DELLA POTENZA MASSIMA DELLA CATENARIA.[4] .....	40
FIGURA 27 : SCHEMA APPROFONDITO DEL FUNZIONAMENTO DELLA GESTIONE ENERGETICA PER SOGLIA. S1 È SOGLIA <sub>1</sub> E S2 È SOGLIA <sub>2</sub> .....	42
FIGURA 28: SCHEMA DELLE GESTIONE ENERGETICA NON DIPENDENTE DALLA TENSIONE DI LINEA.....	43
FIGURA 29: MODELLIZZAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA DELLA LINEA BORDEAUX - LE VERDON SUR LA MER. LA SSE SONO RAPPRESENTATE COME NODI FISSI (QUADRATI BLU), GLI ALTRI SONO NODI MOBILI (PUNTI ARANCIONI) .....	45
FIGURA 30: GRAFICO DELLE POSIZIONI DEI TRENI IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE. IL TEMPO DI SIMULAZIONE TOTALE È DI 15852 S 46	

FIGURA 31 : SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA TRA LA SSE DI PAUILLAC E LA SSE DI LESPARRE (PRIMA OPZIONE)	47
FIGURA 32: SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA TRA LA SSE DI PAUILLAC E LA SSE DI SOUYLAX (SECONDA OPZIONE)	47
FIGURA 33 : SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA TRA LA SSE DI LABARDE E LA SSE DI SOULAX (TERZA OPZIONE) .	47
FIGURA 34: DETTAGLIO DELLA MODELLIZZAZIONE DELLA LINEA DI TEST, SONO EVIDENZIATI I CONTRIBUTI IN CORRENTE DI OGNUNA DELLE 8 SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE.....	49
FIGURA 35 : CORRENTI FORNITE DALLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN FUNZIONE DEL TEMPO. IN ROSSO LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 4 E IN BLU LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 5. ....	50
FIGURA 36: ALGORITMO DI MODIFICA DELLA MATRICE DELLE AMMETTENZE Y .....	51
FIGURA 37:ALGORITMO DI MODIFICA DEFINITIVO DELLA MATRICE DELLE AMMETTENZE Y.....	52
FIGURA 38: CORRENTI FORNITE DALLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN FUNZIONE DEL TEMPO. IN ROSSO LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 4 E IN BLU LA CORRENTE RELATIVA ALLA SSE 5.....	53
FIGURA 39 :POTENZE CARATTERISTICHE DELLA LINEA FERROVIARIA IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE. IN BLU LA POTENZA DOMANDATA DAL MOTORE E DAGLI AUSILIARI, IN VERDE LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA E IN ROSA LA POTENZA FORNITA DALLA CATENARIA. IL PUNTO ARANCIONE E IL PUNTO GIALLO SONO RISPETTIVAMENTE L'INIZIO E LA FINE DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA.....	55
FIGURA 40 : TENSIONE( PRIMO GRAFICO) E CORRENTE (SECONDO GRAFICO) DI UNA CELLA IN FUNZIONE DELLO STATO DI CARICA DURANTE UNA PROVA DI CARICA.....	57
FIGURA 41 : STRUTTURA PACCO BATTERIE FERROVIARIO, SONO EVIDENZIATI I RACK, I MODULI E LE SINGOLE CELLE. $N_{RACK}$ È IL NUMERO DI RACK IN PARALLELO .....	59
FIGURA 42: SCHEMA DELL'ALGORITMO DI REGOLAZIONE DELLA BATTERIA. IN BASE ALLA POTENZA DOMANDATA L'ALGORITMO VERIFICA CHE LA BATTERIA SIA SUFFICIENTE PER SODDISFARE LA DOMANDA. ....	60
FIGURA 43 : ENERGIA FORNITA DALLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE DI TRENI IBRIDATI .....	62
FIGURA 44 : IN ALTO A SINISTRA LA TENSIONE MINIMA, IN ALTO A DESTRA LA TENSIONE MASSIMA E IN BASSO LA TENSIONE MEDIA, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE DI TRENI IBRIDATI. ....	63
FIGURA 45 : PERCENTUALE DI POTENZA DISSIPATA DAL FRENO MECCANICO IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE DI TRENI IBRIDI.....	64
FIGURA 46 : PRIMO SCENARIO DI NON ELETTRIFICAZIONE SULLA LINEA BORDEAUX- LE VERDON SUR MER .....	65
FIGURA 47 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATA DAL TRENO. IN BASSO LA VELOCITÀ DEL TRENO, ENTRAMBI IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. LA LINEA ROSSA A SINISTRA È L'INIZIO DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA, LA LINEA A DESTRA LA FINE .....	66
FIGURA 48 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATA DAL TRENO. IN BASSO LA VELOCITÀ DEL TRENO, ENTRAMBI IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. LE DUE LINEE VIOLA RAPPRESENTANO I LIMITI DELLA NUOVA ZONA NON ELETTRIFICATA .....	67
FIGURA 49 : NELLA PARTE ALTRA LA POTENZA DOMANDATA DAL TRENO (BLU), LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (VERDE), LA POTENZA DELLA CATENARIA (ROSA) E LA POTENZA DISSIPATA DAI FRENI (GIALLO). IN BASSO L'SOC DELLA BATTERIA. IL TUTTO IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE.....	68
FIGURA 50 : TENSIONI AL PANTOGRAFO RELATIVE A 14 TRENI IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA .....	69
FIGURA 51: SoC DEL PACCO BATTERIA DI OGNI TRENO IN FUNZIONE DEL TEMPO DI SIMULAZIONE .....	69
FIGURA 52 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), IN CENTRO L'SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO VERDE INDICA L'INIZIO DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA, IL PUNTO VIOLA LA FINE. TRAGITTO DI ANDATA.....	71
FIGURA 53 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), IN CENTRO L'SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO GIALLO INDICA L'INIZIO DELLA ZONA NON ELETTRIFICATA, IL PUNTO ARANCIONE LA FINE. TRAGITTO DI RITORNO .....	71
FIGURA 54: SCENARI DI NON ELETTRIFICAZIONE REALI PER LA LINEA BORDEAUX- VERDON SUR MER. IN VERDE, NELLA PARTE SINISTRA DI OGNI SCENARIO, SONO INDICATE IN VERDI LE PERCENTUALI DI NON ELETTRIFICAZIONE SULLA LINEA.....	72

FIGURA 55 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), LA POTENZA FORNITA DALLA CATENARIA (ROSSO). IN CENTRO L'SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO ROSSO INDICA L'INIZIO DELLA PRIMA ZONA NON ELETRIFICATA, IL PUNTO GIALLO LA FINE. IL PUNTO VIOLA L'INIZIO DELLA SECONDA ED IL PUNTO VERDE LA FINE. IL PUNTO AZZURRO L'INIZIO DELL'ULTIMA. TRAGITTO DI ANDATA..	73
FIGURA 56 : IN ALTO IL PROFILO DI POTENZA DOMANDATO (IN BLU) E LA POTENZA FORNITA DALLA BATTERIA (IN VERDE), LA POTENZA FORNITA DALLA CATENARIA (ROSSO). IN CENTRO L'SOC DELLA BATTERIA E IN BASSO IL PROFILO DI VELOCITÀ DEL TRENO, IL TUTTO IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE CHILOMETRICA. IL PUNTO ROSSO INDICA LA FINE DELLA PRIMA ZONA NON ELETRIFICATA, IL PUNTO GIALLO L'INIZIO DELLA SECONDA. IL PUNTO VIOLA LA FINE. IL PUNTO VERDE L'INIZIO DELLA TERZA. IL PUNTO AZZURRO LA FINE. TRAGITTO DI RITORNO.	74
FIGURA 57 : SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE CADES.....	78
FIGURA 58: INTERFACCIA DEL SOFTWARE CADES DURANTE LA FASE DI CALCOLO. A SINISTRA L'ELENCO DEGLI INGRESSI. A DESTRA TUTTE LE USCITE DEL SISTEMA. IN QUESTO CASO SONO 0 PERCHÉ IL CALCOLO DEVE ANCORA ESSERE AVVIATO. ....	79
FIGURA 59 : INTERFACCIA DEL SOFTWARE CADES RELATIVA ALLA FASE DI OTTIMIZZAZIONE. IN PARTICOLARE SONO MOSTRATI I VINCOLI IMPOSTI SULLE USCITE .....	80

# Bibliografia

- [1] Francesco Morulo. Appunti di Sistemi di Trazione Elettrica. *Istituto Tecnico Superiore Mobilità Sostenibile Trasporto Ferroviario*, 2015
- [2] F. Schmid, C.J. Goodman. Overview of electric railway systems. *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 2012
- [3] M. Chymera e C.J. Goodman. Overview of electric railway systems and the calculation of train performance. *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 2012
- [4] Marie Poline. Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique. Application aux trains hybrides électriques et autonomes, 2018
- [5] Roger D. White. AC/DC railway electrification and protection. *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 2012
- [6] Morris Brenna, Federica Foadelli e Dario Zaninelli. *Electrical Railway Transportation Systems*, 2018
- [7] S. Hillmansen and R. Ellis. Electric railway traction systems and techniques for energy saving. *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 2012
- [8] Toby J. Nicholson. DC & AC traction motors. *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 2012
- [9] Andreas Steimel. *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply. Basics and Practical Experience* 2nd edition
- [10] Roger D. White. DC electrification supply system design. in *Lee reis dc*, 2013
- [11] Zhongbei Tian, Stuart Hillmansen, Clive Roberts, Paul Weston, Lei Chen, Ning Zhao, Shuai Su, Tingyu Xin
- [12] R.J. Hill, Y. Cai. An efficient computational technique for a rail traction power flow simulator incorporating track branches. *Transactions on Modelling and Simulation vol 5*, 1993
- [13] C.T. Tse, K.L. Chan, S.L. Ho, S.C. Chow, W.Y. Lo. Tracking techniques for dc traction loadflow, *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*, 1998
- [14] C.J. Goodman, Modelling and simulation.

- [15] Antonije R. Đorđević, Gradimir N. Božilović, and Dragan I. Olćan Teaching Fundamentals of Electrical Engineering: Nodal Analysis . *5th European Conference on Circuits and Systems for Communications (ECCSC'10)*, 2010
- [16] Goodman, C.J. and Siu, L.K. and Ho, T.K. A review of simulation models for railway systems. *International Conference on development in mass transit Systems*, 1998
- [17] C.L. Pires, S.I. Nabeta, J.R. Cardoso, ICG method applied to solve DC traction load flow including earthing models. *IET Electr. Power Appl.*, 2007 \_\_\_\_\_
- [18] B. Mellitt, B.Tech. D.I.C., C.Eng., M.I.E.E., C.J. Goodman, M.A., Ph.D., C.Eng., M.I.E.E., and R.I.M. Arthurton, B.Sc.(Eng.), C.Eng., M.I.E.E., M.I.Mech.E. Simulator for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways. *Digital simulation, Electric propulsion, Power systems, Railways, Rapid transit systems*, 1978 \_\_\_\_\_
- [19] Rabih A. Jabr , Fellow, IEEE, and Izudin Džafić .Solution of DC Railway Traction Power Flow Systems Including Limited Network Receptivity, *IEEE transactions on power systems*, 2018 \_\_\_\_\_
- [20] Usefulness of DC Power Flow for Active Power Flow Analysis with Flow Controlling Devices D. Van Hertern\*, J. Verboornen t, K. Purchala\*, R. Belrnans\*\*, W. L. KlingH \_\_\_\_\_
- [21] Chung-Wen Ho, Albert E. Ruehli, A. Brennan. The Modified Nodal Approach to Network Analysis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1975
- [22] Thomas Christen, Martin W. Carlen. Theory of Ragone plots, *ABB Corporate Research Ltd*, 2000.
- [23] Scott J. Moura, Jason B. Siegel, Donald J. Siegel, Hosam K. Fathy, Anna G. Stefanopoulou. Education on Vehicle Electrification: Battery Systems, Fuel Cells, and Hydrogen.
- [24] Emad Dlala and Antero Arkkio. General Formulation for the Newton-Raphson Method and the Fixed-Point Method in Finite-Element Programs, 2010
- [25] Richard Anstee, Member of UBC Vancouver Senate, Joint Faculties. The Newton-Raphson method, 2006