



Ricerca di Sistema elettrico

## Individuazione delle sollecitazioni e criterio di dimensionamento di un accumulatore al litio inserito in una stazione di conversione di una tranvia metropolitana

*M. Ceraolo, R. Giglioli, D. Poli*



Università di Pisa  
DESTEC

INDIVIDUAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI E CRITERIO DI DIMENSIONAMENTO DI UN ACCUMULATORE AL LITIO  
INSERITO IN UNA STAZIONE DI CONVERSIONE DI UNA TRANVIA METROPOLITANA

M. Ceraolo, R. Giglioli, D. Poli (Università di Pisa)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Sperimentazione e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Definizione delle sollecitazioni tipo e criteri di dimensionamento della capacità energetica di accumulatori al litio in piccoli sistemi elettrici per il miglioramento della gestione*"

Responsabile scientifico ENEA: Manlio Pasquali

Responsabile scientifico Università di Pisa – DESTEC: Romano Giglioli

Si ringrazia per la collaborazione prestata l'Ing. Michele Funaioli.

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 MODELLO DEL SISTEMA DI TRAZIONE .....	9
2.1.1 <i>Modellazione della Sottostazione</i> .....	11
2.1.2 <i>Modellazione della linea di contatto</i> .....	12
2.1.3 <i>Modellazione del tram</i> .....	13
2.1.4 <i>Sistema di accumulo elettrochimico</i> .....	26
3 CASO STUDIO ATB.....	29
3.1.1 <i>Caratteristiche del tracciato e traffico</i> .....	29
3.1.2 <i>Caratteristiche del sistema di alimentazione</i> .....	30
3.1.3 <i>Caratteristiche del convoglio tramviario</i> .....	32
3.1.4 <i>Profili Orari e Tipi di servizio</i> .....	35
4 SIMULAZIONE DELLO STATO ATTUALE E VALIDAZIONE DEL SIMULATORE. ....	40
4.1.1 <i>Aspetti Principali</i> .....	40
4.1.2 <i>Risultati di Simulazione</i> .....	42
4.1.3 <i>Validazione del Simulatore</i> .....	44
5 SCELTA DEL SISTEMA DI ACCUMULO .....	46
5.1.1 <i>Tipo di batteria e scelta della sottostazione sperimentale</i> .....	46
5.1.2 <i>Dimensionamento di massima dell'accumulo</i> .....	47
5.1.3 <i>Scelta dello schema di inserzione</i> .....	49
5.2 RISULTATI DI SIMULAZIONE (RECUPERO MODULATO).....	50
5.2.1 <i>Recupero in linea con modulazione (metodo con sola valenza teorica)</i> .....	51
5.2.2 <i>Recupero in linea con modulazione e sistema di accumulo associato</i> .....	54
5.3 STIMA DEL RECUPERO ENERGETICO IN PRESENZA DI BATTERIA CON GLI ATTUALI VEICOLI .....	58
6 STIMA DEL RECUPERO CON PIÙ SISTEMI DI ACCUMULO. ....	61
6.1 INTRODUZIONE .....	61
6.2 RISULTATI DI SIMULAZIONE.....	62
6.2.1 <i>Recupero non modulato e doppio sistema di accumulo.</i> .....	62
6.2.2 <i>Recupero modulato e doppio sistema di accumulo.</i> .....	63
7 CONCLUSIONI.....	64
8 APPENDICE.....	66
8.1 DETTAGLI DI MODELLAZIONE DEL SISTEMA .....	66
8.1.1 <i>Generalità sulle simulazioni e il software utilizzato.</i> .....	66
8.1.2 <i>Dettagli di modellazione della Linea di Alimentazione.</i> .....	68
8.1.3 <i>Dettagli di modellazione del Pilota</i> .....	76
8.2 CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO.....	78
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	81

## Sommario

Nella gestione energetica di una tranvia, in relazione alla frequenza delle fermate e delle partenze e del profilo altimetrico del percorso, la possibilità di recuperare l'energia cinetica dei tram durante le fasi di frenatura e di riutilizzarla, *just in time*, nei tram in trazione oppure di immagazzinarla in sistemi di accumulo per renderla disponibile in tempi successivi, porta un vantaggio energetico ed economico di rilievo.

L'attività sviluppata è consistita nel definire le sollecitazioni a cui un sistema di accumulo elettrochimico, di tipo gestionale, è sottoposto durante il suo funzionamento in una sottostazione di alimentazione di una rete tranviaria.

E' stata simulata la struttura elettrica della tranvia e dei tram, nonché la gestione della movimentazione tramite le effettive tracce orarie. E' stata inoltre definita una logica di gestione dello stato di carica degli accumulatori e un criterio di dimensionamento della capacità energetica di accumulo.

Per una verifica fattuale di quanto esposto è stato preso in esame il sistema tramviario : "Tramvia delle Valli Bergamasche" di proprietà della TEB S.p.A., realizzato circa 10 anni fa e che dispone di treni con frenatura elettrica a recupero sulla rete di trazione.

Nel report sono descritte le principali caratteristiche del sistema tramviario analizzato, le tecniche di modellazione utilizzate, i criteri di scelta dell'accumulo, nonché le varie simulazioni effettuate sull'intera rete. Le simulazioni effettuate sono relative ai casi di semplice frenatura elettrica senza possibilità di recupero e a quelli di frenatura elettrica con possibilità di recupero in linea con la presenza o meno di sistemi di accumulo in una sottostazione di alimentazione, in modo da poter effettuare un confronto tra le diverse quantità di energia erogate dalle sottostazioni di alimentazione nei diversi casi.

I risultati di simulazione riportati sono validi, anche, per effettuare delle stime di massima dei miglioramenti di efficienza energetica che un eventuale installazione di un sistema di accumulo può portare su un sistema tramviario gestito attualmente con il solo recupero in linea.

Il software di simulazione utilizzato è stato Dymola 2013.

## 1 Introduzione

Il traffico cittadino oggi è molto spesso congestionato a causa delle grandi quantità di veicoli rispetto allo spazio disponibile nelle città. Inoltre, il trasporto su strada contribuisce in percentuale non trascurabile all'inquinamento urbano e all'immissione di gas a effetto serra nell'atmosfera. A seguito di una politica mondiale incentrata sulla riduzione delle emissioni e del risparmio energetico, una soluzione che è stata recentemente incentivata in ambiente urbano è l'uso delle tranvie elettriche. Tal sistema di trasporto riduce significativamente lo spazio occupato per persona trasportata, nonché le emissioni di gas a effetto serra.

Questi, si riducono per effetto di varie cause, tra cui la minore massa spostata per passeggero, e la maggiore efficienza *well to wheel* del percorso tra la fonte di energia primaria (ad esempio un combustibile fossile) e le ruote, in confronto all'uso di veicoli con propulsione con motori a combustione interna.

L'utilizzo degli azionamenti elettrici per la trazione dei rotabili ha permesso negli ultimi anni, soprattutto grazie alla rivoluzione tecnologica dei componenti elettronici, di avere la possibilità oltre che della frenatura meccanica anche della frenatura elettrica dei convogli. Come noto infatti, le macchine elettriche sono macchine completamente reversibili, ossia possono funzionare indistintamente da motore o da generatore-freno se opportunamente controllate. Come facilmente intuibile, ciò si sposa bene con tutti quei sistemi, inclusi i sistemi tramviari, in cui sono richieste fasi di accelerazioni e/o frenature frequenti, in quanto la frenatura elettrica permette il cosiddetto "recupero dell'energia". In pratica, durante le fasi di accelerazione l'energia elettrica viene trasformata in energia cinetica, parte della quale può però essere recuperata nel corso della fase di frenatura. Questa energia recuperata oggi viene spesso convertita, tutta o in parte, in calore tramite una resistenza di frenatura e finisce quindi dispersa e inutilizzata. In alcune applicazioni particolari, tipo i trasporti, può, invece, essere assolutamente conveniente riutilizzare questa energia di frenatura, con conseguente aumento dell'efficienza energetica del sistema complessivo. Specialmente in sistemi in cui i valori di energia cinetica sono elevati e si ha la presenza di moto vario la frenatura elettrica a recupero permette non solo una riduzione dei dispendi energetici, ma garantisce spesso anche buoni e incontestabili vantaggi economici.

Nella pratica attuale, i sistemi possibili di gestione della frenatura elettrica sono sostanzialmente tre:

### **1. Frenatura elettrica senza recupero dell'energia**

In questo caso, la macchina elettrica garantisce la frenatura del convoglio, ma l'energia elettrica erogata dalla stessa in fase di frenatura viene dissipata in apposite resistenze di frenatura, perdendo perciò la potenzialità di tal energia associate ad un eventuale suo riutilizzo. Nell'ambito dei trasporti tramviari tali resistenze sono generalmente installate a bordo del rotabile.

## **2. Frenatura elettrica con recupero dell'energia in linea**

Riferendoci ad un contesto tramviario, questa soluzione permette un recupero dell'energia cinetica del rotabile, ogni qualvolta sulla linea di alimentazione sia presente un eventuale altro convoglio in grado di assorbire tale energia. In pratica durante la frenatura, la macchina elettrica trasforma l'energia cinetica del convoglio in energia elettrica e la riversa sulla linea di contatto.

In questo caso ovviamente, non essendo per ipotesi presenti sistemi di accumulo, per non avere problemi, ad esempio di sovratensioni, dovrà essere garantita la presenza di un altro convoglio in fase di assorbimento in modo da utilizzare tal potenza *just in time*. Nel caso, nessun convoglio sia presente, oppure non sia in grado di recepire tutta la potenza erogata dalla macchina elettrica, ovviamente la quota parte non utilizzata di tal potenza dovrà essere dissipata su apposite resistenze di frenatura, perdendo così la possibilità di un recupero completo. E' d'obbligo perciò prevedere anche in questo caso un sistema di dissipazione a bordo tram, anche se il sistema in se e per se prevede la possibilità di recupero in frenata.

Si può già anticipare che il metodo di recupero può o meno prevedere una modulazione della potenza inviata in linea. Nel caso del sistema tramviario in oggetto i tram sono configurati per l'utilizzo di recupero senza modulazione. Nel proseguo della trattazione saranno forniti comunque tutti gli aspetti peculiari dei due metodi di recupero.

## **3. Frenatura elettrica con recupero in linea e associato sistema di accumulo**

In questa situazione, oltre alla possibilità di avere un recupero *just in time* da parte di un eventuale altro convoglio in trazione la quota parte di energia non utilizzata non viene dissipata su resistenze, ma viene accumulata in un opportuno sistema di accumulo. Tal energia accumulata sarà poi utilizzata in successivi momenti quando sulla linea sarà presente un convoglio in grado di assorbirla, oppure potrà in caso essere utilizzata per i servizi di stazione o altri servizi ausiliari. Per quanto riguarda il sistema di accumulo in questo caso si prende in esame un sistema di accumulo di tipo elettrochimico, anche se sul mercato si stanno affacciando, ormai da diversi anni, altre possibilità di accumulo come ad esempio gli accumulatori elettrostatici (supercap). Ovviamente anche in questo caso dovrà essere garantita la presenza di opportuni sistemi di dissipazione dell'energia di frenatura nel caso si abbiano temporanei mal funzionamenti del sistema di accumulo il recupero debba essere fermato per ulteriori motivi (ad esempio il raggiungimento del limite di tensione massima ammissibile sulla linea).

Nei sistemi tranviari più semplici e comuni, i punti di alimentazione (sottostazioni) non permettono l'inversione del flusso di corrente, quindi come si capisce bene da quanto descritto sopra, in generale, l'energia di frenatura di un tram può essere recuperata solo in caso ci sono altri tram capaci di assorbire quell'energia e qualsiasi *surplus* di quest'ultima deve essere necessariamente tagliata (e quindi persa per dissipazione in calore).

Nel caso invece, in cui in uno o più punti della rete di alimentazione, tipicamente in prossimità di una sottostazione sia presente una certa capacità di stoccaggio, quest'ultima può assorbire e immagazzinare

energia durante la frenata di qualche tram, e rinviarla al sistema di trazione, quando c'è carico sufficiente sulla linea. Questa soluzione promette di aumentare la quantità di energia recuperata in modo significativo. Chiaramente, la valutazione della quantità di recupero dell'energia cinetica in frenata richiede uno strumento di simulazione che è in grado di simulare le equazioni di rete, le equazioni dinamiche del veicolo, l'autista, e le diverse fasi di funzionamento, come ad esempio accelerazione, marcia a velocità costante, coasting (quando presente), e frenatura.

Ovviamente, per una visione complessiva e realistica del problema devono essere prese in considerazione le diverse fasi della giornata, con differenti frequenze di viaggio, ed eventualmente la natura stocastica di alcune parti del viaggio, come in genere il tempo trascorso presso le fermate.

Il sistema di stoccaggio nella sottostazione può essere installato con l'interposizione di un convertitore DC / DC, o collegato direttamente alla sbarra DC. Questo documento si concentra sull'installazione del sistema di accumulo gestionale, direttamente presso la sbarra, dimostrandone un uso molto tecnico ed economico.

In una visione del tutto generale, l'installazione del sistema di accumulo può avvenire direttamente a bordo del veicolo o all'interno di una delle sottostazioni. Chiaramente, nel primo caso i vantaggi energetici ottenibili sono maggiori in quanto si riesce a recuperare buona parte dell'energia di frenatura non avendo la rete di contatto come intermezzo tra il sistema di accumulo e la macchina elettrica. Dall'altro lato però questa soluzione richiede un'installazione del sistema di accumulo su ogni veicolo tranviario e quindi una moltiplicazione dei costi proporzionalmente al numero di veicoli. Inoltre, come facilmente intuibile, l'installazione dell'accumulo direttamente a bordo tram causa un appesantimento svantaggioso del convoglio stesso. Nel secondo caso invece, tra l'elemento elettrico reversibile a bordo tram (macchina elettrica) e il sistema di accumulo è presente la rete di alimentazione che chiaramente causa perdite intrinseche di potenza e quindi energie recuperate inferiori. Inoltre, se la distanza tra il sistema di accumulo e il tram in frenatura è elevata a causa della resistenze longitudinali di linea il recupero potrebbe essere spesso bloccato a causa del raggiungimento del limite di tensione massima ammissibile.

Dall'altro lato però tal soluzione garantisce di non dover installare a bordo tram ulteriore peso da trasportare e soprattutto richiede l'installazione di un solo sistema di accumulo o comunque di un numero molto limitato.

Per i motivi suddetti, la soluzione che è stata presa in considerazione e portata avanti in questo lavoro è l'installazione di un sistema di stoccaggio gestionale direttamente a terra in una sottostazione piuttosto baricentrica per il sistema complessivo, in modo da garantire una massimizzazione dei vantaggi energetici.

Perciò, anche in un'ottica di risparmio energetico l'idea è quella che l'energia cinetica dei convogli in frenatura possa essere immessa direttamente nella linea di contatto per alimentare i convogli in accelerazione e la eventuale parte eccedente possa essere, invece che dissipata, accumulata in sistemi di accumulo elettrochimici (batterie) o elettrostatici (SC) disposti nelle sottostazioni elettriche di alimentazione per essere resa disponibile in fasi successive in cui uno o più convogli siano in accelerazione. I vantaggi conseguibili sono rappresentati dal recupero di energia, con conseguente risparmio energetico e dalla riduzione dei picchi di potenza richiesti al sistema di alimentazione. Dal punto di vista economico, l'installazione di sistemi di accumulo può esser spessa vista come un'ulteriore voce di spesa nel bilancio complessivo dell'erogazione del servizio. In realtà spesso l'esborso di denaro asservito all'installazione del

sistema di accumulo, se ben dimensionato, è recuperabile in breve termine grazie ai vantaggi economici che quest'ultimo permette nel tempo, garantendo un possibile riutilizzo dell'energia di frenatura che altrimenti andrebbe persa. Ovviamente, non in tutti i casi i vantaggi economici sono reali, ma in tutte quelle applicazioni, come effettivamente i sistemi tramviari, in cui l'energia di frenatura è una quota abbastanza rilevante l'installazione di un sistema di accumulo, in termini economici, potrebbe effettivamente fare la differenza (sicuramente la fa in termini di bilancio energetico complessivo del sistema).

## 2 Modello del Sistema di Trazione

In questo capitolo, saranno presentati i principali aspetti riguardanti la modellazione del sistema tranviario presa a riferimento. Chiaramente, per rendere la trattazione snella e ordinata di seguito verranno riportate solamente le principali ipotesi e caratteristiche del modello, mentre per quanto riguarda le informazioni sullo strumento di simulazione e maggiori dettagli di modellazione si rimanda all'appendice in calce al seguente elaborato.

Essendo la tranvia un sistema complesso, il primo passo per una modellazione opportuna e consona agli obiettivi del lavoro è quello di focalizzare bene il target. In questo lavoro l'interesse principale ricade su valori di tipo energetico ed elettrico a livello globale, perciò la modellazione dei componenti principali che è stata sviluppata non è connessa a modelli fisici reali e super particolareggiati, ma bensì a opportuni modelli funzionali che garantiscono un comportamento globale a livello energetico congruo a quello degli elementi reali del sistema.

Ovviamente, il sistema complesso per poter essere ben studiato richiede di essere suddiviso in vari sistemi di dimensioni più ridotte, facilmente più modellabili. In seguito tali elementi, connessi opportunamente tra loro faranno sì che il modello complessivo sviluppato rispecchi in maniera abbastanza affidabile il funzionamento complessivo del sistema reale.

Una tranvia in genere ha diverse stazioni di fermata (connesse al carico e scarico passeggeri) e sottostazioni elettriche (connesse all'alimentazione dei rotabili). Una versione molto semplice del modello complessivo della tramvia è mostrata in Figura 1. Per garantire una buona visibilità del modello la figura riporta il caso in cui si hanno solamente quattro sottostazioni di alimentazione e quattro tram in linea. Chiaramente il modello complessivo sviluppato garantisce la presenza delle dieci SSE presenti lungo il tracciato coperto dalla tranvia e la possibilità di una gestione contemporanea di dieci tram in linea; condizione connessa al numero massimo di tram presenti nelle ore di punta, indicateci da TEB S.p.A..

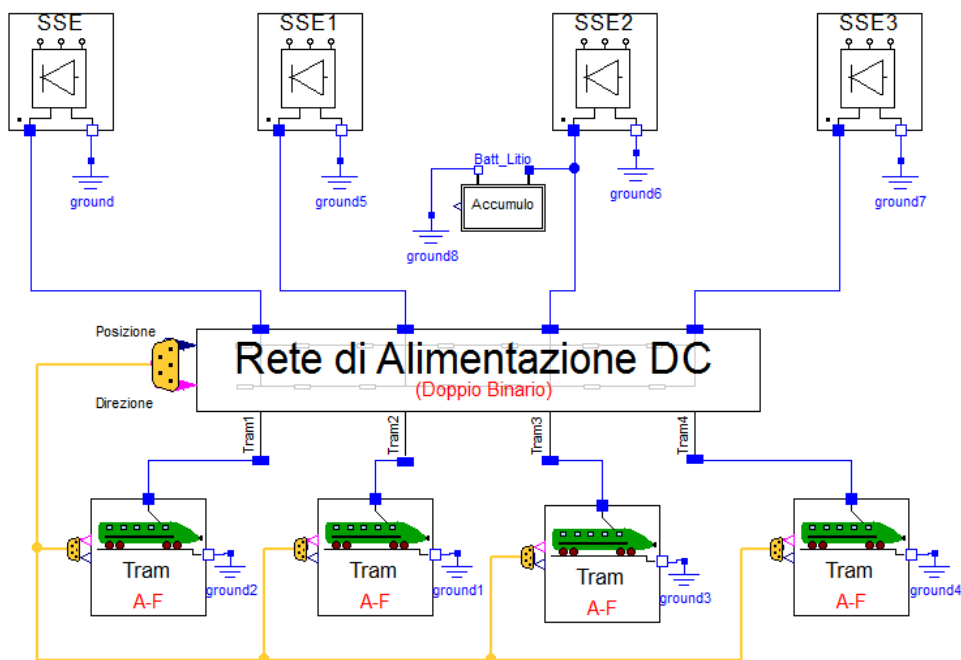


Figura 1: Interfaccia semi-completa del simulatore tranviario realizzato.

Si fa presente fin da ora, che nelle simulazioni che saranno presentate in seguito si farà sempre riferimento a un modello complessivo con 10 sottostazioni e un numero opportuno dei tram in servizio a seconda della fascia oraria simulata (feriale, festivo scolastico, festivo non scolastico).

Lo schema sopra, risulta utile ai fini della presentazione dei principali sottosistemi in cui il sistema tranviario complessivo è stato suddiviso, che come si può notare sono:

- **Sottostazione Elettrica**
- **Rete di Alimentazione**
- **Convoglio tranviario (con pilota incorporato)**
- **Sistema di accumulo gestionale (batteria al litio)**

In Figura 1 le linee blu rappresentano i collegamenti elettrici tra i vari sottosistemi, mentre quelli gialli rappresentano un bus di informazione che trasporta le informazioni chiave di ogni tram (posizione e direzione) alla linea di contatto per la gestione ottimale delle resistenze di linea durante il moto dei tram e delle connessioni dei vari pantografi alle opportune sezioni sulla linea di contatto.

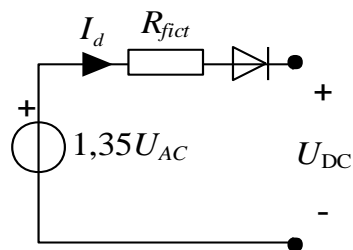
In questo caso, come si vede, il sistema di accumulo è installato in corrispondenza della SSE2 e quest'ultimo può essere abilitato o non in funzione del tipo di simulazione necessaria.

### 2.1.1 Modellazione della Sottostazione

La sottostazione elettrica, in genere definita dall'acronimo SSE, come noto è in prima approssimazione definibile come la sorgente di energia da cui il tram assorbe energia elettrica necessaria per il suo moto. Le SSE stesse, sono ovviamente poi interfacciate con la rete di distribuzione alternata trifase in M.T. (in genere a 15-20kV), che apportano l'energia necessaria alle SSE proveniente dalle centrali di produzione di energia elettrica a monte.

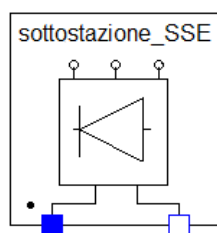
Nella SSE oltre a un eventuale trasformatore a monte per l'abbassamento della tensione trifase a 15kV, si ha un ponte di raddrizzamento a diodi per ottenere in uscita dalla sottostazione una tensione continua necessaria per l'alimentazione dei tram. Le sottostazioni di alimentazione delle linee tranviarie sono in genere basate su ponti a diodi a 12 impulsi.

Poiché la valutazione degli effetti delle armoniche è fuori dallo scopo di questo studio, la modellazione prende in considerazione solo la componente continua di questa sorgente. Per tal motivo, per ogni sottostazione è stato utilizzato il noto modello equivalente C.C. di Figura 2, in cui  $R_{fict}$  è una resistenza fittizia che simula la caduta di tensione dovuta al fenomeno commutazione non ideale a causa delle induttanze a monte del convertitore:



**Figura 2: Modello equivalente C.C. del raddrizzatore a diodi**

L'icona con cui sono riconoscibili le SSE nel modello completo è la seguente:



**Figura 3: Icona della sottostazione (SSE)**

### 2.1.2 Modellazione della linea di contatto

Come sarà descritto in seguito, in quest'applicazione l'alimentazione è di tipo bilaterale per tutte le SSE tranne che per la prima stazione a Bergamo per la quale è prevista un'alimentazione monolaterale.

Per dovere di chiarezza si ricorda che un'alimentazione bilaterale prevede che un generico convoglio tranviario durante il suo moto sia alimentato contemporaneamente dalle sottostazioni (SSE) poste agli estremi della tratta che il veicolo sta percorrendo:

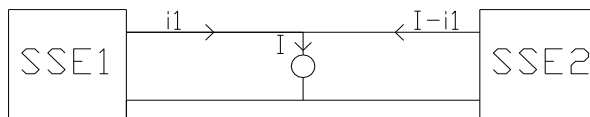


Figura 4: Alimentazione bilaterale

Mentre nel caso di alimentazione monolaterale il convoglio è alimentato in ogni istante da una sola sottostazione (SSE) come in figura:

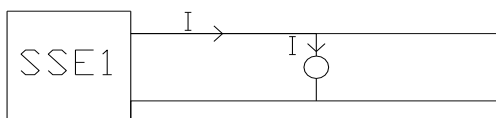


Figura 5: Alimentazione monolaterale

Per quanto riguarda la modellazione del sistema di contatto in cavo si deve notare che poiché durante la marcia i tram si spostano lungo la linea di contatto, la linea in questo caso è un sistema tempo-variante. La resistenze longitudinali di linea (viste dalle due SSE alimentanti) alla destra e alla sinistra del tram variano il loro valore nel tempo via via che il tram si sposta lungo il percorso. Inoltre, quando un treno si muove da una sezione SSE-SSE ad un'altra (ad esempio passando da SSE1-SSE2 a SSE2-SSE3) la topologia della linea di contatto viene modificata, in quanto il pantografo deve fisicamente connettersi all'opportuna sezione SSE-SSE. Sotto è riportata l'icona del sistema della rete di alimentazione con cui è possibile riconoscerla all'interno di modelli più complessi, mentre si rimanda all'appendice in calce alla presente trattazione per ottenere eventuali altri dettagli di interesse:

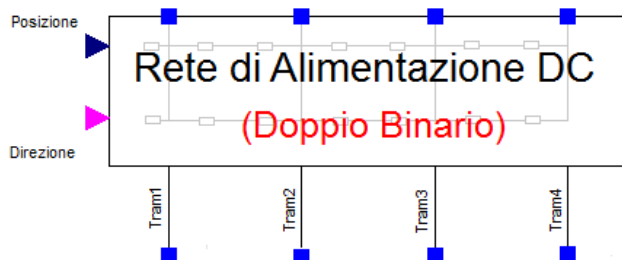


Figura 6: Icona della Rete di alimentazione

Come si può notare la linea di contatto sfrutta le informazioni di posizione e di direzione ricevute dai vari tram connessi alla rete (ingresso al lato sinistro della sistema in Figura 6), per calcolare in ogni istante i valori di tutte le resistenze variabili nel tempo interne al modello (chiaramente funzione della posizione e direzione dei tram).

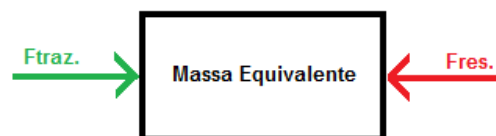
Infine, si può osservare come nella parte superiore dell'icona si hanno le connessioni elettriche alle varie sottostazioni disposte lungo il percorso, mentre nella parte inferiore si hanno le connessioni ai pantografi dei vari tram connessi alla linea. E' chiaro, che nel caso del modello complessivo nella parte superiore si hanno dieci pin, pari al numero di SSE, mentre nella parte inferiore si hanno un numero di pin pari al numero di tram in linea che si vuol simulare (funzione del tipo di servizio)

### 2.1.3 Modellazione del tram

La modellazione del tram richiede la modellazione del sistema di propulsione del tram , le resistenze al suo movimento e il comportamento del conducente .

Con gli obiettivi preposti, la modellazione del convoglio è stata affrontata semplicemente sviluppando un modello traslazionale del veicolo. Si è appunto ipotizzato il tram un oggetto con una certa massa ( $M_{eq}$ ) sottoposto a una forza attiva di trazione (o frenatura), fornita dall'output del componente pilota (che vedremo in seguito), e da una forza passiva resistente che modella gli attriti che il veicolo trova durante il suo moto, di cui sarà parlato sotto.

Di seguito è riportato un disegno per chiarire meglio:



**Figura 7: Modellazione del tram**

Sotto l'ipotesi di considerare il tram come un punto materiale l'equazione che regola il moto, come noto, è la seguente:

$$F_{traz.} - F_{res.} = m_{eq} \frac{dv}{dt}$$

dove:

$F_{traz.}$  → Forza attiva fornita dai motori elettrici delle ruote motrici, con opportuni vincoli

$F_{res.}$  → Forza passiva che il veicolo incontra durante il suo moto dovuta a vari tipi di attrito

$M_{eq}$  → massa equivalente del veicolo che tiene conto anche delle masse rotanti

$dv/dt$  → accelerazione del veicolo in ogni istante

La forza resistente complessiva che il tram incontra durante il suo moto immerso in aria, considerando anche il profilo altimetrico è stata modellata come segue:

$$F_{res} = aP + \frac{1}{2} \rho C_x S V^2 + mg \cdot \tan(x)$$

L'espressione risulta valida nell'ipotesi che gli angoli di salita non siano molto grandi (come effettivamente risulta dai documenti forniti dal gestore).

Nel modello Dymola sviluppato, la forza resistente è rappresentato dal seguente componente:

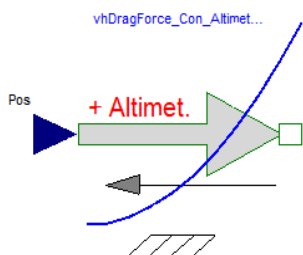


Figura 8: Icona della forza resistente

Per quanto riguarda la forza propulsiva (o frenante) essa è fornita dal componente Pilota (Figura 12). Quest'ultimo tiene di conto di come viene gestito nella realtà lo sforzo di trazione e di frenatura di un semplice convoglio tramviario. Come noto, infatti, l'azione motrice applicata al convoglio è, fino alla velocità base, costante e limitata da problemi di aderenza, mentre oltre la velocità base, essa segue un andamento decrescente con la velocità e la limitazione è introdotta dalla potenza massima dell'azionamento elettrico associato.

La classica curva di trazione è del tipo:

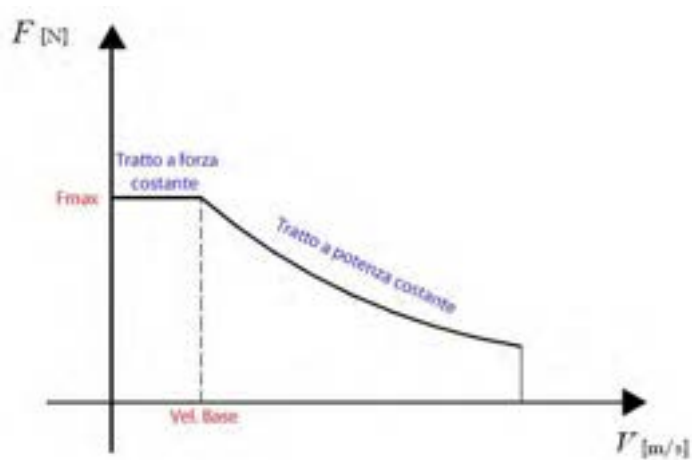


Figura 9: Curva dello sforzo di trazione

Si ricorda velocemente che il problema dell'aderenza è legato al fatto di dover mantenere alle ruote un moto di puro rotolamento per far sì che nelle condizioni di minima aderenza (bagnato-neve) il convoglio

riesca comunque ad avviarsi senza avere strisciamenti della coppia ruota-sede di rotolamento. Nel caso di puro rotolamento il punto di contatto deve essere sempre a velocità nulla.

Come è noto, il corretto accoppiamento ruota-rotaia di puro rotolamento si ottiene se la forza tangenziale a cui è sottoposta la ruota considerata non supera il valore massimo ammissibile:

$$F_{\max} = f \cdot P$$

dove P è il peso gravante su quella ruota e  $f$  è il coefficiente di aderenza, che in prima approssimazione può essere ritenuto costante.

In realtà il coefficiente di aderenza dipende anche dalla velocità e perciò via via che il tram si avvia lo sforzo massimo al cerchione dovrebbe essere leggermente decrescente e non proprio costante, ma in prima approssimazione tal fenomeno può essere tranquillamente trascurato.

Nel caso della frenatura del convoglio l'azione frenante segue le stesse regole della trazione, però verrà incontrato prima il tratto a potenza costante e successivamente quello a forza costante:

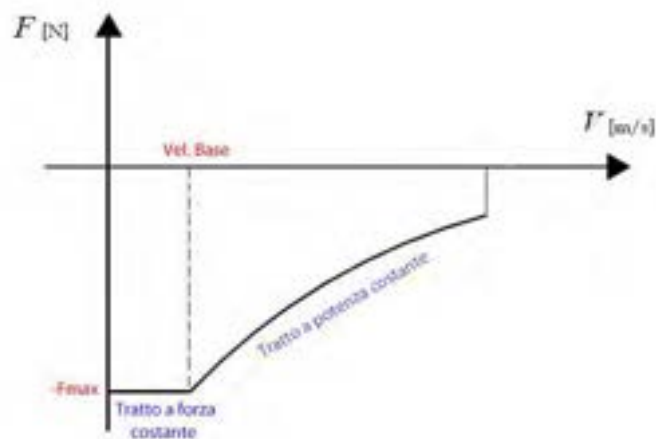


Figura 10: Curva dello sforzo in fase di frenatura

Infine, è importante ricordare che fino alla velocità base la potenza cresce linearmente con la velocità (essendo la forza di trazione o di frenatura costante), mentre oltre la velocità base la potenza resta costante in quanto, anche se la velocità continua a crescere, la coppia decresce. La figura sotto mostra il noto andamento:

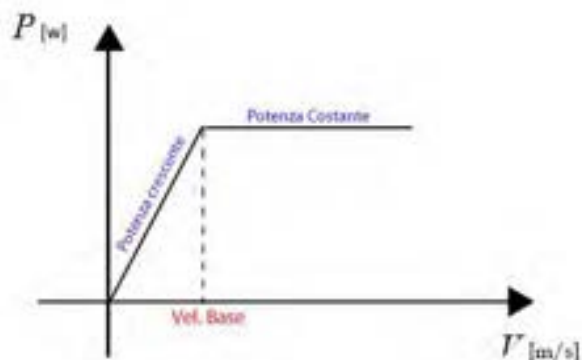


Figura 11: Andamento della potenza prima e dopo la velocità base

L'ideale consiste nell'aver un'erogazione di potenza costante in un ampio campo di velocità. In tal modo si sfrutta al meglio la potenza dei macchinari.

Fondamentalmente, perciò il motore elettrico è modellato algebricamente tramite l'uscita di forza (positiva o negativa) fornita dal pilota stesso.

Si fa ulteriormente notare che per gli obiettivi di questo lavoro è inutile modellare perfettamente l'azionamento elettrico sviluppando ad esempio un modello per l'inverter e per il motore, in quanto quello che sostanzialmente e effettivamente interessa, ai fini della buona riuscita degli obiettivi delle simulazioni in oggetto, è capire la potenza che trasferisce l'azionamento alle ruote durante il moto del tram e viceversa. Inoltre, si fa presente che l'arco temporale di simulazione nel caso in esame non è di pochi secondi ma dell'ordine di diversi minuti e perciò modelli precisi dell'inverter mal si prestano agli scopi del presente lavoro.

Poiché lo schema complessivo realizzato per la modellazione del tram permette di discutere di alcuni importanti aspetti della modellazione effettuata si riporta sotto:

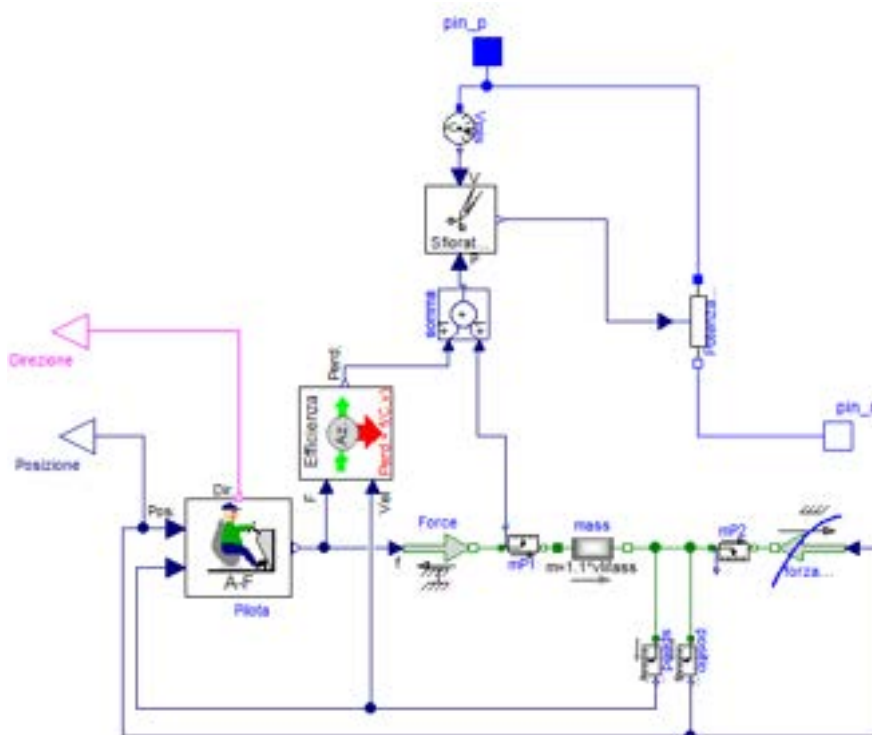


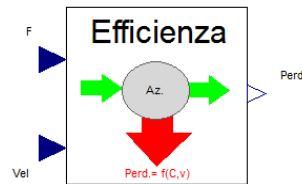
Figura 12: Modello con pilota completo del tram implementato su Dymola

Due argomenti abbastanza interessanti su cui è necessario spendere alcune considerazioni riguardano il sistema di modellazione dell'**efficienza dell'azionamento** e la modellazione dello **sfioratore di potenza**.

Come noto nel caso reale all'interno della catena tra ruote e pantografo si ha la presenza di vari effetti dissipativi che causano un assorbimento di energia dalla linea di contatto da cui il tram si alimenta, superiore rispetto all'energia necessaria alla pura trazione. In modo analogo, anche durante le fasi di frenatura tal fenomeni dissipativi fanno sì che l'energia disponibile alla macchina elettrica sia inferiore

rispetto all'energia al cerchione. Per tali motivi perciò, all'interno del modello è stato introdotto un elemento sviluppato *ad hoc* proprio per gestire e calcolare le perdite globali che si hanno nei principali componenti fisici posti all'interno del tram.

Esso è rappresentato nella Figura 12 dalla seguente icona:



**Figura 13: Componente di gestione delle perdite tra cerchione e pantografo**

Come si può vedere, il componente riceve come grandezze di input la forza fornita dal pilota e la velocità del convoglio stesso. In uscita invece, fornisce le perdite dell'intera catena cerchione-pantografo. Come noto infatti, l'efficienza complessiva del sistema è funzione sia dalla forza (o coppia) sia della velocità. Tenendo presente gli obiettivi preposti, le perdite sono calcolate semplicemente secondo la relazione sotto riportata, che tiene conto delle principali relazioni tra le dissipazioni energetiche presenti nel sistema e le grandezze caratteristiche del sistema stesso (forza e velocità):

$$Perdite = a + b C^2 + cV^2 + d(CV)^2$$

Dove:

**C** → Forza o coppia alle ruote [N]

**V** → Velocità del convoglio alle ruote [m/s]

**a,b,c,d** → Costanti scelte in maniera empirica

Come noto, le perdite meccaniche collegate al riduttore e agli altri eventuali attriti meccanici all'interno del tram possono essere modellate in prima approssimazione, con un termine variabile con il quadrato della velocità a cui è aggiunto un termine costante. Anche le perdite nel ferro della macchina elettrica, ossia le perdite per correnti parassite e per isteresi, possono essere in prima analisi, supposte proporzionali al quadrato della velocità.

Nella formula sopra, tutto ciò si ritrova semplicemente nei termini  $a$  e  $cV^2$ , il primo costante e il secondo proporzionale al quadrato della velocità, che tengono di conto proprio dei fenomeni dissipativi collegati alle perdite meccaniche e alle perdite nel ferro dell'azionamento elettrico.

Come sappiamo invece, le perdite per effetto Joule all'interno della macchina elettrica sono principalmente collegate al quadrato della corrente. Per azionamenti a flusso costante però si può supporre senza commettere grandi errori che la coppia sia proporzionale alla corrente per cui le perdite per effetto Joule della macchina possono essere in prima approssimazione ritenute proporzionali al quadrato della coppia. Tal fenomeno è descritto nella formula sopra dal termine  $bC^2$ , che come si osserva è proporzionale al

quadrato della coppia. Infine l'ultimo termine  $d(CV)^2$ , funzione sia della coppia che della velocità, è un termine di aggiustamento che permette di ottenere delle curve di rendimento chiuse.

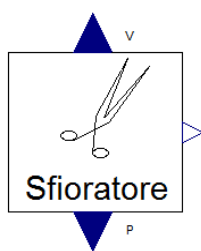
Con i dati in possesso attualmente, una modellazione del tipo sopra è più che sufficiente per eseguire delle simulazioni abbastanza precise. In realtà, per maggior precisione nella formula sopra andrebbe inserito anche un fattore proporzionale alla sola coppia, legato alle perdite nell'inverter (essendo quest'ultime legate al modulo della corrente lato A.C.), e un fattore proporzionale alla sola velocità in quanto le perdite per isteresi non sono proporzionali al quadrato della velocità, ma solo alla sola velocità.

Ovviamente, come si nota dallo schema generale riportato precedentemente (Figura 12), il valore delle perdite ottenute dal componente in esame sono sommate direttamente alla potenza richiesta per la trazione del convoglio tranviario o alla potenza recuperata in fase di frenatura. E' chiaro che nel caso in cui il convoglio si trovi in fase di trazione la potenza richiesta per convenzione è positiva, per cui le perdite si sommano con segno concorde, garantendo una richiesta di potenza alla linea di alimentazione superiore a quella necessaria alla pura trazione. Nel caso invece di convoglio frenante, la potenza di frenatura recuperata è negativa, perciò le perdite vanno a sommarsi a quest'ultima con segno discorde, riducendo la potenza disponibile ai morsetti della macchina elettrica.

Ciò è chiaramente congruo con la realtà, avendo delle dissipazioni energetiche tra cerchione e pantografo sia nel caso di flusso di potenza dalla linea di contatto al cerchione (trazione) sia nel caso opposto (frenatura).

Ponendo l'attenzione sui parametri a, b, c, d, quest'ultimi sono stimati in maniera empirica in base ai dati di rendimento forniti dal gestore della tranvia stessa, in modo da ottenere una taratura del modello complessivo delle perdite che garantisca dei risultati in linea con quelli reali.

Per quanto riguarda, invece, il sotto-componente denominato "sfioratore" indicato con la seguente icona:



**Figura 14: Icona dello sfioratore di potenza "con modulazione"**

è il sotto-componente che modella quello che nella realtà fisica succede quando il tram è in frenatura e la rete non è in grado di ricevere la potenza erogata da quest'ultimo.

Come già descritto negli aspetti introduttivi della trattazione, nel momento in cui un qualsiasi convoglio che prevede la frenatura elettrica, invia potenza verso la rete e non c'è nessun altro sistema che può accumulare tal potenza o sfruttarla *justing time* la tensione sulla linea DC comincia a crescere fino a portarsi a valori ben oltre il limite massimo, che nel caso di linee in continua è del 20% oltre la tensione nominale.

Come noto l'elemento che gestisce i flussi di potenza di frenatura verso la rete è il cosiddetto “**sfiatore di potenza**”.

Durante lo sviluppo del lavoro sono stati modellati due tipi di sfioratori, ognuno dei quali utilizza uno dei due possibili sistemi di sfioramento della potenza di frenatura:

### **1. Sfiatore non modulato**

In questo caso durante le fasi di frenatura, la potenza di frenatura disponibile alla macchina elettrica viene completamente inviata sulla linea di alimentazione senza previa modulazione. Con tal logica di controllo la tensione spesso raggiunge istantaneamente il limite massimo, e non appena questo si verifica, il recupero viene completamente bloccato fino alla fine della frenata. Da quel momento in poi tutta la potenza di frenatura viene interamente dirottata sugli appositi reostati di dissipazione posti sull'imperiale del convoglio.

Questo è il metodo di recupero che effettivamente, ad oggi, è realizzato sui convogli tranviari utilizzati da TEB sulle sue linee.

### **2. Sfiatore modulato**

Con tal metodo, invece, durante le fasi di frenatura la potenza di frenatura viene inviata sulla linea di alimentazione in maniera modulata. In altre parole, lo sfioratore garantisce di inviare sulla linea di alimentazione la massima quota parte della potenza di frenatura in modo tale che, in ogni istante, la tensione al pantografo sia al più pari alla tensione massima ammessa (900V in questa applicazione). Ciò garantisce un recupero, parziale o totale, della potenza di frenatura in maniera continuativa fino alla fine della frenata. In questo modo il recupero non è mai completamente bloccato, e ciò permette, come facilmente intuibile, di ottenere dei recuperi energetici maggiori. Chiaramente, la quota parte di potenza sfiorata viene direttamente convogliata sulle resistenze di frenatura a bordo tram.

Durante le analisi, come vedremo, sono stati considerati ambo i sistemi di recupero possibile, in modo tale da mettere a confronto i vantaggi e gli svantaggi degli stessi e i possibili recuperi ottenibili nel caso di utilizzo o meno della modulazione della potenza di frenatura.

Ovviamente, essendo nella realtà i tram equipaggiati con un sistema di recupero non modulato, i risultati connessi alle simulazioni con sfioratore non modulato saranno quelli da prendere in considerazione per eventuali analisi e azioni migliorative. Le simulazioni invece realizzate con lo sfioratore modulato sono soprattutto un caso teorico, ma che permettono di capire come l'utilizzo di un possibile sistema di recupero modulato apporti vantaggi notevoli al sistema tranviario.

E' interessante vedere l'effetto che ha l'uno o l'altro tipo di sfioramento sul sistema complessivo con dei semplici esempi.

Nella particolarità, per quanto riguarda lo sfioratore modulato che prevede di inviare in linea in ogni istante della fase di frenatura, la massima potenza di frenatura possibile in modo tale che la tensione di linea sia sempre al più uguale al valore massimo ammesso (+20%Vn) si può osservare la seguente figura:

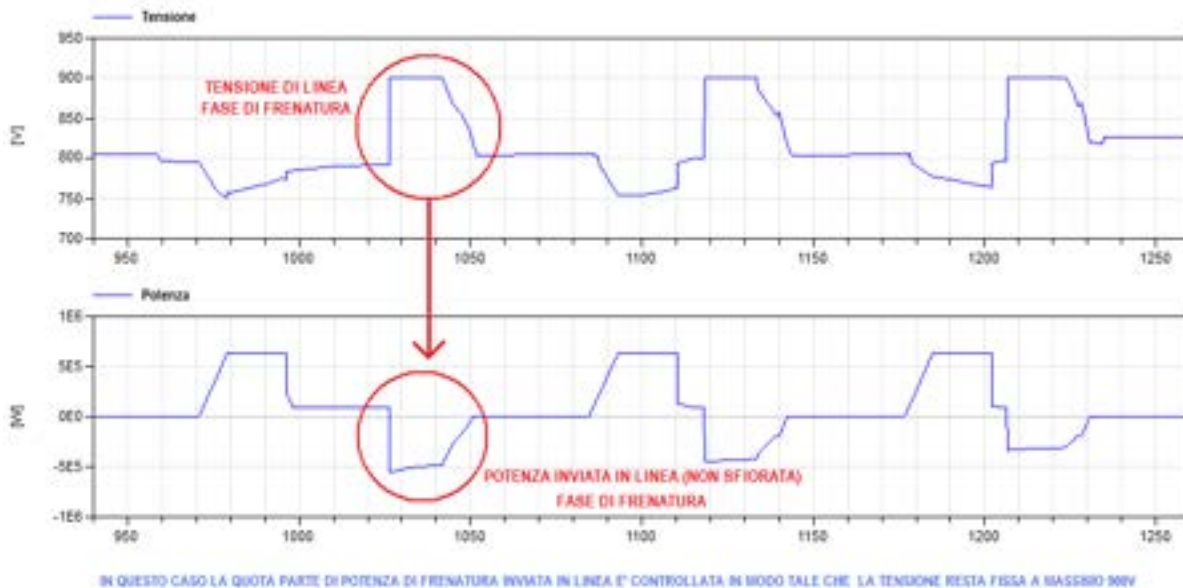


Figura 15: Sistema di recupero CON MODULAZIONE

Come si nota, il controllo attuato garantisce che sulla linea in ogni istante venga riversata sempre la massima potenza possibile, tenendo presente il limite di tensione che non deve mai essere oltrepassato. Sotto invece, si osserva la quota parte di potenza massima recuperabile che è effettivamente recuperata durante la frenatura grazie al controllo implementato:

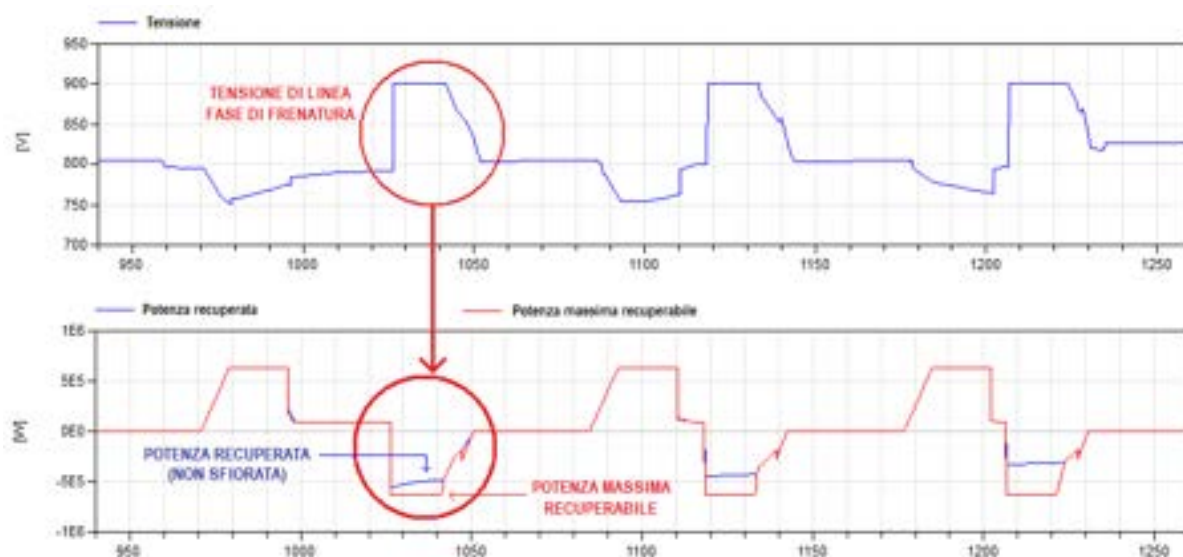
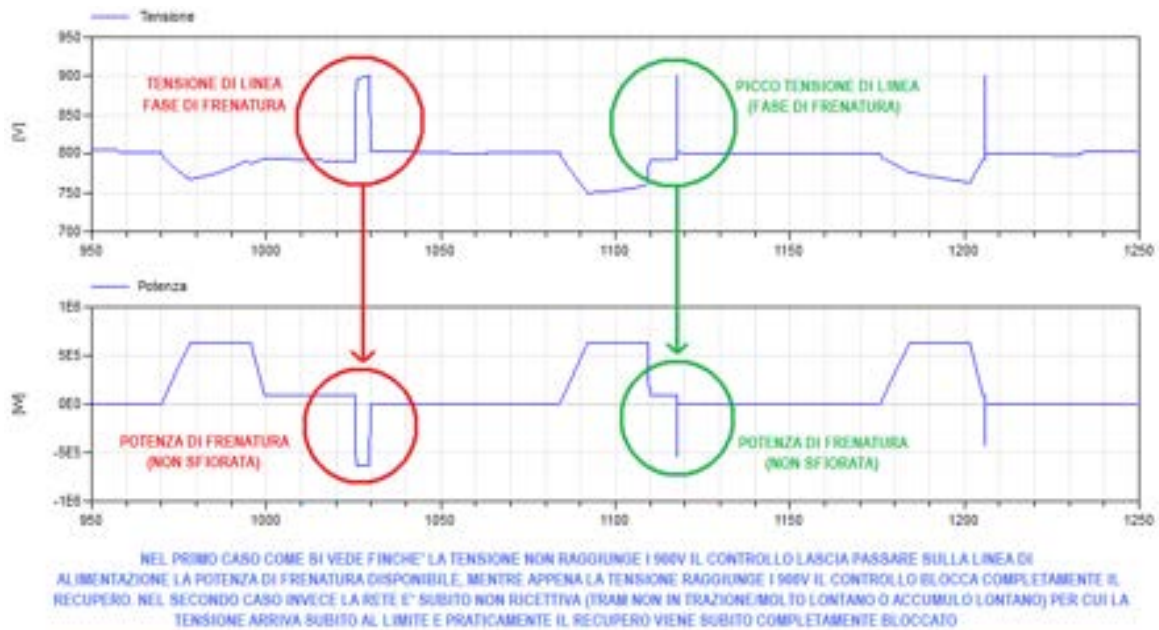


Figura 16: Potenza recuperata rispetto a quella massima recuperabile

In questo modo si garantisce un buon recupero della potenza di frenatura, in quanto tutta la quota parte di potenza di frenatura, che permette che la tensione non superi il limite imposto, viene inviata effettivamente in linea.

Per quanto concerne invece lo sfioratore senza modulazione, che prevede il bloccaggio del recupero in linea non appena la tensione di linea supera il valore massimo ammissibile, si può far riferimento alla seguente figura:



**Figura 17: Esempio di recupero SENZA MODULAZIONE (Recupero TEB)**

Come si può vedere, partendo da sinistra nella prima fase di frenatura (cerchi rossi), per alcuni secondi la tensione di linea riesce a mantenersi al di sotto dei 900V per cui lo sfioratore lascia passare completamente la potenza di frenatura disponibile alla macchina elettrica. Successivamente, la tensione supera il limite massimo e il recupero viene completamente bloccato fino alla fine della frenata. In pratica da quell'istante in poi la potenza di frenatura viene completamente inviata alle resistenze di frenatura per la sua dissipazione in calore.

Nella seconda fase di frenatura invece (cerchi verdi), il tram raggiunge istantaneamente il limite massimo di tensione, per cui il controllo blocca subito il recupero inviando da quell'istante in poi tutta la potenza sui reostati posti sull'imperiale del convoglio (perdendo ogni possibilità di recupero).

Sotto è possibile vedere anche la potenza recuperata rispetto alla massima recuperabile:

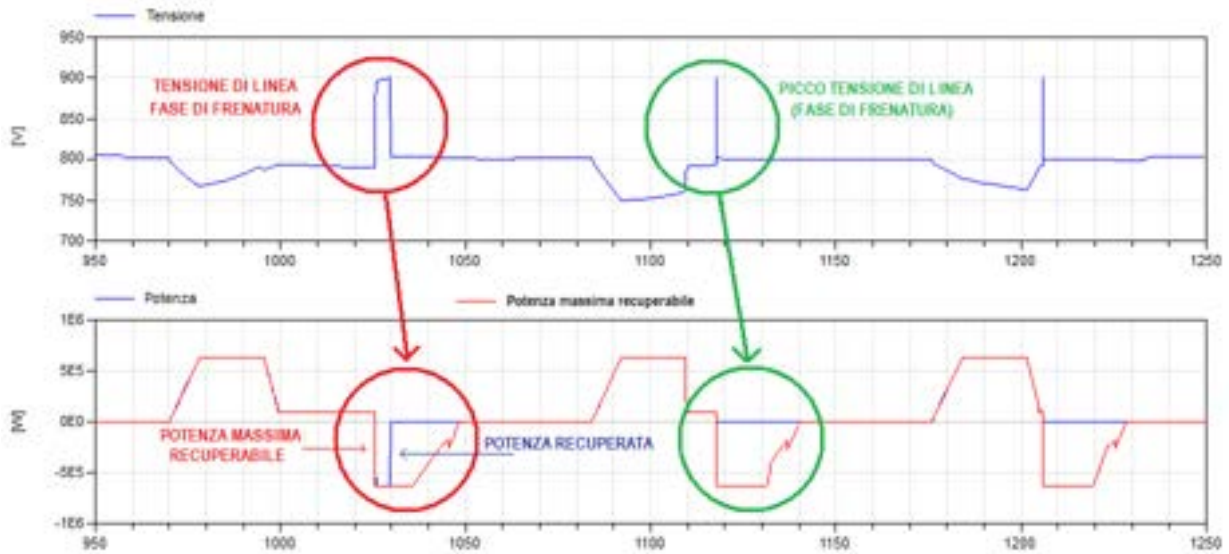


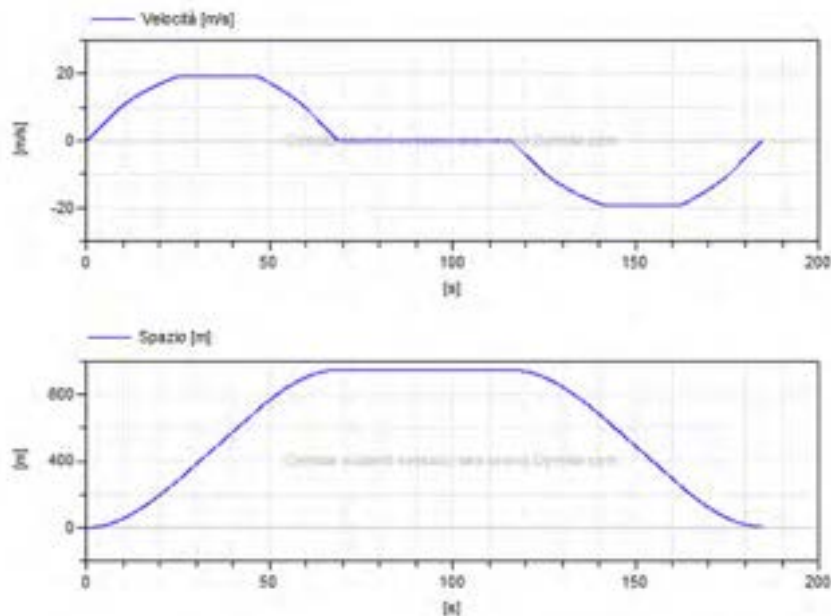
Figura 18: Potenza recuperata rispetto alla massima recuperabile

Ovviamente, come si può ben intuire con tal soluzione i recuperi ottenibili sono molto inferiori rispetto al caso con modulazione. Specialmente in presenza di un modesto numero di tram in linea il recupero ottenibile è abbastanza limitato, in quanto il limite di tensione viene solitamente raggiunto istantaneamente.

A conclusione, è interessante vedere con una semplice simulazione, alcuni andamenti delle grandezze fondamentali di cui è stato appena parlato. Così facendo, si può osservare la classica curva del moto del tram con le fasi salienti di accelerazione, crociera e frenatura, l'andamento della potenza richiesta o erogata dal tram e l'andamento della posizione del tram durante il suo moto.

Per semplicità, sotto è riportata la simulazione di un semplice ciclo in cui un ipotetico tram parte da una stazione arriva alla successiva e torna alla stazione precedente.

Per quanto riguarda il grafico della velocità e della posizione del convoglio durante il ciclo si ottiene:



**Figura 19: Andamento della velocità e della posizione del tram durante il semplice ciclo**

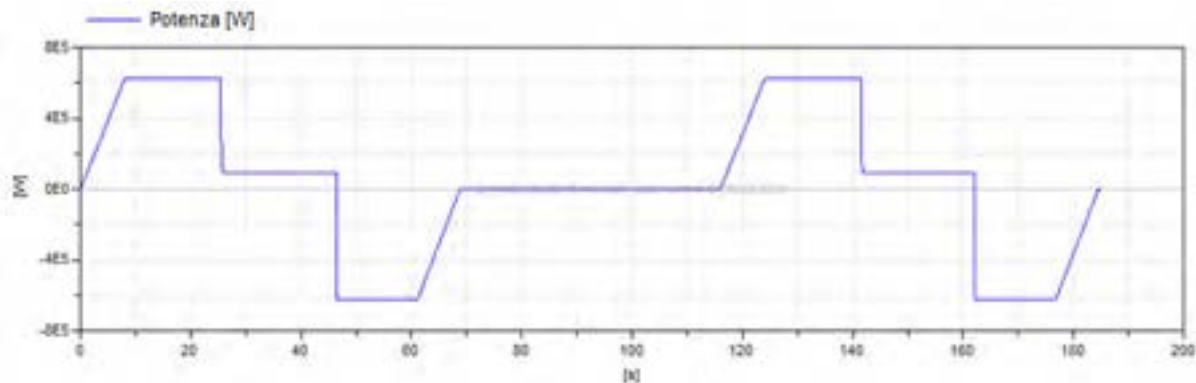
Come si può osservare nella prima figura, dalla simulazione si ottiene l'andamento tipico della velocità di un convoglio tramviario. Nel primo tratto si nota come la velocità cresca in maniera lineare in quanto l'accelerazione è pressoché costante, mentre poco prima dell'inizio della fase di crociera la velocità tenda a crescere più lentamente in quanto l'accelerazione tende a ridursi progressivamente fino ad annullarsi. Finito il tratto di crociera, in cui coppia motrice e resistente si eguagliano, si ha la classica fase di frenatura in cui la velocità comincia a ridursi progressivamente fino a portarsi a velocità nulla.

Successivamente, avendo simulato un ciclo, dopo un tempo di fermata (fisso o random), la velocità comincia a crescere nuovamente ma stavolta in maniera negativa, in quanto il tram sta percorrendo il tratto simulato in maniera opposta (rispetto al riferimento della posizione).

Per quanto concerne il grafico della posizione invece, si può vedere come la posizione inizialmente tenda a crescere velocemente, in quanto essendo la posizione l'integrale della velocità e crescendo quest'ultima linearmente la posizione cresce in maniera quadratica. Successivamente, quando il tram raggiunge la velocità di crociera la posizione cresce in maniera lineare, fino a quando comincia a saturarsi in fase di frenatura e a portarsi al valore predefinito (in cui si ha fisicamente la stazione che deve essere raggiunta).

Ovviamente, durante la fase di fermata la posizione del convoglio rimane costante e poi comincia a decrescere quando il tram si riavvia per percorrere il tratto in maniera opposta per completare il ciclo.

Per quanto riguarda la potenza assorbita o erogata dal convoglio durante il ciclo, invece, si ottiene il seguente grafico:



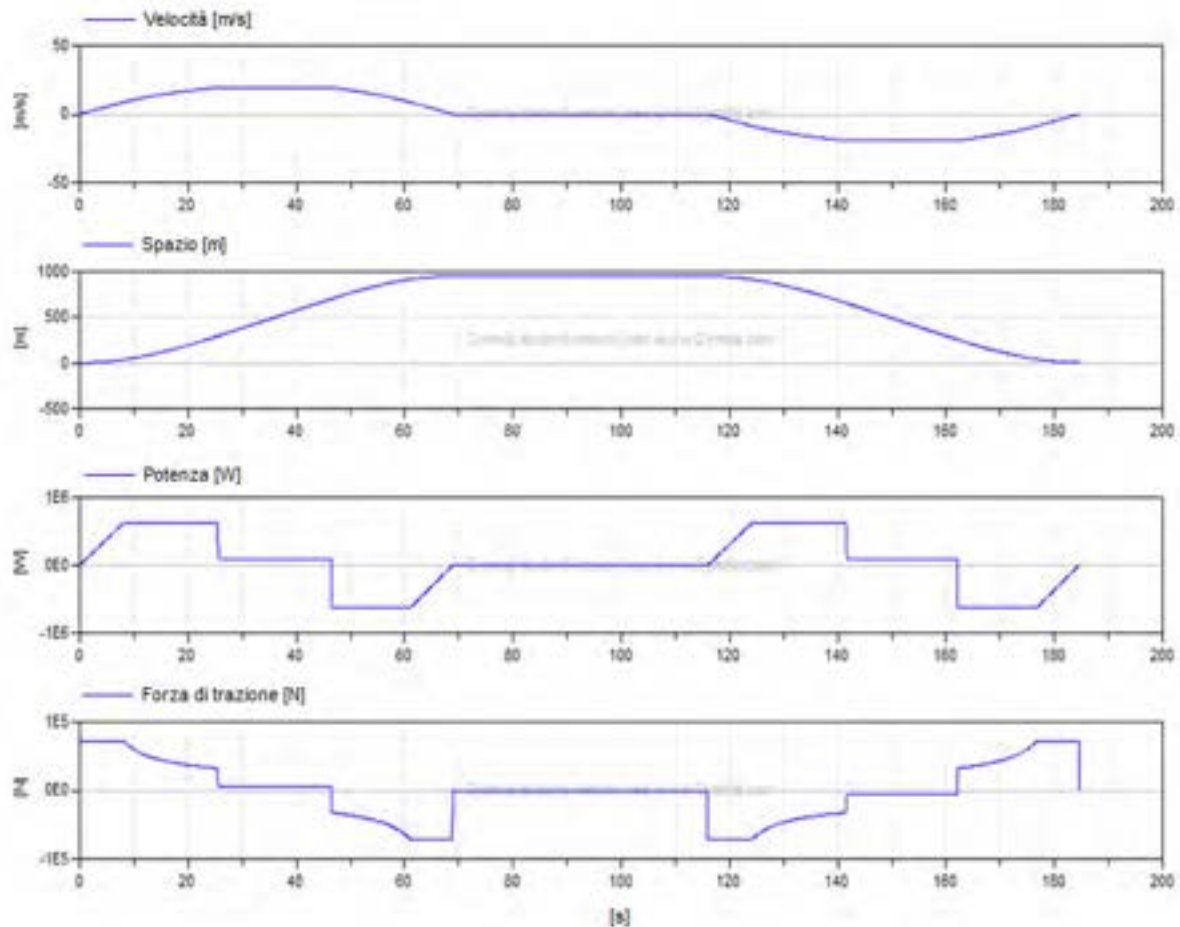
**Figura 20: Andamento della potenza assorbita/erogata dal convoglio durante il ciclo**

Nel grafico sopra si osserva come inizialmente la potenza, giustamente, cresca in maniera lineare in quanto la caratteristica meccanica di trazione, come già visto presenta uno sforzo costante fino alla velocità base. Perciò, poiché, la potenza è il prodotto di forza per velocità essendo la forza costante e la velocità crescente pressoché linearmente si ottiene un andamento lineare fino alla velocità base. Oltre la velocità base, invece la potenza resta costante in quanto lo sforzo di trazione decresce in maniera circa iperbolica, e il prodotto tra forza e velocità instate per istante resta costante. Quando il tram è arrivato alla velocità massima lo sforzo è pari a quello della forza resistente attuale e essendo la velocità costante la potenza resta anche qui costante, ovviamente a un valore più basso rispetto a quando il convoglio era in fase di accelerazione.

Successivamente, quando interviene la fase di frenatura la potenza inverte il segno in quanto in tal fase si ottiene una potenza erogata dal sistema e non più assorbita. In questo caso, ovviamente prima si trova il tratto a potenza costante, in quanto lo sforzo incontra prima la limitazione di potenza e quindi segue un andamento pressoché iperbolico, e successivamente si incontra il tratto a potenza decrescente in maniera lineare quando lo sforzo di frenatura è pari a quello massimo ammissibile e costante.

Chiaramente dopo il tempo fisso o random di fermata, per completare il ciclo le curve di potenza si ripetono come in precedenza e valgono le stesse considerazioni.

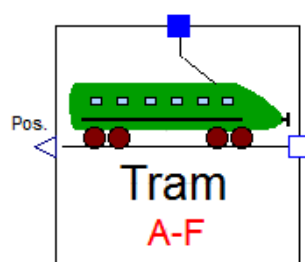
Ricapitolando i risultati di questa semplice simulazione in modo da confrontarli su un solo grafico si ottiene:



**Figura 21: Ricapitolazione dei risultati ottenuti (confrontabili)**

Ovviamente, l'andamento dello sforzo (ultimo grafico) è fornita dal componente "Pilota", come è già stato mostrato nella spiegazione associata a tal componente e a cui si rimanda. Risulta comunque utile riportarla tra i risultati sopra per interpretare al meglio la curva di potenza e chiarire nel migliore dei modi il suo andamento nel tempo. Dalla figura si può osservare chiaramente il primo tratto a forza costante, il secondo tratto a potenza costante e infine ancora il tratto a forza costante quando il tram è in fase di crociera.

L'icona sviluppata per quanto riguarda il componente "Convoglio" e con il quale è possibile riconoscerlo all'interno di un eventuale modello più complesso è il seguente:



**Figura 22: Icona del Convoglio (con Pilota incorporato)**

2.1.4 Sistema di accumulo elettrochimico

Nel caso in esame, in cui un accumulatore elettrochimico è installato in una posizione fissa, tipicamente vicino a una sottostazione, un modello sufficientemente completo per gli scopi della trattazione (modellazione “CR modificata”) può essere la seguente:

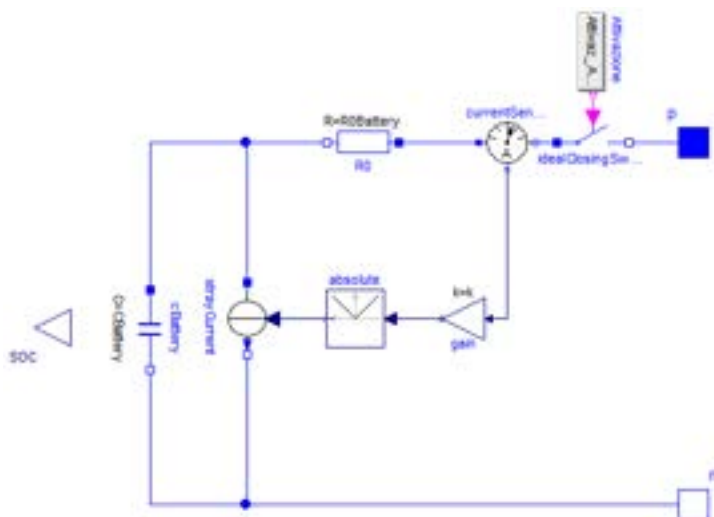


Figura 23: Modellazione del sistema di accumulo (batteria al litio)

Il modello utilizzato in questo lavoro, per il sistema di accumulo è legato all’ipotesi di poter considerare in prima approssimazione la relazione tra la forza elettromotrice (E) e lo stato di carica della batteria stessa (SOC) lineare:

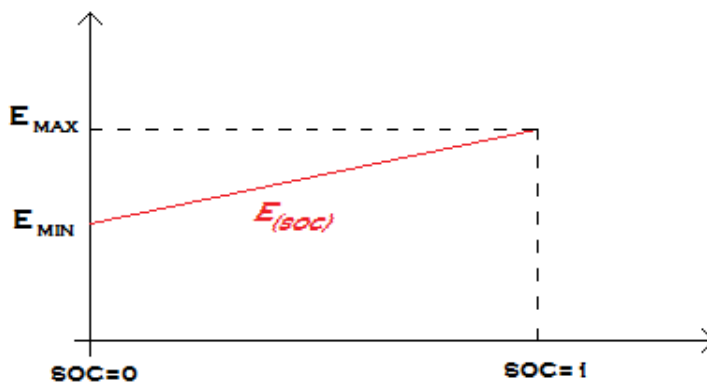


Figura 24: Andamento lineare di E in funzione del SOC

La modellazione di tal relazione si presta bene a essere rappresentata tramite la famosa relazione lineare di un condensatore:

$$Q = CV$$

In cui:

$C \rightarrow$  Capacità del condensatore (Farad)

$Q \rightarrow$  Quantità di carica (Coulomb)

$V \rightarrow$  Tensione ai capi del condensatore (Volt)

L'idea funziona nell'ipotesi di assumere per la condizione di cella completamente scarica un condensatore con ancora una carica interna (ossia non completamente scarico). A tal carica sarà associata la tensione minima della cella. Alla carica massima della batteria invece sarà associata la tensione massima della batteria e quindi del condensatore.

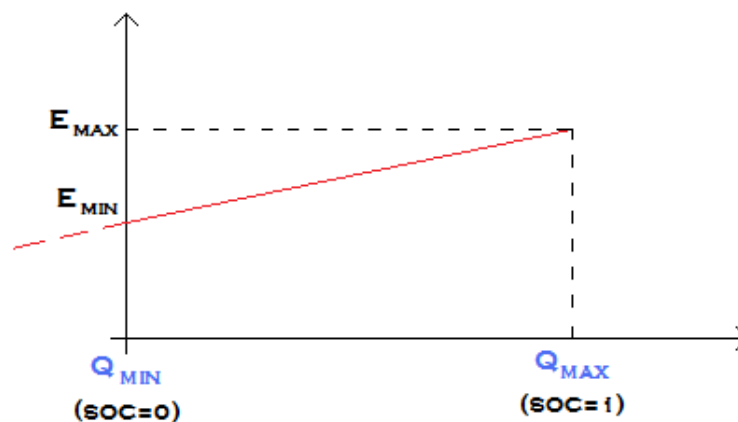


Figura 25: Caratteristica del condensatore e relazione con il SOC della cella

La capacità del condensatore equivalente risulta perciò definita dalla seguente relazione:

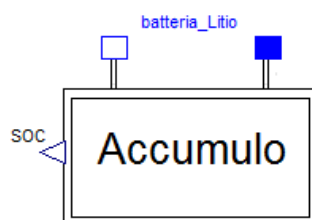
$$C = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{E_{max} - E_{min}}$$

Dove la differenza  $Q_{max} - Q_{min}$  non è altro che la carica complessiva immagazzinata nella cella elettrochimica, ossia la capacità nominale della cella stessa, solitamente espressa in Ah. In generale, la capacità del condensatore equivalente risulta di valore molto elevato (essendo il numeratore grande e il denominatore di qualche volt).

La resistenza  $R_0$  e gli elementi legati alle correnti parassite sono sintonizzati in modo tale che l'efficienza del ciclo risulti realistico (tipicamente il 90% con celle litio).

Infine si fa notare che nel modello è stato inserito uno *switch* ideale con cui è possibile attivare o disattivare l'accumulo, quando quest'ultimo è inserito in un sistema più complesso. Il tasto è comandato semplicemente da una variabile booleana. Se il valore è "true" allora l'accumulo è inserito, altrimenti se è "false" è disinserito.

L'icona realizzata per il sistema di accumulo, con il quale quest'ultimo è riconoscibile in sistemi più complessi è la seguente:



**Figura 26: Icona del componente "Accumulo"**

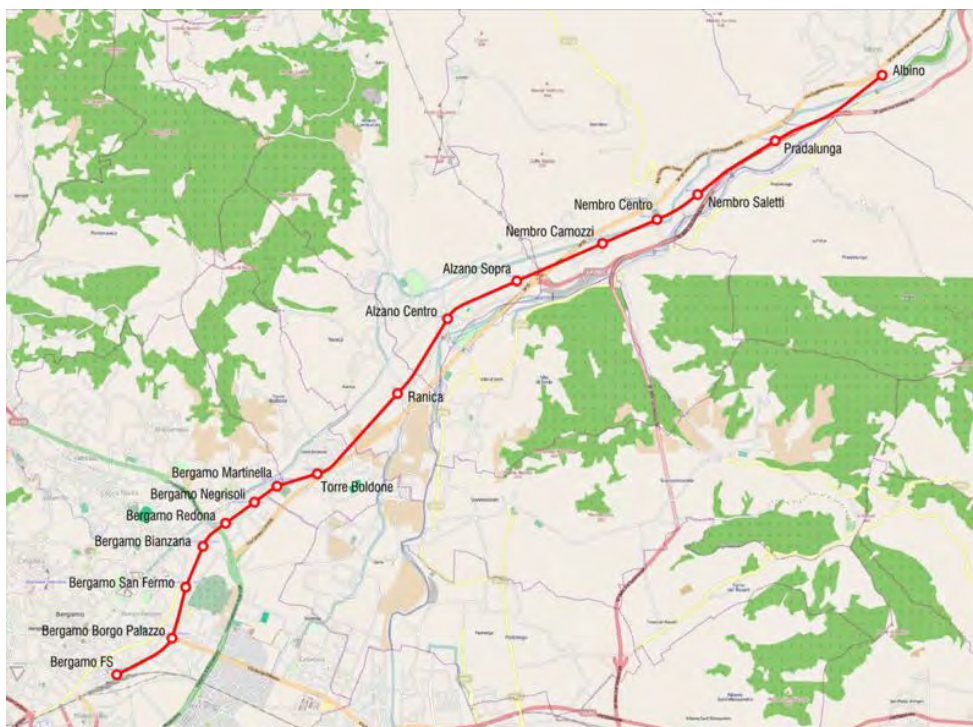
### 3 Caso studio ATB

#### 3.1.1 Caratteristiche del tracciato e traffico

La linea è una metro tranvia a doppio binario in sede completamente riservata. Ha una lunghezza di 12,6km ed è dotata di sedici fermate, compresi i capilinea.

È armata sia con rotaie Vignole sia con quelle a gola; lo scartamento adottato è di 1435 mm. Presenta trenta incroci a raso sia stradali sia pedonali regolati da semafori asserviti al servizio tranviario. La velocità massima raggiungibile dalle vetture è pari a 70 km/h, mentre la velocità commerciale è pari a 24,95 km/h

Sotto, è possibile osservare il tracciato percorso della tramvia con le varie fermate ad oggi attive:



**Figura 27: Tracciato coperto dalla metro tranvia e fermate attive**

Le posizioni delle varie stazioni su tutto il tratto coperto dal tram sono le seguenti:



**Figura 28:Fermate previste e posizione [m]**

Per maggior completezza e chiarezza di trattazione si riporta la posizione progressiva anche in forma tabulare:

**Tabella 1: Fermate: posizione progressiva [m]**

NOME DELLA FERMATA	POSIZIONE PROGRESSIVA
<i>[-]</i>	<i>[m]</i>
BERGAMO FS	30
BORGO PALAZZO	797
SAN FERMO	1464
BIANZANA	2023
REDONA	2375
NEGRISOLI	2815
BERGAMO MARTINELLA	3237
TORRE BOLDONE	3750
RANICA	5173
ALZANO CENTRO	6268
ALZANO SOPRA	7251
NEMBRO CAMOZZI	8384
NEMBRO CENTRO	9093
NEMBRO SALETTI	9731
PRADALUNGA	10910
ALBINO CENTRO	12413

### 3.1.2 Caratteristiche del sistema di alimentazione

La linea di contatto per l'alimentazione dei convogli tramviari è di tipo aereo, elettrificata a 750 <http://it.wikipedia.org/wiki/Volt> Volt in corrente continua. Il sistema di alimentazione è un sistema di tipo bilatero per tutte le tratte, tranne che per la prima stazione di Bergamo (Bergamo FS) per la quale è prevista una alimentazione di tipo monolatero.

Le SSE hanno tutte le seguenti caratteristiche:

- TENSIONE A VUOTO: 796V
- POTENZA NOMINALE: 1800kW
- CORRENTE NOMINALE: 2400A
- RESISTENZA EQUIVALENTE: 0.01327 Ω (legata alle induttanze della rete a monte)

Il sistema viene esercito con tutte le sottostazioni in parallelo e le SSE ammettono sovraccarichi del 50% per 2 ore e del 100% per un minuto.

Le posizioni delle varie SSE lungo il percorso coperto dalla tratta tramviaria sono le seguenti:



Figura 29: Posizione progressiva [m]

Riportando anche in forma tabulare le varie posizioni progressive delle SSE si ha:

Tabella 2: SSE: posizione progressiva [m]

NOME DELLA FERMATA	POSIZIONE PROGRESSIVA
[-]	[m]
DAVID	580
S.FERMO	1744
S.PELICO	3141
DEPOSITO	4488
ALZANO M.	5555
ALZANO S.	7521
NEMBRO CENTRO	9002
NEMBRO SALETTI	10003
PRADALUNGA	11010
ALBINO	12519

Per chiarezza si riporta sotto anche il tracciato completo in cui è possibile visionare sia la posizione delle SSE sia delle stazioni:



Figura 30: Posizione progressiva SSE e Fermate attive [m]

Per quanto riguarda la linea di contatto da 0 a 1744 metri essa è realizzata con conduttori in rame 2x150mm<sup>2</sup> ai quali corrisponde una resistenza specifica di 0.0867 Ω/km, mentre da 1744 a 12600 metri è realizzata con conduttori in rame 2x107 mm<sup>2</sup> e resistenza specifica di 0.1215 Ω/km. I calcoli sono stati effettuati considerando un'usura della linea di contatto del 20% e una temperatura di esercizio di 60°C.

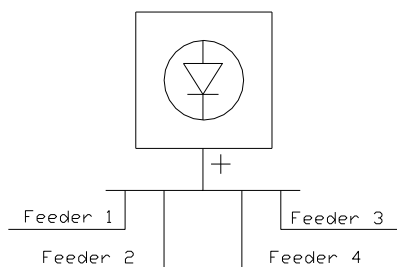
Per quanto concerne invece le resistenze del binario di tipo 50 UNI si ha una resistenza specifica di 0.0218 Ω/km, calcolata assumendo un'usura media del 10% e una temperatura di esercizio pari a 40°C.

I valori per semplicità sono riassunti anche nella seguente tabella:

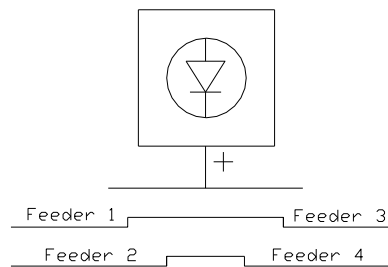
**Tabella 3: Valori delle resistenze di linea e binario.**

da	a	Descrizione Linea di Contatto	Resistenza [Ω/km]	Binario	Resistenza [Ω/km]
0	1744	Linea di contatto in Cu 2x150mm <sup>2</sup>	0.0867	50 UNI	0.0218
1744	12519	Linea di contatto in Cu 2x107 mm <sup>2</sup>	0.1215	50 UNI	0.0218

Gli schemi elettrici della SSE nel caso di SSE connessa oppure baypassata sono i seguenti:



**Figura 32: Sottostazione elettrica (SSE) connessa.**



**Figura 31: Sottostazione elettrica (SSE) bay passata.**

### 3.1.3 Caratteristiche del convoglio tramviario

Per quanto riguarda il tram, il modello utilizzato è il **Sirio**, realizzato da ANSALDOBREDA, design Pininfarina.

Le principali caratteristiche del veicolo in questione sono:

- *Bassi livelli di rumorosità all'interno*
- *Pavimento basso sull'intera superficie interna*
- *Porte di ampie dimensioni (6 per lato con 1800 mm. di vano utile)*
- *Nessun ostacolo per l'accesso alle vetture*
- *Impianto di aria condizionata per il comfort dei passeggeri (max 239, di cui 62 seduti)*

Le dotazioni di bordo includono un sistema di video-sorveglianza interno che, oltre a costituire un deterrente per gli atti vandalici o criminosi, consente al conducente una verifica costante delle condizioni dei passeggeri in vettura.

Sotto sono riportate alcune immagini del convoglio:



**Figura 33: Tram Sirio: fermo alla stazione di Bergamo**



**Figura 34: Tram Sirio: modello esemplificativo**

La massa del convoglio a vuoto è di 41912 Kg, mentre la massa del carico, considerando 6 passeggeri a m<sup>2</sup> è di 17368 Kg. Inoltre le masse rotanti sono state stimate pari al 10% della massa totale del convoglio. Il convoglio ha una lunghezza complessiva di 32 metri.

La potenza massima complessiva dell'azionamento è di 628 kW e lo sforzo massimo complessivo al cerchione di 72100N.

Come già descritto in precedenza si ricorda che, lo sforzo massimo iniziale al cerchione è legato a limiti di aderenza per mantenere un moto di puro rotolamento alle ruote del convoglio. Superata la cosiddetta velocità base, invece, la forza massima al cerchione è limitata dalla potenza dell'azionamento e perciò la forza di trazione andrà via via riducendosi seguendo un andamento pressoché iperbolico al crescere della velocità del convoglio. La velocità massima considerata nelle varie simulazioni è di 70 km/h.

Per quanto riguarda i coefficienti di attrito e aerodinamici per la modellizzazione della forza resistente che il tram incontra durante il suo moto è stato considerato un coefficiente statico di Davis di 1454N e un coefficiente quadratico di 8.87Ns<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, mentre il coefficiente lineare con la velocità è stato considerato nullo. Per i dettagli di modellizzazione della forza di trazione e della forza resistente si rimanda comunque al capitolo successivo.

Ricapitolando, i dati principali del convoglio sono riportati sotto:

**Tabella 4: Ricapitolazione dei dati principali del convoglio.**

<b>Massa a vuoto del convoglio</b>	41912 Kg
<b>Massa del carico (consid. 6 pass/m<sup>2</sup>)</b>	17368 Kg
<b>Percentuale masse rotanti</b>	10%
<b>Lunghezza del veicolo</b>	32 m
<b>Sezione maestra</b>	7 m <sup>2</sup>
<b>Potenza massima dell'azionamento</b>	628000 W
<b>Sforzo massimo al cerchione</b>	72100 N
<b>Coefficiente statico di Davis</b>	1454 N
<b>Coefficiente lineare di Davis</b>	0 Ns/m
<b>Coefficiente quadratico di Davis</b>	8.87 Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Tensione nominale di funzionamento</b>	750 V
<b>Tensione minima di funzionamento</b>	500 V
<b>Tensione massima di funzionamento</b>	900 V

Come si può notare, i valori delle tensioni massime e minime di funzionamento sono congrui con gli scostamenti percentuali massimi di tensione che si possono avere per linee di alimentazione in continua che come si ricorda sono +20% e -33% rispetto al valore nominale della tensione della linea.

### 3.1.4 Profili Orari e Tipi di servizio

Di seguito sono riportati i profili orari seguiti durante i vari mesi dell'anno dalla tranvia in esame. In prima analisi quest'ultimi possono essere suddivisi in due periodi principali, il **periodo estivo** e il **periodo invernale**, connessi principalmente all'apertura o meno delle scuole.

In particolare, il **programma di esercizio estivo** prevede:

- un tram ogni 15 minuti nei giorni feriali, da lunedì a venerdì (dalle ore 5.30 alle ore 22.30).
- un tram ogni 30 minuti al sabato e festivi (dalle ore 6.00 alle ore 22.15)

Mentre il **programma di esercizio invernale** prevede:

- un tram ogni 15 minuti nei giorni feriali scolastici, con intensificazioni fino a 6 minuti nelle ore di punta scolastica (dalle ore 5.30 alle ore 22.30)
- un tram ogni 15 minuti durante le vacanze scolastiche, da lunedì a venerdì (dalle ore 5.30 alle ore 22.30).
- un tram ogni 30 minuti al sabato e nei giorni festivi (dalle ore 6.00 alle ore 22.15)
- a Natale il servizio è sospeso

Di seguito, sono riportati i giorni, relativi a un anno completo, suddivisi in giorni festivi e feriali. La Pasqua è stata ipotizzata nel mese di Marzo. Chiaramente, per quanto riguarda i giorni feriali, quest'ultimi saranno suddivisi in giorni scolastici e giorni non scolastici a seconda che l'attività scolastica sia soppressa o meno in quel determinato mese o parte di mese.

**Tabella 5: Giorni festivi e feriali su base annua**

<b>MESE</b>	<b>GIORNI FERIALI</b>		<b>GIORNI FESTIVI</b>
<b>GENNAIO</b>	21		10
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	11	10	
<b>FEBBRAIO</b>	20		8
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	20	0	
<b>MARZO</b>	20		11
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	15	5	
<b>APRILE</b>	21		9
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	21	0	
<b>MAGGIO</b>	22		9
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	22	0	
<b>GIUGNO</b>	20		10
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	9	11	
<b>LUGLIO</b>	23		8
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	0	23	
<b>AGOSTO</b>	20		11
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	0	20	
<b>SETTEMBRE</b>	21		9
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	11	10	
<b>OTTOBRE</b>	23		8
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	23	0	
<b>NOVEMBRE</b>	21		9
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	21	0	
<b>DICEMBRE</b>	20		10
	GIORNI SCOLASTICI	GIORNI NON SCOLASTICI	
	10	10	

In prima ipotesi si possono perciò definire 3 giorni “tipo”:

- **GIORNO FERIALE SCOLASTICO**
- **GIORNO FERIALE NON SCOLASTICO**
- **GIORNO FESTIVO**

Per semplicità, e per quanto detto precedentemente, relativamente ai tipi di gestione di esercizio, si può anche definire 3 principali ore “tipo”:

1. **ORA DI PUNTA:** 10 tram distanziati ognuno di 6 minuti (giorni feriali scolastici dalle 5:30-8:30 e dalle 13:00-15:00)
2. **ORA DI MORBIDA:** 5 tram in linea distanziati di 15 minuti (giorni feriali non scolastici e giorni scolastici dalle 8:30 alle 13:00 e dalle 15:00 alle 22.30)
3. **ORA FESTIVA:** 3 tram in linea distanziati di 30 minuti (Sabato, Domenica e Festività dalle 6.00 alle 22.15)

In prima approssimazione perciò, un **giorno feriale non scolastico** è costituito da 17 ore di morbida, un **giorno feriale scolastico** da 5 ore di punta e 12 di morbida e un **giorno festivo** da 16.25 ore festive.

In base al calendario giornaliero riportato sopra perciò, è facilmente ricavabile il numero di ore di punta, morbida e festive presenti in un anno di 364 giorni (a Natale il servizio è soppresso).

Nella tabella sotto perciò si riporta la discretizzazione oraria ottenuta:

**Tabella 6: Ore di punta, morbida e festive su base annua**

MESE	ORE PUNTA	ORE MORBIDA	ORE FESTIVE
GENNAIO	75	282	162.5
FEBBRAIO	100	240	130
MARZO	75	265	178.75
APRILE	105	252	146.25
MAGGIO	110	264	146.25
GIUGNO	45	295	162.5
LUGLIO	0	391	130
AGOSTO	0	340	178.75
SETTEMBRE	50	290	146.25
OTTOBRE	115	276	130
NOVEMBRE	105	252	146.25
DICEMBRE	50	290	162.5

Per realizzare le simulazioni dei tre tipi di servizio, ossia punta, morbida e festivo, nel simulatore sono stati sviluppati tre diversi tipi di “Rete di Alimentazione”. La prima prevede la connessione di 10 tram, la seconda di 5 tram ed infine l’ultima prevede la connessione di 3 tram. Ovviamente tutti e tre i modelli prevedono il collegamento delle dieci SSE (Per dettagli vedere Capitolo 2).

Le interfacce grafiche del simulatore relativamente ai tre possibili servizi offerti dalla tranvia sono riportate di seguito.

Per quanto riguarda il **SERVIZIO DI PUNTA** si ha:

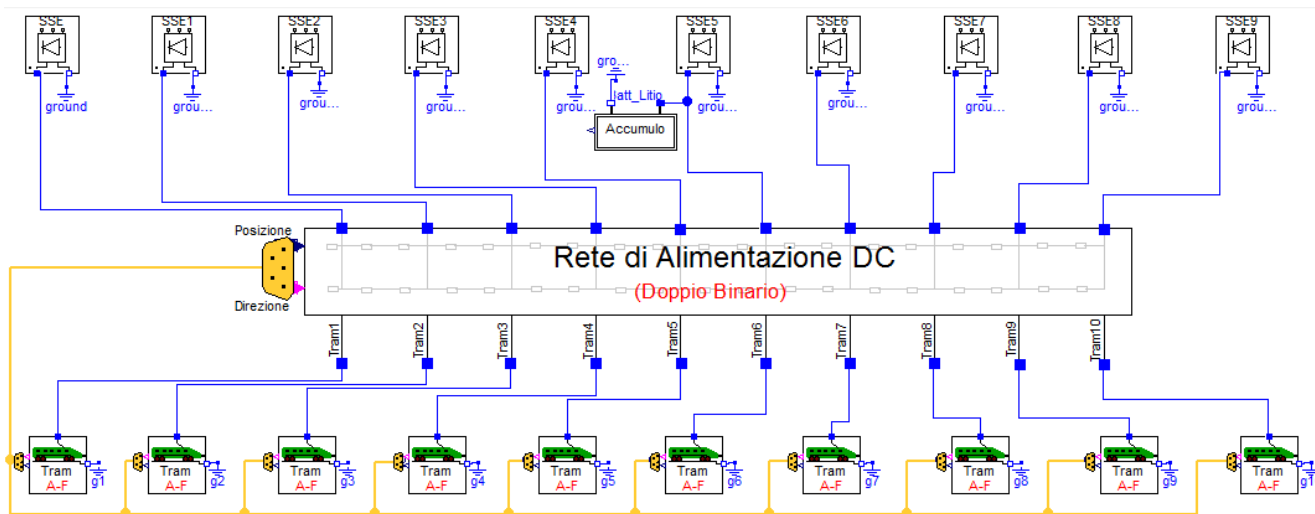


Figura 35: Interfaccia simulatore per Servizio di Punta

Per il **SERVIZIO DI MORBIDA**:

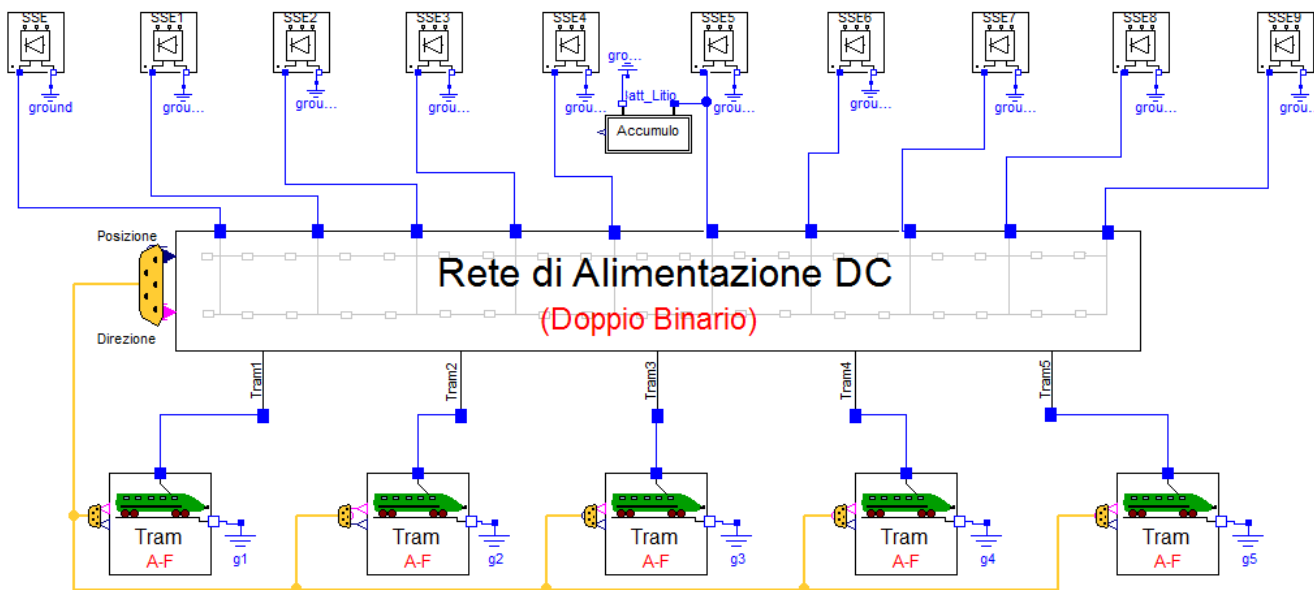


Figura 36: Interfaccia del simulatore per Servizio di Morbida

E infine per il **SERVIZIO FESTIVO** si ottiene:

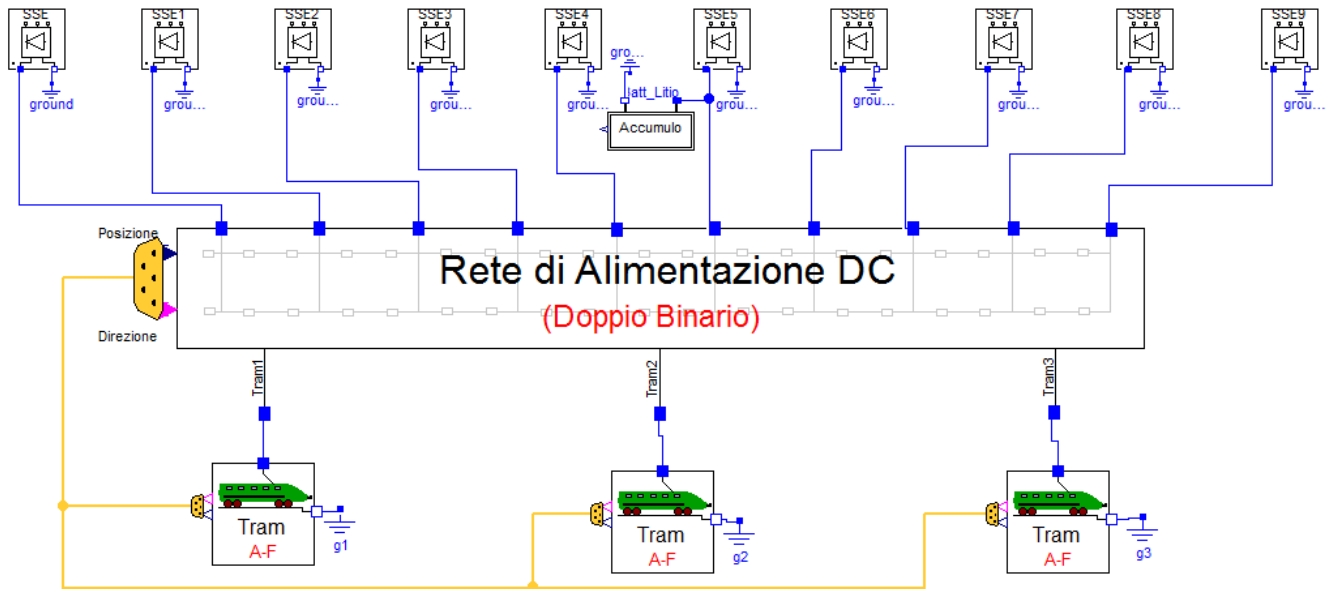


Figura 37: Interfaccia del simulatore per Servizio Festivo

## 4 Simulazione dello stato attuale e validazione del simulatore.

### 4.1.1 Aspetti Principali

Come già avuto modo di dire, ad oggi la tranvia in oggetto effettua una semplice frenatura a recupero in linea, e attualmente all'interno del sistema non vi è presenza di nessun sistema di accumulo di tipo gestionale.

Nelle pagine che seguono saranno perciò presentati i risultati di simulazione restituiti dal simulatore stesso nel caso di solo recupero in linea con sfioratore non modulato. Dai documenti forniti da T.E.B. i tram in oggetto, sono infatti risultati equipaggiati con un sistema di sfioro di tipo non modulato. Si ricorda, che con tal logica di sfioro durante le frenate, non appena la tensione al pantografo raggiunge il limite massimo (900V) il recupero viene bloccato istantaneamente fino alla fine della frenata, perdendo da quell'istante in poi qualsiasi possibilità di recupero energetico.

E' importante informare il lettore che per limitare i tempi di calcolo, sono state realizzate delle simulazioni di 3 ore ciascuna (10800 secondi) da cui poi sono stati facilmente stimati i valori numerici di interesse prima su base oraria, successivamente giornaliera e infine annuale.

Una cosa importante da notare è che nella fase iniziale di qualsiasi tipo di servizio (punta, morbida, festivo), c'è sempre una **fase di avviamento** (in cui si hanno in linea meno tram di quelli che ci sono a regime) a cui solo successivamente subentra una **fase di regime** in cui tutti i tram sono avviati. Durante le simulazioni eseguite, si è considerato sempre la prima ora di avviamento e le successive di regime. In pratica perciò da ognuna delle simulazioni si ottiene sempre un'energia oraria di avviamento e un'energia oraria di regime.

Per chiarire bene questo aspetto, prendiamo ad esempio una **giornata feriale non scolastica**, in cui si ha un tempo di servizio pari a 17 ore di morbida, ossia con 5 tram in linea. All'avvio del servizio mattutino chiaramente non tutti i tram partiranno contemporaneamente, ma saranno previste delle partenze shiftate nel tempo. Perciò, inizialmente i tram in linea non saranno cinque, e quindi le energie principali di nostro interesse saranno diverse dalle energie di regime (e saranno numericamente inferiori). Successivamente, i cinque tram andranno a regime e le energie si stabilizzeranno.

Noto ciò, e nota le energie complessive relativamente a tre ore di simulazione, ad esempio per quanto riguarda il calcolo dell'energia complessiva di trazione giornaliera si è implementata la seguente formula:

$$Energia_{giorn.} = Energia_{morbida_{avviam.}} + 16Energia_{morbida_{regime}}$$

Dove:

**Energia<sub>giorn.</sub>** → Energia complessiva di trazione giornaliera (per una giornata feriale non scolastica)

**Energia<sub>morbida<sub>avviam.</sub></sub>** → Energia oraria di avviamento (quando ho meno di 5 tram in linea)

**Energia<sub>morbida<sub>regime</sub></sub>** → Energia oraria di regime (quando tutti e 5 tram sono in servizio in linea)

L'energia oraria di avviamento è stata ricavata dai risultati di simulazione, misurando l'energia di trazione richiesta durante la prima ora (avviamento) e l'energia di regime valutando l'energia di trazione richiesta tra la prima e la seconda ora (o analogamente tra la seconda e la terza ora).

Discorsi identici valgono per gli altri tipi di giornate. Nel caso di **giornata feriale scolastica** in cui si hanno approssimativamente 5 ore di punta e 12 di morbida l'energia complessiva di trazione (ad esempio) è stata calcolata come segue:

$$Ener_{giorn.} = Ener_{punta_{avviam.}} + 4Ener_{punta_{regime}} + 12Ener_{morbida_{regime}}$$

Dove:

**Energia<sub>giorn.</sub>** → Energia complessiva di trazione giornaliera (per una giornata feriale scolastica)

**Energia<sub>punta<sub>avviam.</sub></sub>** → Energia oraria di avviamento (quando ho meno di 10 tram in linea)

**Energia<sub>punta<sub>regime</sub></sub>** → Energia oraria di regime (quando tutti e 10 tram sono in servizio in linea)

**Energia<sub>morbida<sub>regime</sub></sub>** → Energia oraria di regime (quando tutti e 5 tram sono in servizio in linea)

Chiaramente, in questo caso, si hanno piccole differenze dal caso reale nell'intervallo in cui si ha il passaggio da servizio di punta a servizio di morbida e viceversa.

Infine nel caso di **giornata festiva** la formula utilizzata per il calcolo dell'energia complessiva di trazione, considerando 16.25 ore festive è la seguente:

$$Ener_{giorn.} = Ener_{festivo_{avviam.}} + 15.25Ener_{festivo_{regime}}$$

Dove:

**Energia<sub>giorn.</sub>** → Energia complessiva di trazione giornaliera (per una giornata festiva)

**Energia<sub>festivo<sub>avviam.</sub></sub>** → Energia oraria di avviamento (quando ho meno di 5 tram in linea)

**Energia<sub>festivo<sub>regime</sub></sub>** → Energia oraria di regime (quando tutti e 5 tram sono in servizio in linea)

E' ovvio che le formule sopra restano valide per il calcolo di qualsiasi energia giornaliera (recuperata, di frenatura alla macchina elettrica, di trazione etc..)

Successivamente, note le energie giornaliere (di interesse), con l'ausilio dei dati riportati nelle tabelle presentate nella sezione precedente, riguardanti i giorni feriali-scolastici, feriali-non scolastici e i festivi, relativi ad un anno, è possibile risalire alle energie annue (di interesse).

#### 4.1.2 Risultati di Simulazione

Per quanto detto, di seguito sono riportati i risultati di simulazione inerenti al caso di **solo recupero in linea senza modulazione** ottenuti con le ipotesi in precedenza descritte.

Per quanto concerne i **VALORI ORARI** delle energie di maggior interesse pratico, ossi l'energia erogata dalle SSE e l'energia recuperata, ottenute dalle simulazioni nel caso in esame si ottiene:

**Tabella 7: Valori orari dell'energia erogata dalle SSE e recuperata (recupero "non modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	3,442	3,870	0,403	0,529
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,467	1,620	0,061	0,074
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,812	0,879	0,031	0,037

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (ancora su base oraria):

**Tabella 8: Valori orari delle energie di trazione alle ruote e al pantografo (recupero "non modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	3,289	3,894	3,873	4,577
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,270	1,435	1,496	1,680
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,827	0,759	0,827	0,895

**Tabella 9: Valori orari delle energie di frenatura alle ruote e alla macchina elettrica (recupero "non modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	2,477	2,973	1,987	2,385
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	0,935	1,089	0,751	0,873
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,504	0,579	0,404	0,464

Le ultime due tabelle, relative alle energie di trazione e di frenatura, sono state inserite solo per dovere di completezza. Chiaramente, queste ultime due tabelle restano le stesse a prescindere da quale sia il metodo gestione della frenatura elettrica (nessun recupero, recupero modulato o non, recupero e sistema di accumulo). Questi dati possono anche servire come riprova dell'effettivo funzionamento del simulatore stesso.

Per quanto riguarda invece i **VALORI GIORNALIERI** dell'energia erogata dalle SSE e dei recuperi ottenibili nelle varie giornate "tipo", calcolate con le formule precedentemente presentate, si ha:

**Tabella 10: Valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata (recupero "non modulato")**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	14,217	3,949	0,595	0,165
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	38,362	10,656	3,407	0,946
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	27,387	7,608	1,245	0,346

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (base giornaliera):

**Tabella 11: Valori orari delle energie di trazione alle ruote e al pantografo**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	12,27775	3,410	14,47575	4,021
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	36,085	10,024	42,341	11,761
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	24,23	6,731	28,376	7,882

**Tabella 12: Valori orari delle energie di frenatura alle ruote e alla macchina elettrica**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	9,33375	2,593	7,48	2,078
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	27,437	7,621	22,003	6,112
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	18,359	5,100	14,719	4,089

Infine, considerando la tabella di pagina 37 in cui sono riportati i giorni feriali scolastici, feriali non scolastici e festivi su base annua sono state calcolati i **VALORI ANNUI** delle energie erogate dalle SSE e i recuperi ottenibili.

**Tabella 13: Valori annui dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata (recupero "non modulato")**

	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>Recupero in linea non modulato</b>	10326,625	2868,507	741,484	205,968

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (base annua):

**Tabella 14: Valori annui delle energie di trazione e frenatura ai vari elementi principali**

ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
9460,853	2628,014	11104,191	3084,497
ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
7187,874	1996,631	5763,376	1600,937

#### 4.1.3 Validazione del Simulatore

Questi ultime tabelle presentate hanno anche permesso di soddisfare alla necessaria e fondamentale attività di verifica e validazione del simulatore. In altre parole, tale attività permette di effettuare delle analisi di congruenza e capire se effettivamente ci sono o meno dei riscontri positivi tra alcuni valori significativi forniti dal simulatore e quelli misurati e noti dalla realtà fisica. Un dato che permette un confronto abbastanza importante, per verificare la funzionalità o meno del simulatore è l'energia complessiva annua fornita dalle SSE. Perciò, con l'obiettivo di verificare i risultati del simulatore è stata confrontata l'energia totale annua erogata dalle sottostazioni elettriche, ottenuta dalle simulazioni sopra, ai consumi annui rilevati dal gestore durante l'anno 2012.

I dati forniti dal gestore della tranvia relativi ai vari consumi annuali nelle singole SSE sono riportati nella seguente tabella:

**Tabella 15: Rilevazione dei consumi annui per ogni sottostazione elettrica**

SOTTOSTAZIONE ELETTRICA (SSE)	ENERGIA
[-]	[MWh]
SSE DAVID	548,615
SSE S.FERMO	441,458
SSE S. PELLICO	305,691
SSE DEPOSITO	982,695
SSE ALZANO M.	160,976
SSE ALZANO S.	302,632
SSE NEMBRO CENTRO	332,619
SSE NEMBRO SALETTI	222,910
SSE PRADALUNGA	236,053
SSE ALBINO	454,781

Sommando algebricamente i valori sopra, il consumo complessivo annuo del gestore ammonta a circa **3988,431 MWh**.

C'è da dire che all'interno dell'erogazione complessiva annua (reale) delle SSE, c'è compresa sia la quota parte di energia consumata relativa ai servizi ausiliari del sistema, sia i recuperi di energia di frenatura in linea che realmente i tram riescono a realizzare tra loro. La società di gestione, ipotizza e stima che l'energia necessaria ai servizi ausiliari complessivi annui ammonti a circa 1/3 dell'energia erogata dalle SSE. Confrontando l'energia annua erogata dalle SSE nel caso di recupero in linea con il sistema di recupero effettivamente utilizzato da TEB (ossia non modulato) ottenuta dalle simulazioni precedenti con l'energia complessiva annua erogata dalle SSE al netto della quota parte dei servizi ausiliari (1/3 dei 3899 MWh) si ottiene:

***En. annua erogata dalle SSE nel caso di recupero in linea (con sistema TEB) → 2868,5 MWh***

***En. annua erogata dalle SSE realmente (al netto dei servizi ausiliari) → 2658,9 MWh***

In prima approssimazione, perciò, considerando anche i dati in possesso, il simulatore permette di ottenere risultati decisamente congrui con la realtà.

## 5 Scelta del sistema di accumulo.

### 5.1.1 Tipo di batteria e scelta della sottostazione sperimentale

La classificazione più generale che in genere si fa per i sistemi di accumulo è legata alla natura dell'accumulo stesso. Esistono per il settore dei trasporti due tipologie di accumulo principalmente studiate e utilizzate. La prima è la tecnologia che sfrutta l'accumulo chimico eseguita grazie ad un accumulatore elettrochimico (batterie al litio, piombo, Ni-Cd), mentre la seconda, di più recente sviluppo e quella che utilizza direttamente l'accumulo elettrico in supercapacitori o condensatori. In realtà esistono anche sistemi di accumulo di tipo meccanico che sfruttano ad esempio l'aria compressa o volani meccanici, ma tali sistemi per il settore dei trasporti sono molto limitati (ad esempio si ricorda la metro di Los Angeles).

L'accumulo può in genere può avere tre funzioni:

- **Strategica:** In questo caso l'accumulo è necessario per il sistema in cui è inserito per fa si che quest'ultimo riesca a svolgere le funzioni per cui è stato realizzato. Un esempio è il serbatoio di benzina per le moto, o le batterie per i giochi portatili dei bambini.
- **Gestionale:** In tal caso l'accumulo ha solo una funzione di miglioramento e ottimizzazione delle funzionalità del sistema, anche se in realtà non sarebbe indispensabile.
- **Intrinseco:** In tal caso l'accumulo è per la natura del sistema stesso già al suo interno. Si pensi d esempio alle inerzie nei sistemi di tipo meccanico.

Nel caso in esame chiaramente la scelta dell'accumulo riguarda un **accumulo di tipo gestionale**, in quanto l'installazione dello stesso nel sistema tranviario preso a riferimento garantisce un miglioramento dell'efficienza energetica complessiva della tranvia.

La scelta che è stata portata avanti per questa applicazione è quella di utilizzare un sistema di accumulo di tipo elettrochimico e precisamente è stato deciso l'utilizzo di una **batteria al litio alta potenza**.

In generale il sistema di accumulo per applicazioni nell'ambito dei trasporti può essere posto a bordo del rotabile (accumulo *mobile*) o direttamente a terra (accumulo *fisso*). Nel caso di accumulo fisso quest'ultimo è generalmente installato all'interno di una o più sottostazioni o in prossimità delle stesse. Lo svantaggio principale di tal soluzione chiaramente è la presenza di un elemento dissipativo, qual è la rete di contatto, tra i tram in fase di recupero e il sistema di *storage*. Nel caso invece di accumulo mobile, ossia installato direttamente sul tram il problema della presenza della linea di contatto viene bypassato ogni qualvolta i tram in recupero inviano l'energia al sistema di accumulo (non il contrario). Tale metodo però ha due principali svantaggi che talvolta ne limitano l'utilizzo. Il primo è legato al fatto di dover installare un sistema di accumulo su ogni rotabile, per cui i costi di installazione lievitano in maniera proporzionale al numero di

tram presenti in linea. Il secondo non meno importante è il fatto che il tram deve continuamente trasportare un peso aggiuntivo (batteria) durante il suo tragitto.

Per tali motivi, per questa attività si è prescelto un'installazione del sistema di accumulo direttamente a terra. In prima analisi è stato deciso di inserire l'accumulo in una sola SSE piuttosto baricentrica per il sistema complessivo, in modo tale da massimizzare i recuperi energetici ottenibili.

per quanto riguarda la localizzazione della batteria si è scelto di installare la batteria all'interno della sottostazione di Alzano Maggiore (SSE4 nei modelli presentati in precedenza). Tal SSE è posta in una zona abbastanza baricentrica per tutto il sistema, per cui ai fini di massimizzare i recuperi risulta la scelta più adeguata (nel caso di singola batteria).



**Figura 38: Posizionamento del sistema di accumulo gestionale all'interno del sistema**

In seguito si vedrà che saranno comunque presentati dei risultati di simulazione relativi anche all'ipotesi di installazione di più batterie all'interno del sistema. Chiaramente in tal caso il posizionamento dell'accumulo subirà cambiamenti.

### 5.1.2 Dimensionamento di massima dell'accumulo

I sistemi di accumulo sono caratterizzati in generale da una serie di grandezze caratteristiche che ne definiscono le qualità e permettono di fare delle scelte tecniche ai fini di un utilizzo ottimale degli stessi. La **capacità**, espressa in Ah, è la carica elettrica massima estraibile dalla batteria durante il processo di scarica. Quest'ultima è molto dipendente dalla corrente di scarica e dalla temperatura di funzionamento della batteria stessa.

Altro parametro importante è l'**energia**, espressa in Wh, ossia l'energia che il sistema fornisce durante la scarica, partendo dalla condizione di piena carica fino ad arrivare alla scarica completa, ed è data dal prodotto della capacità per la tensione dell'accumulatore. Per confrontare sistemi di tipo diverso si usano i parametri specifici, quali l'**energia specifica** e la **potenza specifica**, riferiti al peso del sistema espresso in kg, indicate in generale con Wh/Kg e W/Kg.

Come sappiamo, le batterie possono essere di due tipi, il primo tipo sono batterie che lavorano in “energia”, a cui sono richieste erogazione o assorbimenti di potenze ridotte ma per tempi lunghi, e l’altro tipo sono batterie che lavorano in “potenza” a cui sono richieste erogazioni o assorbimenti di potenze elevate ma per tempi ridotti.

Nel caso in esame, essendo le fasi di frenatura dei convogli brevi (massimo 20-25secondi) ma le potenze in gioco elevate, la scelta della batteria ricade su batterie progettate per un lavoro in “potenza”.

E’ chiaro, che le batterie inserite in contesti in cui sono soggette a numerosi cicli di carica e scarica, come in questo caso, devono essere progettate in maniera opportuna per garantire una vita abbastanza lunga delle stesse.

La batteria utilizzata per le simulazioni è una batteria al litio a alta potenza. L’ipotesi di partenza per la scelta dell’accumulo, in questa analisi, è quella di utilizzare una batteria che possa rimanere nel sistema per almeno dieci anni senza subire degrado eccessivo legato al tipo di funzionamento a cui è soggetta. Poiché, come noto, il *cycle life* delle batterie è fortemente dipendente dalla profondità di carica-scarica dei cicli a cui le stesse sono soggette, per garantire un alto numero di cicli e quindi una vita di almeno dieci anni, la batteria che verrà utilizzata nelle simulazioni sarà una batteria molto sovradimensionata (per quanto riguarda l’energia). Il SOC infatti come vedremo dalle simulazioni non varierà mai più del 9% (nella fascia oraria di punta del periodo invernale), ma nella maggior parte dei casi resta entro il 6%. Ciò ci consente di ipotizzare, salvo le opportune verifiche con il costruttore del sistema di accumulo, che la batteria sia in grado di garantire il funzionamento previsto per la durata dei dieci anni.

In generale i costruttori di batterie forniscono i dati per le massime correnti di carica e scarica continuativa a cui la batteria può essere soggetta per non incorrere in danni e per non ridurre troppo la sua vita. Tali correnti massime di solito sono dell’ordine della corrente nominale o al massimo di qualche volta la corrente nominale. In realtà, come in questo caso in studio, la batteria non è soggetta a cariche e scariche di tipo continuativo, ma bensì a cariche e scariche di tipo impulsivo. Da prove sperimentali, non eseguite in questa sede, si può concludere però che nel caso di correnti di carica e scarica di tipo impulsivo, la batteria non subisca grandi riduzioni della vita se sottoposta a correnti fino a 10 volte la corrente nominale. Perciò in questa trattazione, non basandoci su dati reali dei costruttori, ma su prove sperimentali, alla batteria utilizzata sarà consentito di erogare o assorbire correnti di carica o scarica fino a dieci volte la corrente nominale, purché queste si mantengano di tipo impulsivo. In generale, i costruttori per le batterie a alta potenza come quella che verrà utilizzata considerano come tempo nominale di scarica 1h (e non 10 ore come invece si utilizza per le batterie che lavorano in energia).

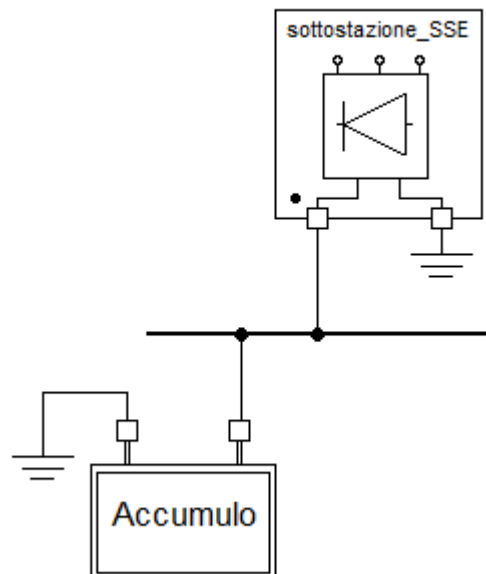
Ovviamente, nel caso in cui si voglia ridurre le correnti massime di batteria rispetto alla corrente nominale stessa, si potrà scegliere una batteria con una capacità nominale maggiore. Questo permetterà inoltre che il SOC abbia delle fluttuazioni percentuali ancora più ridotte rispetto al caso in esame.

La batteria scelta per compiere le simulazioni è una batteria al litio da 100Ah. Per quanto detto sopra perciò, la sua corrente nominale è di 100 A e le correnti di carica e scarica massima a cui può essere sottoposta durante la sua vita sono di 1000 A, purché di tipo impulsivo. Le tensioni di cella massima e minima considerate per la batteria in questione durante le simulazioni sono di 4.1V e 3.4V. La batteria ha 220 celle in serie, a cui corrisponde una tensione minima di 748 V e una tensione massima di piena carica

pari a 902 V. Lo stato di carica di partenza per la batteria durante le prove è stato considerato pari a 0.5, ossia con batteria a metà carica. Per la resistenza interna (di cella) si è supposto un valore di  $0.0003\Omega$ .

### 5.1.3 Scelta dello schema di inserzione

Come noto le batterie possono essere direttamente collegate alla sbarra DC di sottostazione oppure essere interfacciate tramite un convertitore statico. Nel primo caso gli scambi energetici non sono controllabili a priori, ma la soluzione risulta semplice, molto economica ed affidabile. Nell'altro caso invece il convertitore di interfacciamento permette di ottenere un miglior controllo della batteria e degli scambi energetici con la rete, ma dall'altro lato richiede l'installazione di un componente aggiuntivo (chopper) con costi abbastanza elevati e con un incremento dell'energia recuperata piuttosto modesto. Pertanto, si è scelto l'inserzione diretta della batteria secondo lo schema sotto riportato.



**Figura 39: Connessione diretta tra batteria e SSE**

## 5.2 Risultati di simulazione (Recupero modulato).

Con l'intento di rendere le cose molto più chiare per il lettore si preferisce fare prima un confronto dei vantaggi apportati dall'installazione di un sistema di accumulo gestionale all'interno del sistema ipotizzando i tram equipaggiati con un sistema di sfioro di tipo modulato. Come ricordo tale tipo di sfioramento garantisce che durante le frenate venga sempre inviata in linea la massima potenza recuperabile possibile, purché la tensione resti sempre limitata al più al valore massimo ammissibile (900V). In pratica, a differenza del recupero non modulato, in questo caso il recupero non viene mai completamente bloccato.

E' doveroso ricordare ancora una volta, come già ampiamente detto, che i tram nella realtà sono però equipaggiati con un sistema di sfioro di tipo non modulato.

Ai fini teorici queste simulazioni che verranno presentate possono essere utilizzate dal lettore per capire anche le differenze che ci sono tra i due tipi di sfioro possibile. Ovviamente, fin da subito si capisce come i recuperi con il sistema di sfioramento modulato siano maggiori rispetto all'altro sistema.

Poiché attualmente, è impensabile poter sostituire la logica di sfioro a bordo tram ( a causa degli alti costi) le simulazioni riportate di seguito hanno solo una valenza teorica, ma sono utili ai fini di capire intimamente i problemi di cui si sta parlando (e dei vantaggi apportati dal sistema *distorage*).

A tal fine, saranno inizialmente riportati i risultati di simulazione ottenuti nel caso di recupero modulato senza sistema di accumulo gestionale e successivamente verranno riportati i risultati nel caso di recupero modulato e annesso sistema di accumulo. Il sistema di accumulo simulato presenta le caratteristiche descritte ampiamente in precedenza.

### 5.2.1 Recupero in linea con modulazione (metodo con sola valenza teorica)

Di seguito sono riportati i risultati di simulazione inerenti al caso di **solo recupero in linea con modulazione** ottenuti con le ipotesi precedentemente descritte. Come si ricorda il metodo presentato non è effettivamente utilizzato da TEB sulla tranvia in esame, ma viene riportato nella trattazione per avere maggiori dati di confronto su cui il lettore può sviluppare eventuali sue analisi critiche.

Per quanto concerne i **VALORI ORARI** delle energie di maggior interesse pratico, ossi l'energia erogata dalle SSE e l'energia recuperata, ottenute dalle simulazioni nel caso in esame si ottiene:

**Tabella 16: Valori orari dell'energia erogata dalle SSE e recuperata (recupero "modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	2,897	3,371	1,173	1,435
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,239	1,416	0,327	0,352
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,707	0,765	0,157	0,168

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (ancora su base oraria):

**Tabella 17: Valori orari delle energie di trazione alle ruote e al pantografo (recupero "modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	3,289	3,894	3,873	4,577
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,270	1,435	1,496	1,680
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,827	0,759	0,827	0,895

**Tabella 18: Valori orari delle energie di frenatura alle ruote e alla macchina elettrica (recupero "modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	2,477	2,973	1,987	2,385
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	0,935	1,089	0,751	0,873
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,504	0,579	0,404	0,464

Le ultime due tabelle, relative alle energie di trazione e di frenatura, sono state inserite solo per dovere di completezza. Chiaramente, queste ultime due tabelle restano le stesse a prescindere da quale sia il metodo gestione della frenatura elettrica (nessun recupero, recupero modulato o non, recupero e sistema di accumulo).

Per quanto riguarda invece i **VALORI GIORNALIERI** dell'energia erogata dalle SSE e dei recuperi ottenibili nelle varie giornate "tipo", calcolate con le formule precedentemente presentate, si ha:

**Tabella 19: Valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata (recupero "modulato")**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	12,373	3,437	2,719	0,755
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	33,373	9,270	11,137	3,094
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	23,895	6,638	5,959	1,655

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (base giornaliera):

**Tabella 20: Valori orari delle energie di trazione alle ruote e al pantografo**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	12,27775	3,410	14,47575	4,021
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	36,085	10,024	42,341	11,761
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	24,23	6,731	28,376	7,882

**Tabella 21: Valori orari delle energie di frenatura alle ruote e alla macchina elettrica**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	9,33375	2,593	7,48	2,078
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	27,437	7,621	22,003	6,112
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	18,359	5,100	14,719	4,089

Infine, considerando la tabella di pagina 36 in cui sono riportati i giorni feriali scolastici, feriali non scolastici e festivi su base annua sono state calcolati i **VALORI ANNUI** delle energie erogate dalle SSE e i recuperi ottenibili.

**Tabella 22: Valori annui dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata (recupero "modulato")**

	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>Recupero in linea modulato</b>	8990,170	2497,269	2670,939	741,928

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (base annua):

**Tabella 23: Valori annui delle energie di trazione e frenatura ai vari elementi principali**

ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
9460,853	2628,014	11104,191	3084,497
ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
7187,874	1996,631	5763,376	1600,937

### 5.2.2 Recupero in linea con modulazione e sistema di accumulo associato

Di seguito sono riportati i risultati di simulazione inerenti al caso di **recupero in linea con modulazione con opportuno sistema di accumulo associato**. I risultati di simulazione sono riferiti al caso di una **singola batteria installata nella SSE di Alzano Maggiore** (SSE4 nel modello).

Per quanto concerne i **VALORI ORARI** delle energie di maggior interesse pratico, ossi l'energia erogata dalle SSE e l'energia recuperata, ottenute dalle simulazioni nel caso in esame si ottiene:

**Tabella 24: Valori orari dell'energia erogata dalle SSE e recuperata (recupero modulato e singolo accumulo)**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	2,632	3,082	1,473	1,767
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,032	1,194	0,559	0,608
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,544	0,615	0,319	0,345

Per quanto riguarda invece i **VALORI GIORNALIERI** dell'energia erogata dalle SSE e dei recuperi ottenibili nelle varie giornate "tipo", calcolate con le formule precedentemente presentate, si ha:

**Tabella 25: Valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	9,923	2,756	5,580	1,550
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	29,288	8,136	15,837	4,399
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	20,136	5,593	10,287	2,858

Infine, considerando la tabella di pagina **Errore. Il segnalibro non è definito.** in cui sono riportati i giorni feriali scolastici, feriali non scolastici e festivi su base annua sono state calcolati i **VALORI ANNUI** delle energie erogate dalle SSE e i recuperi ottenibili.

**Tabella 26: Valori annui dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
	7714,004	2142,779	4144,162	1151,156

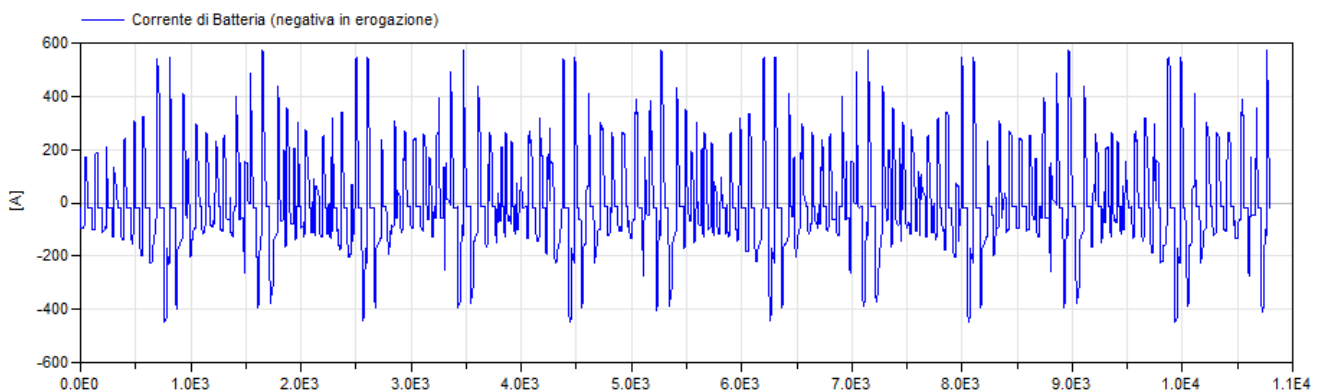
Per i valori delle energie di pura trazione e frenatura si rimanda al caso con solo recupero (modulato o non), in quanto i valori sono identici.

Chiaramente le simulazioni riportate sopra sono relative al caso teorico in cui i tram sono equipaggiati con un sistema di sfioro di tipo modulato. Confrontati con i risultati presentati nel precedente capitolo si nota come l'utilizzo di un semplice recupero modulato in sostituzione a quello attuale permetterebbe già di per se buoni vantaggi energetici. Tal soluzione sarebbe la migliore scelta da adottare ogni qual volta siamo in presenza di sistemi di trazione con recupero in linea (con o senza presenza di *storage* gestionale).

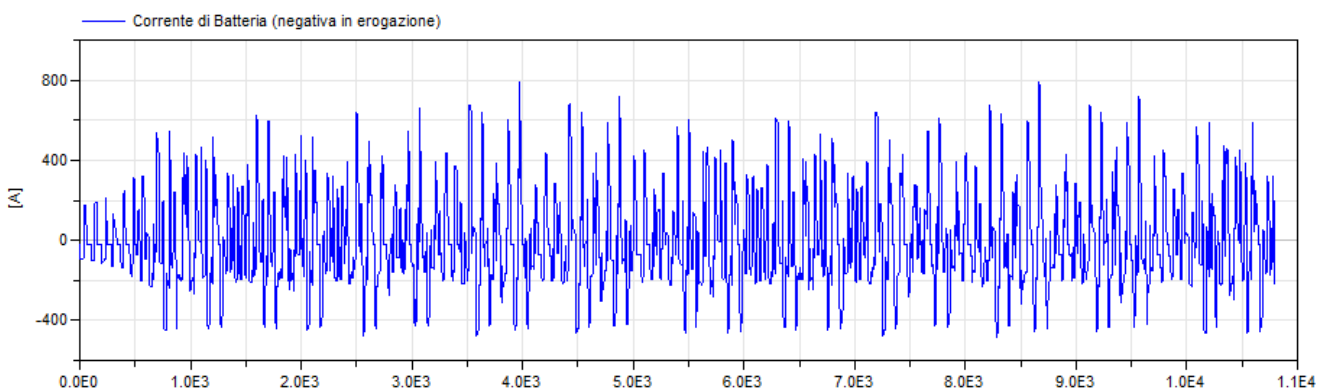
A seguito dell'installazione del sistema di accumulo si vede inoltre, come i recuperi ottenibili crescano ancora in maniera molto marcata. Il sistema di accumulo permette cioè di migliorare l'efficienza energetica del sistema complessivo e perciò garantisce al gestore della tranvia riduzioni dei consumi di energia alle sottostazioni elettriche, e di riflesso vantaggi economici.

Sotto si riportano anche i grafici ottenuti in fase di simulazione per quanto riguarda le correnti a cui la batteria è sottoposta durante il suo funzionamento nel sistema in esame e l'andamento dello stato di carica dello stesso.

Per quanto concerne le correnti erogate o assorbite dalla batteria nel caso dei tre possibili tipi di servizio si ottengono i seguenti grafici:



**Figura 40: Andamento delle correnti di batteria - Servizio Festivo**



**Figura 41: Andamento delle correnti di batteria - Servizio di Morbida**

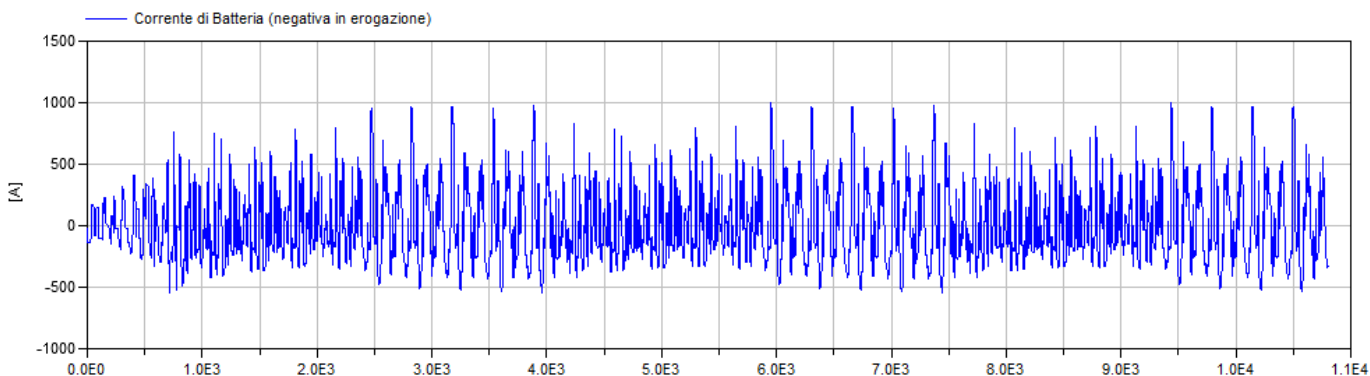


Figura 42: Andamento della corrente di batteria - Servizio di Punta

Per quanto riguarda invece l'andamento del SOC si ottiene:

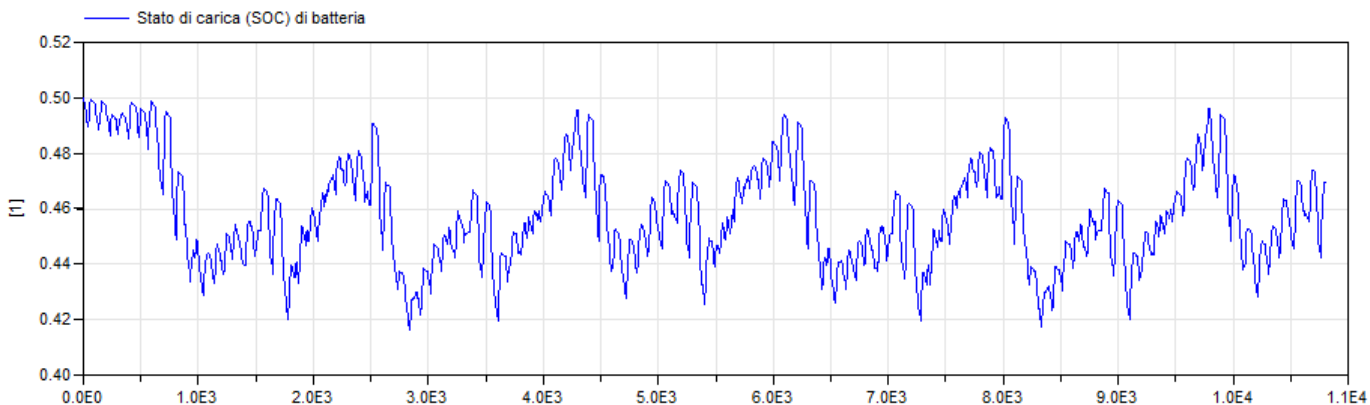


Figura 43: Andamento del SOC di batteria - Servizio Festivo

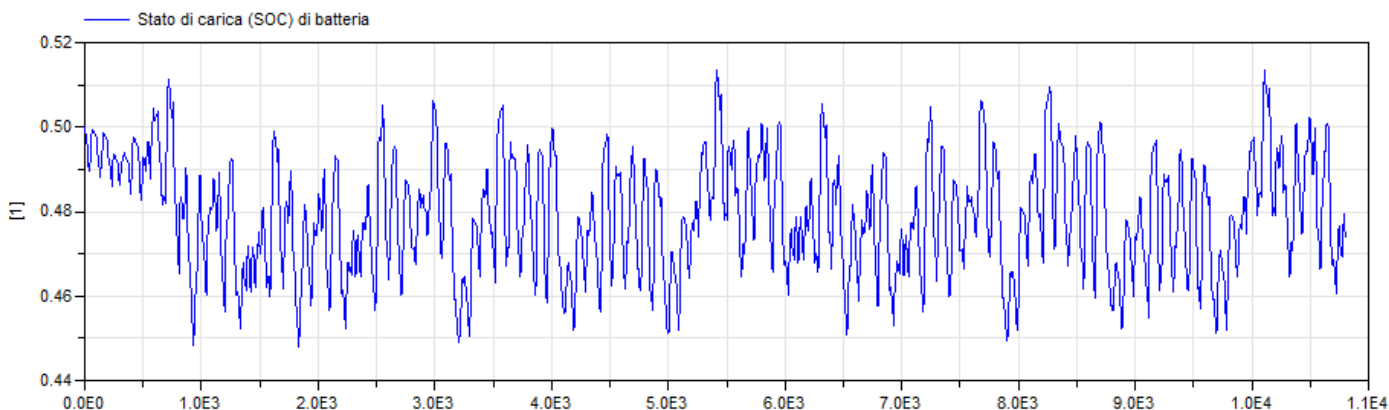
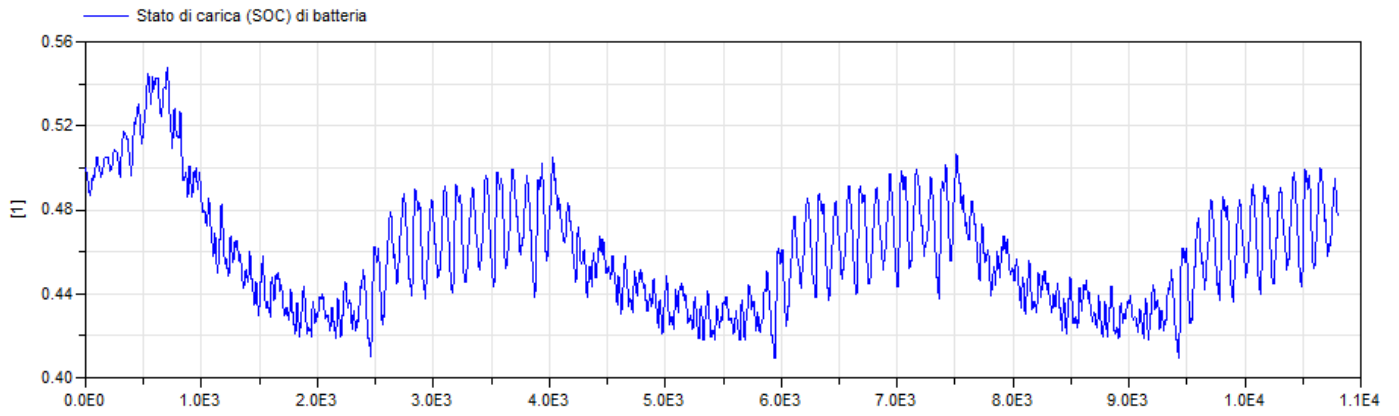


Figura 44: Andamento del SOC di batteria - Servizio di Morbida



**Figura 45: Andamento del SOC di batteria - Servizio di Punta**

### 5.3 Stima del recupero energetico in presenza di batteria con gli attuali veicoli

In questa sezione saranno presentati i risultati di simulazione ottenuti nel caso di tram con sistema di sfioro non modulato e presenza dell'accumulo (avente le caratteristiche descritte in precedenza).

Tali simulazioni sono di fondamentale importanza ai fini pratici poiché permettono di stimare i vantaggi che effettivamente il sistema di accumulo di tipo gestionale potrebbe garantire nella realtà fisica del problema.

Di seguito sono riportati i risultati di simulazione inerenti al caso di **recupero in linea senza modulazione con opportuno sistema di accumulo associato**.

Per quanto concerne i **VALORI ORARI** delle energie di maggior interesse pratico, ossia l'energia erogata dalle SSE e l'energia recuperata, ottenute dalle simulazioni nel caso in esame si ottiene:

**Tabella 27: Valori orari dell'energia erogata dalle SSE e recuperata (recupero non modulato e singolo accumulo)**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	3,129	3,666	0,826	1,001
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,262	1,471	0,241	0,274
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,669	0,762	0,143	0,163

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (ancora su base oraria):

**Tabella 28: Valori orari delle energie di trazione alle ruote e al pantografo (recupero "non modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	3,289	3,894	3,873	4,577
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,270	1,435	1,496	1,680
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,827	0,759	0,827	0,895

**Tabella 29: Valori orari delle energie di frenatura alle ruote e alla macchina elettrica (recupero "non modulato")**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	2,477	2,973	1,987	2,385
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	0,935	1,089	0,751	0,873
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,504	0,579	0,404	0,464

Per quanto riguarda invece i **VALORI GIORNALIERI** dell'energia erogata dalle SSE e dei recuperi ottenibili nelle varie giornate "tipo", calcolate con le formule in precedenza presentate, si hanno:

**Tabella 30: Valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	12,290	3,414	2,629	0,730
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	35,445	9,846	8,118	2,255
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	24,798	6,888	4,625	1,285

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (base giornaliera):

**Tabella 31: Valori orari delle energie di trazione alle ruote e al pantografo**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	12,27775	3,410	14,47575	4,021
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	36,085	10,024	42,341	11,761
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	24,23	6,731	28,376	7,882

**Tabella 32: Valori orari delle energie di frenatura alle ruote e alla macchina elettrica**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	9,33375	2,593	7,48	2,078
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	27,437	7,621	22,003	6,112
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	18,359	5,100	14,719	4,089

Infine, considerando la tabella in cui sono riportati i giorni feriali scolastici, feriali non scolastici e festivi su base annua sono state calcolati i **VALORI ANNUI** delle energie erogate dalle SSE e i recuperi ottenibili.

**Tabella 33: Valori annui dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
	9403,569	2612,103	2043,251	567,570

Sotto si riportano anche le energie complessive di trazione e di frenatura (base annua):

**Tabella 34: Valori annui delle energie di trazione e frenatura ai vari elementi principali**

ENERGIA TRAZIONE ALLE RUOTE		ENERGIA TRAZIONE AL PANTOGRAFO	
[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
9460,853	2628,014	11104,191	3084,497
ENERGIA FRENATURA ALLE RUOTE		ENERGIA FRENATURA ALLA MACC. ELET.	
[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
7187,874	1996,631	5763,376	1600,937

Confrontando l'energia erogata dalle sottostazioni del caso in esame con il caso di solo recupero in linea non modulato (ossia con l'attuale gestione) si può notare come i valori di energia erogate dalle SSE siano nettamente inferiori.

Ricordo che nel caso di solo recupero non modulato l'energia erogata dalle SSE su base annua era pari a circa 2868 MWh mentre in questo caso si ha un'energia erogata da parte delle SSE ancora su base annua di circa 2612 MWh. Si ottiene cioè un risparmio annuo pari a 256 MWh che in termini percentuali risulta pari al 9%.

Tutto ciò dimostra come l'installazione di un sistema di accumulo all'interno del sistema tranviario preso a riferimento si vantaggioso ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica complessiva del sistema stesso. Il sistema di accumulo permette di recuperare buona parte dell'energia di frenatura e renderla disponibile nelle successive fasi quando uno o più tram possono utilizzare tale energia. L'accumulo in pratica, permette al sistema di svincolarsi dalla semplice gestione *just in time*.

Questo fa sì che le sottostazioni debbano assorbire meno energia dagli impianti di produzione a monte con risparmi importanti per il gestore.

Si fa notare nuovamente, che per garantire ottime possibilità di analisi critiche sono stati considerati nelle precedenti simulazioni ambo i sistemi di recupero possibili, ossia con modulazione e senza modulazione. Questo permette al lettore di comprendere a fondo i vantaggi o gli svantaggi che possono derivare dall'uso di uno o dell'altro sistema di sfioro. Resta ben inteso che poiché la tranvia oggetto di studio utilizza come metodo di recupero quello senza modulazione, i veri risultati di simulazione da prendere in considerazione per analizzare eventuali azioni migliorative sono quelli associati a tal tipo di recupero. L'altro sistema di sfioro (con modulazione) resta solo un caso teorico ma comunque molto esplicativo dei vantaggi che si potrebbero ottenere utilizzando tal tipo di recupero.

## 6 Stima del recupero con più sistemi di accumulo.

### 6.1 Introduzione

In questa sezione saranno presi in esame i risultati di simulazione ottenuti nel caso in cui il sistema di accumulo non sia unico, ma bensì si abbiano due sistemi di accumulo distribuiti in maniera ottimale nel sistema tranviario.

Come si può intuire già a priori la scelta ottimale del posizionamento degli accumuli in questo caso non sarà da ritrovarsi in una posizione intermedia del sistema.

Per massimizzare i recuperi essi dovranno essere posti in sottostazioni abbastanza estreme ma non troppo.

Nel simulazioni presentate sotto si ipotizza che una delle due batterie sia installata all'interno della SSE di San Fermo (SSE nel modello) e l'altra all'interno della SSE di Pradalunga (SSE8 nel modello) .



Figura 46: Posizionamento dei due sistemi di accumulo di tipo gestionale

In ambo i casi si considera ancora l'utilizzo di batterie da 100Ah. Si specifica infine che i risultati di simulazione tengono di conto di pause fisse alle stazioni di 34 secondi e che le energie di interesse annue, giornaliere e orarie sono stati calcolate con il metodo di calcolo presentato nella precedente sezione.

Per rendere completa la trattazione verranno riportati sia i risultati di simulazione ottenuti nel caso di recupero modulato sia nel caso di recupero non modulato.

## 6.2 Risultati di simulazione

### 6.2.1 Recupero non modulato e doppio sistema di accumulo.

Per quanto concerne i **VALORI ORARI** delle energie di maggior interesse pratico, ossia l'energia erogata dalle SSE e l'energia recuperata, ottenute dalle simulazioni nel caso in esame si ottiene:

**Tabella 35: Valori orari dell'energia erogata dalle SSE e recuperata (recupero non modulato e singolo accumulo)**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	Fase di Avviamento	Fase di Regime	Fase di Avviamento	Fase di Regime
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	2,770	3,322	1,246	1,509
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	1,070	1,305	0,451	0,523
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,582	0,655	0,211	0,267

Per quanto riguarda invece i **VALORI GIORNALIERI** dell'energia erogata dalle SSE e dei recuperi ottenibili nelle varie giornate "tipo", calcolate con le formule precedentemente presentate a pagina **Errore. Il segnalibro non è definito.**, si ha:

**Tabella 36: Valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	10,571	2,936	4,283	1,190
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	31,718	8,811	13,558	3,766
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	21,950	6,097	8,819	2,450

Infine, considerando la tabella in cui sono riportati i giorni feriali scolastici, feriali non scolastici e festivi su base annua sono state calcolati i **VALORI ANNUI** delle energie erogate dalle SSE e i recuperi ottenibili.

**Tabella 37: Valori annui dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
	8346,580	2318,494	3493,469	970,408

Per i valori delle energie di pura trazione e frenatura si rimanda ai casi precedenti, in quanto i valori sono identici.

## 6.2.2 Recupero modulato e doppio sistema di accumulo.

Per quanto concerne i **VALORI ORARI** delle energie di maggior interesse pratico, ossi l'energia erogata dalle SSE e l'energia recuperata, ottenute dalle simulazioni nel caso in esame si ottiene:

**Tabella 38: Valori orari dell'energia erogata dalle SSE e recuperata (recupero modulato e doppio accumulo)**

TIPOLOGIA DI SERVIZIO	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	<i>Fase di Avviamento</i>	<i>Fase di Regime</i>	<i>Fase di Avviamento</i>	<i>Fase di Regime</i>
	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
<b>SERVIZIO DI PUNTA</b>	2,333	2,783	1,774	2,120
<b>SERVIZIO DI MORBIDA</b>	0,889	1,048	0,694	0,801
<b>SERVIZIO FESTIVO</b>	0,572	0,601	0,297	0,334

Per quanto riguarda invece i **VALORI GIORNALIERI** dell'energia erogata dalle SSE e dei recuperi ottenibili nelle varie giornate "tipo", calcolate con le formule precedentemente presentate a pagina 36, si ha:

**Tabella 39: Valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
<b>GIORNO FESTIVO</b>	9,737	2,705	5,391	1,497
<b>FERIALE-SCOLASTICO</b>	26,041	7,234	19,866	5,518
<b>FERIALE-NON SCOLAST.</b>	17,657	4,905	13,510	3,753

Infine, considerando la tabella di pagina 37 in cui sono riportati i giorni feriali scolastici, feriali non scolastici e festivi su base annua sono state calcolati i **VALORI ANNUI** delle energie erogate dalle SSE e i recuperi ottenibili.

**Tabella 40: Valori annui dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata**

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA (NON SFIORATA)	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
	6940,264	1927,851	5069,708	1408,252

Come sopra per i valori delle energie di pura trazione e frenatura si rimanda ai casi precedenti, in quanto i valori sono identici.

## 7 Conclusioni

Lo studio mostra come l'installazione di un sistema di accumulo nelle sottostazioni di alimentazione di una linea tranviaria, in generale, può consentire una diminuzione dell'energia assorbita dalla rete con un consistente risparmio energetico ed economico nell'esercizio degli impianti. Ciò è dovuto al fatto che l'accumulo permette di svincolare il recupero dell'energia da un assorbimento *just in time* della stessa dai treni presenti in linea .

Nel caso studio della Tranvia delle Valli Bergamasche le stime del risparmio energetico risultano come da tabella seguente.

Caso	Energia erogata da SSE [MWh]	Minore erogazione [MWh]	Risparmio %
Sistema attuale	<b>2868</b>	-	-
Un solo sistema di accumulo nella SSE a metà linea	<b>2612</b>	<b>256</b>	<b>9</b>
Due sistemi di accumulo nelle SSE alle estremità della linea	<b>2318</b>	<b>550</b>	<b>19</b>

E' da notare che se si modificassero i controlli dei treni in modo da poter effettuare un recupero modulato, così come indicato in precedenza nel documento, sarebbe possibile aumentare ulteriormente il risparmio energetico con lo stesso accumulo, come ad esempio nel caso di un solo sistema di accumulo si passerebbe dal 9% al 14%.

Al fine del dimensionamento del sistema di accumulo, per lo schema più semplice ( e meno costoso) di accumulatore direttamente collegato alla linea di trazione, si nota che la variazione dello stato di carica è limitata : per un sistema da 100 Ah di capacità è di circa il 9%. Pertanto si può dedurre che il flusso di energia scambiato non dimensiona l'accumulo.

Come mostrano, invece, le stime dell'andamento della corrente scambiata con il sistema di accumulo, l'accumulatore è dimensionato dalla massima corrente scambiata: nei casi esaminati di circa 10 volte la corrente di scarica della capacità nominale alla scarica di 1h, compatibile con un accumulatore Litio-ioni di ultima generazione.

Al cambiare della tecnologia dell'accumulatore utilizzato occorre determinare quale sia la massima corrente accettata in carica e quindi la capacità dello stesso. Questo dato non sempre è riportato dal costruttore dell'accumulatore, si rende quindi necessario, per un corretto dimensionamento, stimare l'andamento della corrente scambiata con i sistemi di accumulo, simulando il comportamento del sistema

di trasporto, quindi verificare sperimentalmente in laboratorio, su un modulo del sistema di accumulo, l'effettiva risposta del sistema stesso.

## 8 Appendice

### 8.1 *Dettagli di modellazione del sistema*

#### 8.1.1 Generalità sulle simulazioni e il software utilizzato.

In questo lavoro la modellazione, dei vari componenti e sotto-componenti presentati nella trattazione in esame, è stato sviluppato tramite il software di simulazione dinamica Dymola 2013:



Figura 47: Logo software di simulazione Dymola

Come ben noto, Dymola (DynamicModelingLaboratory) è un ambiente di simulazione basato sul linguaggio di modellazione open-Modelica. Con tal software è possibile simulare il comportamento dinamico e le complesse interazioni tra i sistemi di molti settori dell'ingegneria, come: meccanica, elettrica, termodinamica, idraulica, pneumatica, termica e sistemi di controllo. Attraverso l'uso di Dymola si possono costruire modelli integrati o modificare quelle già esistenti, per rispondere a specifiche esigenze di modellazione e simulazione, e ottenere dalle simulazioni risultati che rappresentano nel modo più corretto e dettagliato possibile il sistema reale.

Il linguaggio di programmazione Modelica®, su cui Dymola si appoggia:



Figura 48: Logo del linguaggio Modelica®

è invece, un linguaggio di modellazione ad oggetti open source gestito dalla ModelicaAssociation utilizzato per descrivere il comportamento di sistemi multi dominio di grandi dimensioni, complessi ed eterogenei. L'approccio Modelica si basa su una descrizione "a blocchi" degli oggetti da simulare, a partire da uno schema funzionale del sistema.

In Modelica i componenti sono descritti matematicamente tramite equazioni algebriche, differenziali e discrete. Modelica è stato progettato in modo tale che possano essere utilizzati algoritmi avanzati noti in

letteratura per la gestione efficiente di modelli di grandi dimensioni con più di centinaia di migliaia di equazioni.

La chiave del successo di Modelica per la modellazione di sistemi complessi è il riutilizzo di modelli. Nel corso degli anni vi sono stati numerosi tentativi di creazione di un linguaggio di modellazione ad oggetti di sistemi tecnici complessi, con queste caratteristiche, tuttavia, prima di Modelica, il riutilizzo di componenti era sempre e solo basato su formati standard.

Ad oggi Dymola è l'unico tool completamente compatibile con le librerie di Modelica e gli standard del linguaggio Modelica, di cui durante la modellizzazione dei vari componenti e sotto-componenti sviluppati in questa trattazione si è fatto largo uso.

### 8.1.2 Dettagli di modellazione della Linea di Alimentazione.

Risulta utile ai fini di garantire una completa comprensione della trattazione di spiegare in maniera più esaustiva la modellazione della linea di alimentazione.

Per capire i problemi che sono collegati alla modellazione della linea di contatto, che come si ricorda è una rete **tempo variante**, e per rendere le cose abbastanza chiare è stato supposto di basare l'analisi su un numero limitato di SSE (4 in questo caso). Ovviamente, le osservazioni che verranno fatte saranno facilmente estendibili anche a un numero maggiore di sottostazioni come effettivamente è nella realtà fisica del sistema reale.

Supponiamo, perciò, di riferirsi alla seguente situazione:

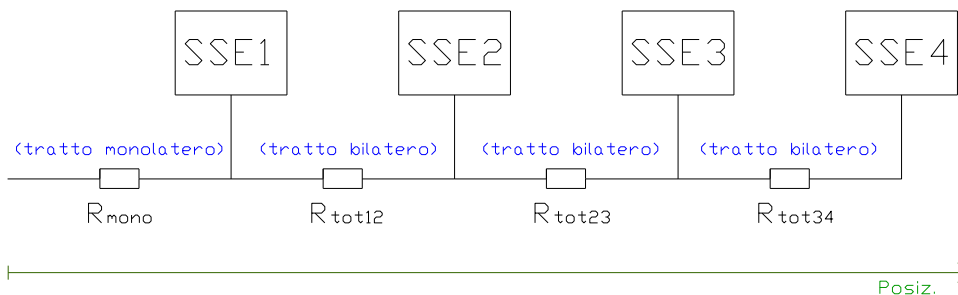


Figura 49: Esempio di studio con 4 SSE

Per affrontare il problema di modellazione il primo passo che è stato seguito è inserire un indice (z) per ogni tratta che si incrementa o decrementa ogni volta che il tram supera la posizione fisica di una sottostazione(SSE).

La cosa si chiarisce molto bene con il seguente esempio:

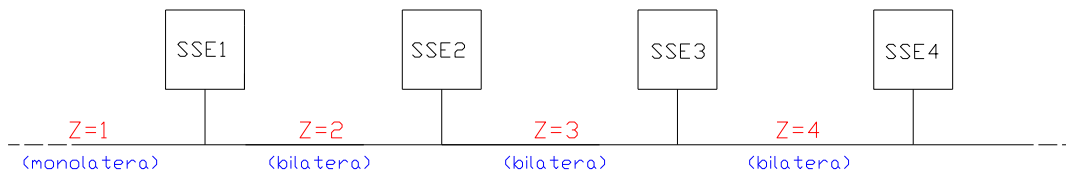


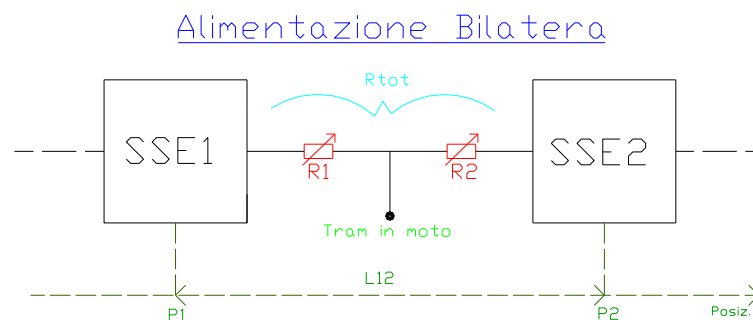
Figura 50: Gestione indice di tratta (z)

Via via che il tram oltrepassa una tratta compresa tra due sottostazioni l'indice varia il suo valore numerico. Così facendo, si riesce a gestire al meglio i problemi di cui sarà parlato sotto e inoltre si riesce a rendere il codice Modelica associato al componente semplice, ordinato e intuitivo.

Per il binario pari è stato considerato un indice di tratta variabile tra 1 e 4, crescente da sinistra a destra, mentre per il binario dispari un indice di tratta da 5 a 8 ancora crescente da sinistra a destra.

Cosa importante da notare è il concetto di *tempo variante*, usato precedentemente, legato al fatto che durante il moto del tram tra le due SSE alimentanti il rotabile in ogni momento vede a destra e a sinistra dello stesso due resistenze tempo varianti con la posizione del convoglio.

Come si può ben intuire, perciò, nel caso di alimentazione bilaterale (in generale) la resistenza complessiva della linea può quindi essere scomposta in due resistenze “fittizie” e tempo varianti, una a sinistra e una a destra della posizione attuale del veicolo:



**Figura 51: Modellazione alimentazione bilaterale.**

Infatti, via via che il tram procede nel suo moto (ad esempio da sinistra a destra) la resistenza trasversale sinistra ( $R_1$ ) vista dalla SSE1 tenderà a crescere e la resistenza trasversale di destra ( $R_2$ ) vista dalla SSE2 tenderà a ridursi fino ad annullarsi quando il tram si trova proprio in prossimità della SSE2.

Il problema descritto suggerisce una semplice modellazione della linea con l'uso di resistenze variabili il cui valore cambia in funzione della posizione del convoglio secondo le seguenti espressioni:

$$R_1 = (1 - \alpha)R_{tot} \quad e \quad R_2 = \alpha R_{tot}$$

In cui:

$$\alpha = (P_2 - Posizione)/L_{12}$$

e dove con “Posizione” è indicata la posizione attuale del tram all'interno della tratta.

Si fa notare che mentre il tram procede nella sua marcia poiché nel punto in cui il tram assorbe deve esserci la stessa tensione sia da destra che da sinistra, mentre il tram ad esempio si sposta da sinistra verso destra la SSE1 tenderà ad erogare sempre meno corrente e la SSE2 a erogare sempre di più ( $R_1$  cresce e  $R_2$  decresce).

Nel caso teorico in cui la SSE fosse modellata come un semplice generatore di tensione (senza la resistenza fittizia in serie) quando il tram si trova pari alla posizione in cui è posta la SSE1 erogherebbe corrente solamente la SSE1 e quando è pari alla SSE2 erogherebbe solamente la SSE2. In questo caso, invece, poiché è presente anche una resistenza fittizia in serie al generatore che modella le SSE, anche nel caso in cui il

tram abbia una posizione perfettamente uguale a quella di una delle due sottostazioni (SSE1 o SSE2) comunque l'altra SSE eroga ugualmente, anche se poco, corrente verso il tram.

Sotto è riportata una porzione di modello della "Rete di Alimentazione" realizzato su Dymola , in cui è possibile osservare come sono state implementate le resistenze longitudinali tra due SSE:

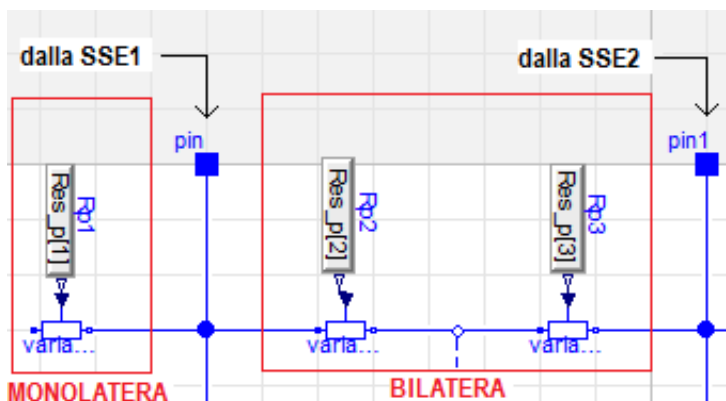


Figura 52: Porzione di modello implementato su Dymola

Nel caso della tratta a alimentazione monolaterale che come si ricorda riguarda soltanto la prima stazione di Bergamo, essa è stata invece modellata solamente con una resistenza variabile secondo la seguente funzione:

$$R_{mono} = \alpha R_{tot}$$

Dove

$$\alpha = (P_1 - Posizione)/L_0$$

e dove con "Posizione" è indicata la posizione attuale del tram all'interno della tratta.

### Alimentazione Monolaterale

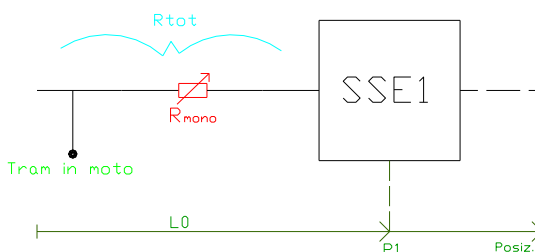


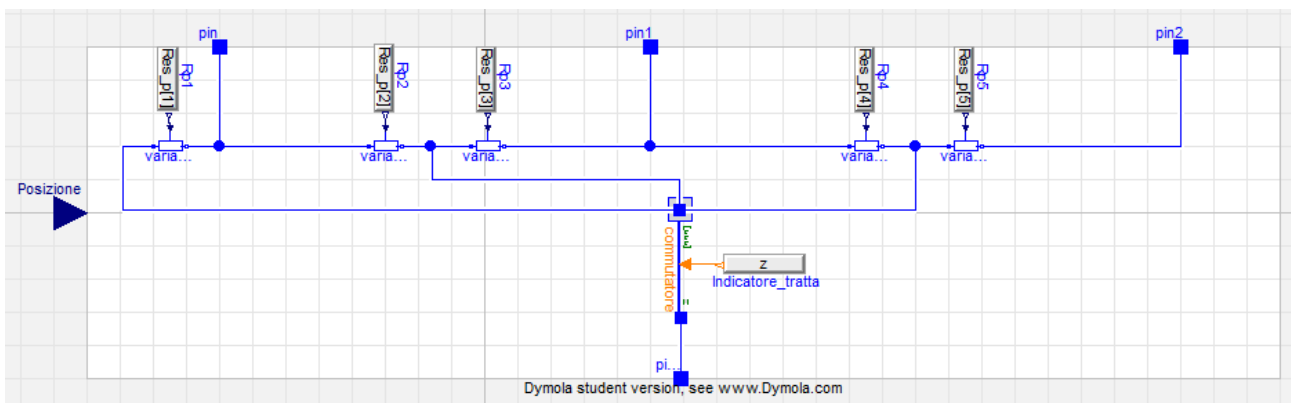
Figura 53: Modellazione alimentazione monolaterale

Come sarà possibile vedere successivamente, un input del componente "Linea di Alimentazione" è proprio la posizione del veicolo. Con quest'ultimo segnale, infatti, tramite alcune righe di codice Modelica è

possibile gestire in maniera semplice i valori che devono assumere le resistenze longitudinali via via che il convoglio avanza.

Nel caso in cui il tram sia in una certa tratta il valore delle resistenze longitudinali comprese tra le due SSE della tratta “attuale” varieranno in base alla posizione del tram, mentre il resto delle resistenze resteranno costanti. In questo caso è stato scelto di impostare per le tratte, non interessate in quell’istante da nessun tram, la resistenza longitudinale di sinistra e destra pari alla metà del valore totale della resistenza di quella tratta, così che la somma complessiva delle due resistenze sia pari alla resistenza complessiva della linea compresa in quella tratta.

Un primo schema implementato su Dymola per la modellazione della rete di alimentazione è il seguente (non è quello completo, che verrà fornito successivamente):



**Figura 54: Implementazione del modello su Dymola (SINGOLO BINARIO)**

Nella figura sopra si è riportato lo schema del singolo binario con un solo tram in linea, con l’obiettivo di spiegare e evidenziare in maniera semplice i concetti. Successivamente verrà riportato anche lo schema complessivo che sarà una variante più complessa di quello sopra, ma regolato dagli stessi principi di fondo . Come si può notare nello schema sopra, il componente in esame ha 4 pin positivi a cui nella realtà fanno capo i poli positivi delle varie sottostazioni. Tra due pin contigui sono presenti le due resistenze longitudinali di cui sopra è stato discusso. In input al componente si ha anche la posizione istantanea del convoglio, necessaria per variare in maniera opportuna le resistenze tra le due sottostazioni attive in un certo istante. Nello schema a doppio binario sarà inoltre presente un ingresso booleano che identifica la direzione (e quindi il binario) di ogni tram collegato alla linea. Per cercare di chiarire nel migliore dei modi quello che succede alle resistenze longitudinali nelle realtà fisica quando il tram ad esempio avanza da destra a sinistra sotto è riportato il grafico di come variano i valori delle resistenze longitudinali (Res\_p) tra le varie SSE al variare della posizione del veicolo durante il moto e perciò il passaggio da una tratta ad un'altra.

Supponendo che il convoglio si muova da sinistra verso destra quello che si ottiene è:

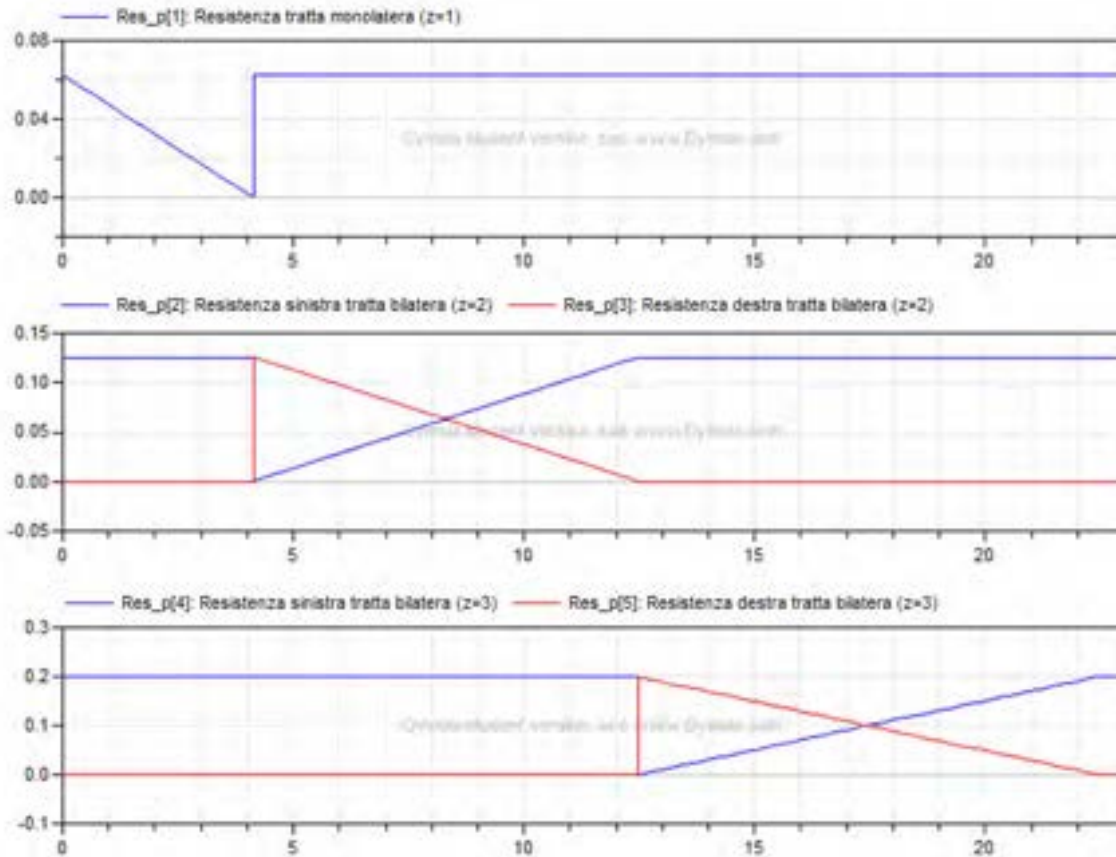


Figura 55: Andamento dei valori delle resistenze longitudinali delle varie SSE al variare della posizione del tram

Sull’asse delle ascisse ovviamente è indicato il tempo (in secondi).

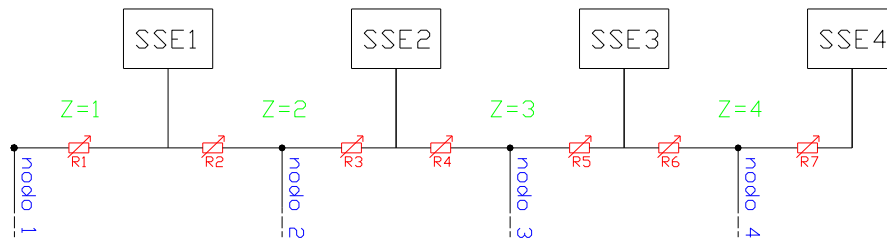
Come si può ben notare nello schema generale Dymola precedente è presente un ulteriore sotto-componente denominato “commutatore” che merita delle attenzioni particolari, identificato dalla seguente icona:



Figura 56: Icona del sotto-componente “Commutatore”

Fino ad ora è stato discusso su come far variare le resistenze longitudinali fittizie di linea al variare della posizione del tram senza preoccuparsi però di come modellare il fatto che durante il moto del veicolo nella realtà quest'ultimo è successivamente alimentato da coppie di SSE diverse che variano in base alla sua posizione.

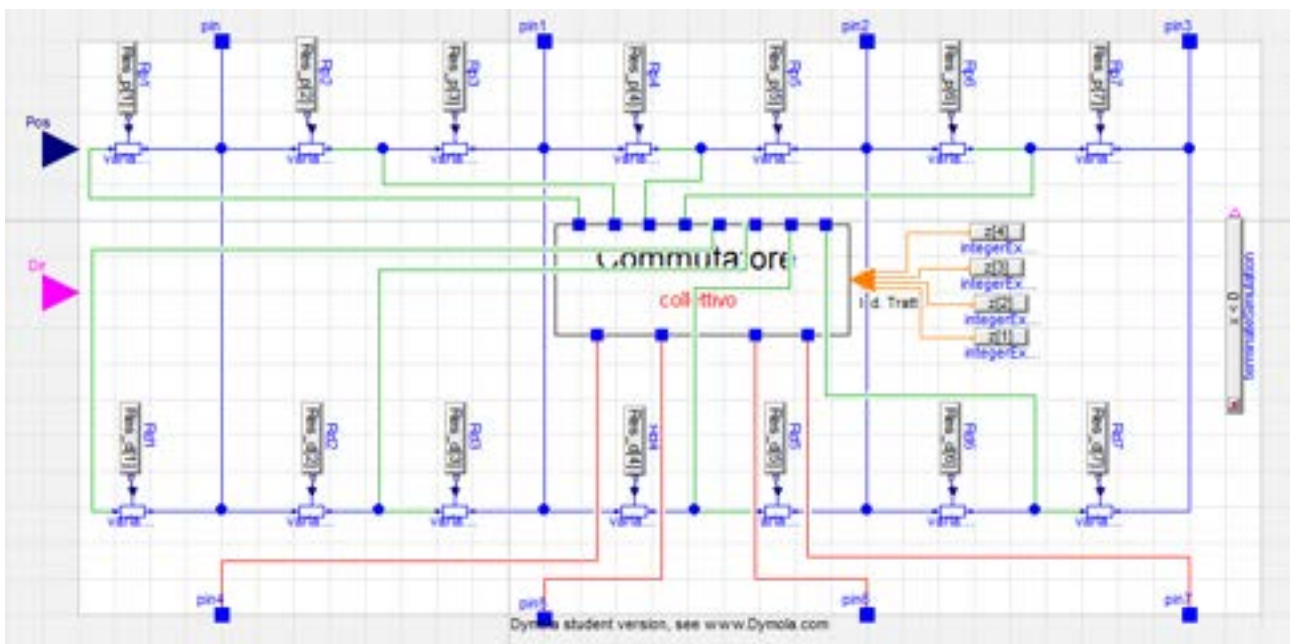
Il problema generale è riassunto e intuibile dalla seguente figura:



**Figura 57: Attivazione e disattivazione dei nodi di alimentazione del convoglio**

In sequenza, via via che il tram avanza, se quest'ultimo è nella prima tratta ( $z=1$ ) dovrà essere attivo il nodo 1 e disattivi tutti gli altri nodi, se il treno è nella seconda tratta ( $z=2$ ) dovrà essere attivo il nodo 2 e disattivi tutti gli altri nodi, se nella terza tratta ( $z=3$ ) dovrà essere attivo il nodo 3 e disattivi tutti gli altri e così via. Questo è proprio il ruolo che svolge il sotto-componente in esame durante il moto del convoglio, attivando o disattivando i vari nodi nel modo più opportuno.

Come detto in precedenza fino ad ora è stata presentata una rete a singolo binario con l'ipotesi di alimentazione di un solo tram. In realtà, poiché nel sistema reale la linea è a doppio binario e il numero di tram è maggiore di uno, lo schema complessivo che risulta implementato su Dymola è il seguente:



**Figura 58: Implementazione della linea a doppio binario su Dymola**

In questo caso si ipotizza, la presenza di quattro tram in linea, alimentati dai quattro pin elettrici della parte inferiore dello schema. I quattro pin nella parte superiore invece sono i pin a cui faranno capi i poli positivi delle quattro SSE (a cui tal trattazione si limita).

Come accennato in questo caso gli ingressi non elettrici del componente sono la posizione (Pos) nel tempo dei vari convogli collegati alla rete di contatto e le direzioni (Dir) dei vari convogli, in modo da variare in maniera opportuna le resistenze del binario su cui ogni tram viaggia in quell'istante. Quest'ultimo ingresso è di tipo booleano: alla condizione true è associato il binario pari (moto da sinistra a destra) e alla condizione false è associato il binario dispari (moto da destra a sinistra).

Entrambi gli input sono di tipo multiplo ognuno con dimensione pari al numero di tram in linea.

Chiaramente, nel caso di linea completa i pin nella parte in alta saranno dieci, ossia pari al numero di SSE complessive, e i pin nella parte inferiori saranno pari al numero massimo di tram in linea (quest'ultimi sono funzione del tipo di servizio: festivo, feriale scolastico o feriale non scolastico).

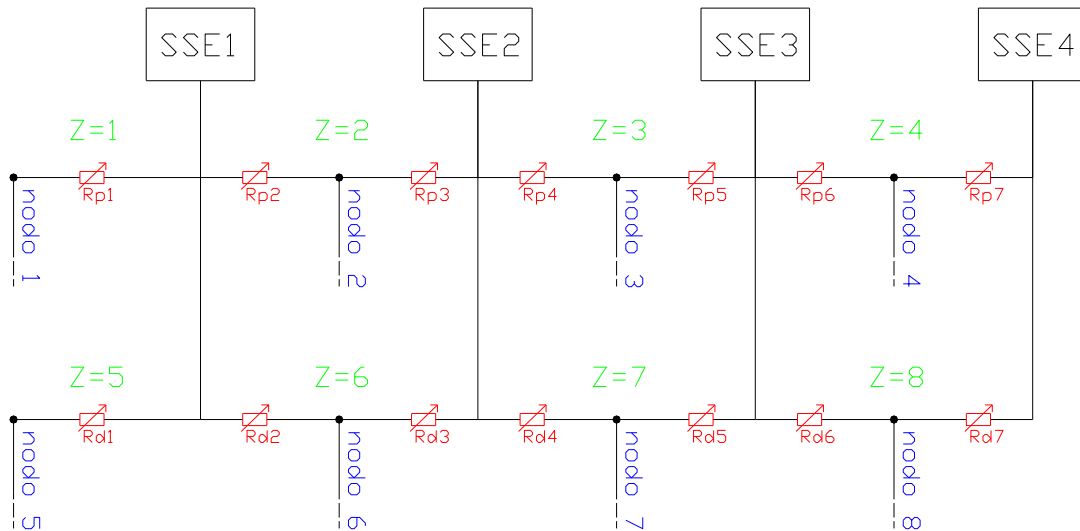
L'unica cosa da notare e per cui è giusto spendere alcune considerazioni è legata al sotto-componente indicato in figura con il nome di commutatore collettivo:



Figura 59: Icona del commutatore collettivo

L'input booleano in ingresso al componente è anch'esso di tipo multiplo, in numero pari al numero di tram, in quanto a ogni tram in ogni istante è associato un indice di tratta.

Tal componente in pratica è colui che gestisce in ogni istante il collegamento di ogni tram all'opportuno nodo di alimentazione a cui deve essere collegato. I nodi in questo caso ovviamente sono 8, quattro associati al binario dispari e quattro associati al binario pari:



**Figura 60: Nodi e indici di tratta**

I nodi 1, 2, 3 e 4 fanno riferimento al binario pari mentre i nodi 5,6,7,8 fanno riferimento al binario dispari. Ad esempio, un tram che ciclicamente parte da sinistra e procede verso destra su binario pari e ritorna su binario dispari sarà collegato ai vari nodi in questa sequenza:

*nodo1 → nodo2 → nodo3 → nodo4 → nodo8 → nodo7 → nodo6 → nodo5 → nodo1 →...*

All'interno del commutatore collettivo si ritrovano un numero di commutatori, del tipo precedentemente presentato, pari al numero di tram da alimentare. A ogni commutatore presente all'interno del commutatore collettivo, viene inviato istante per istante l'indice di tratta del tram a cui è associato, e istante per istante quest'ultimo effettua il collegamento opportuno al nodo a cui il tram deve essere collegato.

L'ipotesi, fino ad ora sottintesa, è che su ognuno dei binari la marcia dei tram sia da sinistra verso destra o da destra verso sinistra e non sia possibile una marcia mista su uno stesso binario. Nel proseguo, fin da subito si può dire che al binario pari sarà associato una marcia ipotetica dei tram da sinistra a destra e al binario dispari una marcia da destra a sinistra.

### 8.1.3 Dettagli di modellazione del Pilota

Con l'intenzione di spiegare in maniera leggermente più esaustiva la modellazione del "Pilota", sotto si riportano alcune informazioni aggiuntive a quelle già inserite precedentemente nella trattazione.

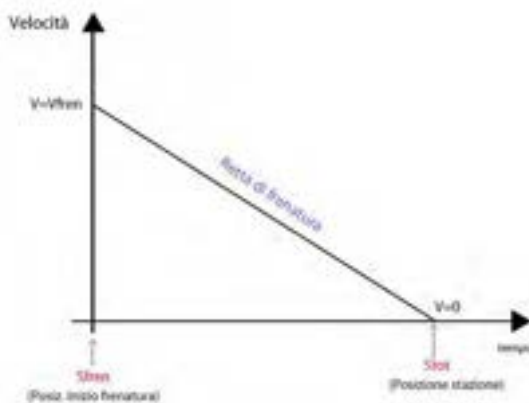
Come già detto tal componente, può essere definito come un oggetto, il quale in ingresso riceve un feedback di posizione e di velocità del convoglio, mentre in uscita fornisce un'opportuna forza (di trazione o frenante), oltre alla direzione del convoglio.

Per quanto riguarda la fase di trazione, un controllore puramente proporzionale fornisce la forza, opportunamente limitata per tenere di conto delle limitazioni di forza e potenza dell'azionamento, che istante per istante deve essere applicata al convoglio per raggiungere la velocità massima di riferimento prestabilita per la tratta percorsa.

Per quanto concerne la fase di frenatura invece, questa si attiva al raggiungimento da parte del convoglio di un'opportuna posizione, calcolata autonomamente dal simulatore per ogni tratto stazione-stazione che il treno deve percorrere, stimata in base alla velocità massima che il tram può raggiungere in quel tratto.

Per modellare la frenatura del convoglio, per ogni tratto stazione-stazione, viene calcolata la retta di frenatura per la quale dalla posizione in cui inizia la frenatura (con velocità diversa da zero) il tram raggiunge la posizione della stazione in cui deve arrestarsi con una velocità pari a zero.

L'equazione della retta di frenatura fornisce la velocità di riferimento che istante per istante il convoglio deve mantenere, e perciò, considerando che il tram ad inizio frenata ha una velocità iniziale pari a  $V_{fren}$  e una posizione iniziale pari a  $S_{fren}$  (ascissa di frenatura) e dovrà raggiungere una posizione pari a  $S_{tot}$  (ascissa della stazione in cui deve fermarsi) con velocità nulla, l'equazione della retta sarà del tipo:



$$V(t) = V_{fren} - \left[ \frac{V_{fren}^2}{2(S_{tot} - S_{fren})} \right] t$$

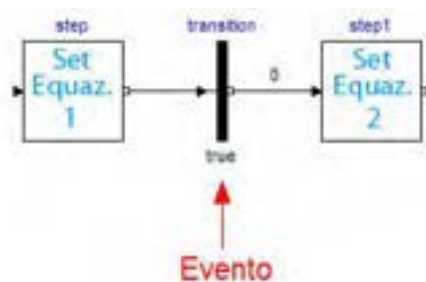
Figura 61: Retta di frenatura

Nota per ogni istante la velocità che il convoglio deve tenere per raggiungere la stazione prossima con velocità nulla, frenando dalla posizione opportunamente definita, con un controllore puramente proporzionale si ottiene la forza che quest'ultimo deve fornire al convoglio per fermarsi, previa correzione per considerare le limitazioni di forza e potenza dell'azionamento.

Infine, la fase di fermata, ossia l'intervallo di tempo in cui il tram nella realtà è fermo in stazione per permettere la discesa e la salita dei passeggeri, è stata modellata utilizzando o un tempo fisso di fermata o un generatore di tempi random (uniforme) opportunamente realizzato con una *functionDymola*. In realtà sono stati sviluppati due generatori casuali uno basato sul noto generatore congruenziale lineare (LCG) e l'altro basato sul più recente metodo di Wichmann-Hill. Poiché nelle simulazioni di questa trattazione non sono necessari elevate quantità di valori random entrambi i generatori sono risultati ampiamente sufficienti e ottimali. (Vedi capitolo Tecniche di Simulazione)

L'idea base seguita per l'implementazione del pilota sul software Dymola è stata sostanzialmente quella di dividere le varie fasi del moto del convoglio, ossia accelerazione, crociera, frenatura e fermata e rappresentare ogni fase tramite l'ausilio di *Stepse Transitions* presenti nella libreria StateGraph di Dymola. Si è realizzata cioè una simulazione continuo/discreta.

Tal componenti permettono di modellare il tutto come una macchina a stati finiti, ossia utilizzare durante la simulazione set di equazioni diverse in base al passo che è attivo in quell'istante. A seguito di un opportuno evento lo *step* collegato all'ingresso della transizione è disattivato ed è attivato lo *step* collegato all'uscita della stessa transizione, così da ottenere il passaggio da un set di equazioni ad un altro set:



**Figura 62: Principio di funzionamento dei componenti StateGraph**

In altre parole, quando l'evento associato alla transizione diventa vero, la transizione permette il passaggio dallo step attuale a quello successivo. L'utilizzo degli elementi della libreria *StateGraph*, oltre ad essere comodo in termini implementativi, permette anche di ottenere un'interfaccia grafica del componente molto intuitiva e ben ordinata (vedere sotto)

Per garantire al simulatore una miglior genericità possibile, nel modello è stata inserita anche la possibilità di far partire il tram con un tempo di ritardo. Questo permette ad esempio durante le simulazioni di far avviare i tram in tempi diversi così da permettere una partenza shiftata nel tempo degli stessi.

Anche questo aspetto è stato implementato con una logica che utilizza *state graph*. Tal *step* sarà attivo solamente all'avvio del tram mentre sarà escluso durante la sua marcia e le sue successive fermate.

Per completezza, sotto è riportato il risultato di una semplice simulazione in cui è possibile vedere l'output (forza di trazione o frenatura) fornita dal componente in esame:

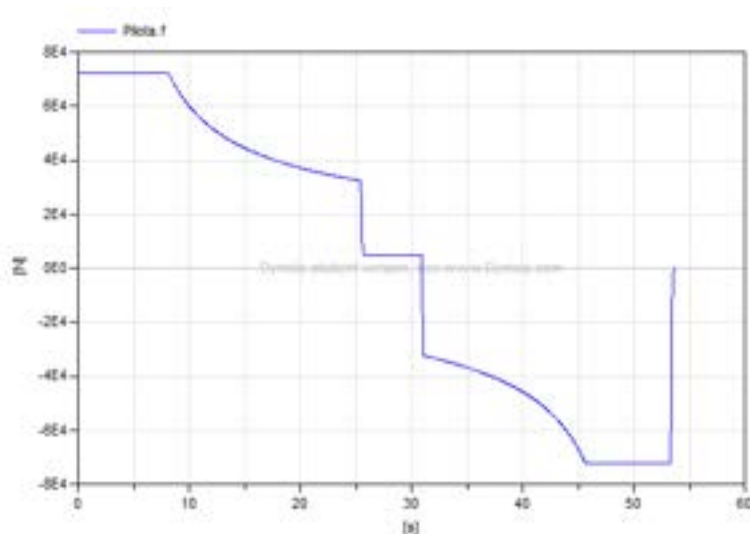


Figura 63: Forza di trazione e frenatura con limitazioni opportune (output componente “pilota”)

Come si può notare in uscita dal componente “pilota” si ottiene un’ottima modellazione della classica curva della forza di trazione e di frenatura che rispecchia perfettamente i limiti teorici di forza (a causa del problema dell’aderenza) e potenza (a causa dell’azionamento) di cui è stato precedentemente discusso. La forza residua nella parte centrale del grafico, è dovuta invece, al fatto che durante il moto alla velocità di crociera (costante), è necessario mantenere una forza di trazione per eguagliare quella resistente dovuta agli attriti meccanici e viscosi. Chiaramente, maggiore è la velocità di crociera e maggiore sarà tale forza residua.

## 8.2 Curricula del gruppo di lavoro

### Massimo Ceraolo (1960)

Ricercatore universitario dal 1992 professore Ordinario di Sistemi Elettrici per l’Energia dal 2002 presso la Facoltà di Ingegneria dell’Università di Pisa.

E’ docente degli insegnamenti di Sistemi Elettrici di Bordo presso l’Università di Pisa e presso l’Accademia Navale di Livorno.

La sua attività di ricerca nell’ultimo decennio si è prevalentemente sviluppata nel settore dell’accumulo elettrochimico dell’energia, e dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida.

Su questi ultimi temi stato autore negli ultimi 10-15 anni di oltre 40 pubblicazioni, prevalentemente a carattere internazionale, di cui si allegano i riferimenti.

Attualmente coordina lo sviluppo di un veicolo a propulsione elettrica alimentato a fuel-cell ad idrogeno.

E’ presidente del Corso di Dottorato in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto e membro del Comitato di Presidenza della Commissione Veicoli Elettrici Stradali.

### **Romano Giglioli**

Nato a San Gimignano (SI) il 02/06/1951, laureato con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1976, nello stesso anno ha ricevuto il premio di Economia e Tecnica dell'Energia "G. Levi Cases".

Dal 1994 è Professore Ordinario e ricopre la cattedra di "Sistemi Elettrici per l'Energia e tecnica ed Economia dell'energia".

#### **Attività di ricerca.**

Nell'arco di più di trenta anni di attività nel settore della ricerca, in collaborazione con strutture di ricerca pubbliche e private, sia nazionali che internazionali, ha contribuito, con studi teorici e sperimentali, all'innovazione e allo sviluppo di sistemi e dispositivi per la produzione, trasporto ed accumulo (in particolare elettrochimico) dell'energia elettrica e dei sistemi di conversione energetica, nonché dei sistemi di trasporto con propulsione elettrica ed ibrida. L'attività è testimoniata da oltre un centinaio di pubblicazioni, dalla titolarità di alcuni brevetti utilizzati nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia ed in quelli di conversione energetica e dalla realizzazione di numerosi sistemi e dispositivi prototipali.

Tale attività è stata ed è sviluppata anche come responsabile di numerosi contratti di ricerca e coordinatore di gruppi di lavoro nell'ambito dei Sistemi per l'Energia e di quelli per il Trasporto.

#### **Incarichi direttivi nell'ambito dell'Amministrazione Universitaria.**

Dal 1995 al 2002 ha assunto l'incarico di Direttore del Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa.

Dal 2005 al 2009 è stato Direttore del Master post laurea "Pianificazione e gestione di sistemi per l'energia da fonti rinnovabili", istituito dall'Università di Pisa con ENEL Produzione, CONFINDUSTRIA, Kyoto Club, Legambiente.

Dal 2006 è nel comitato direttivo del consorzio Interuniversitario CRIBE per la ricerca sulle biomasse ad uso energetico, che ha contribuito a costituire.

Dal 2007 è nel comitato direttivo del consorzio Nazionale Interuniversitario ENSIEI per la ricerca sui Sistemi per l'Energia, che ha contribuito a costituire.

Dal gennaio 2007 è membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università di Pisa

#### **Incarichi in strutture esterne all'Università.**

Dal 2003 al 2009 è membro del Consiglio di Amministrazione della società ITALCERTIFER (del gruppo Ferrovie dello Stato), società per la ricerca nell'ambito dei sistemi di trasporto e per l'omologazione dei mezzi di trasporto ferroviario. Dal 2005 al 2008 è stato delegato italiano nel mirror europeo per le "smart grids". È coordinatore scientifico nell'ambito del Consorzio Regionale per l'energia CET, di cui è stato promotore. Dal maggio del 2007 è membro del Consiglio del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano per la normativa elettrica). Valutatore di progetti di sviluppo precompetitivo L.n. 46/82 per conto del Ministero delle Attività Produttive e, per lo stesso Ministero, nel 2008 ha fatto parte del gruppo di esperti, con il compito di sviluppare l'analisi fattuale in ambito energia ed ambiente, per l'indirizzamento dei fondi strutturali per le regioni del mezzogiorno. Esperto per la valutazione dei progetti di Ricerca di Sistema per il Settore Elettrico per la CCSE. Esperto per la valutazione per il MIUR dei progetti PRIN e dei progetti PON.

### **Davide Poli – Curriculum vitae**

Davide Poli è nato a Volterra (PI) nel 1972.

Nel 1991 ha ottenuto la maturità scientifica a pieni voti presso il Liceo Statale "Giosuè Carducci" di Volterra. Durante il periodo 1994-96 ha ricevuto una borsa di studio Siemens per studenti del triennio della Facoltà di Ingegneria, essendo risultato vincitore dell'apposito bando di concorso; tale borsa gli ha permesso vari soggiorni di studio e tirocinio in Germania.

Nel luglio '97 si è laureato con lode in Ingegneria Elettrica con una tesi dal titolo "Simulazione tecnico-economica di un parco di generazione idro-termoelettrico: Una tecnica per la messa a punto di contratti tra Utility e Produttori Indipendenti".

Dal 1998 al 2001 ha frequentato il corso di Dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrotecnica, essendo risultato vincitore del concorso relativo al XIV ciclo; in tale ambito si è occupato a tempo pieno di sistemi

elettrici liberalizzati (California, Spagna, Inghilterra, PJM, Italia) e di evoluzione della tariffazione per clienti idonei e vincolati nel nostro Paese.

Ha concluso il corso di dottorato con una tesi dal titolo: "Mercati elettrici liberalizzati - Analisi del funzionamento e tecniche di simulazione".

Nel frattempo, ha svolto per conto dell'Università di Pisa attività di supporto alla didattica, relativamente ai corsi di "Sistemi elettrici per l'energia II" e "Pianificazione ed esercizio dei sistemi elettrici per l'energia".

Nello stesso periodo, ha collaborato con il Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione (DSEA) dell'Università degli Studi di Pisa e con alcune società di ingegneria di Pisa e Lucca per attività di simulazione e progettazione di impianti e reti elettriche, nonché per assistenza in materia energetica a piccole-medie imprese pubbliche e private.

Nell'agosto 2001 ha vinto il concorso per ricercatore universitario nel settore Sistemi Elettrici per l'Energia, afferendo al Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa.

E' stato per otto anni membro della Giunta del Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione.

Dal 2004 al 2010 è stato titolare degli insegnamenti di "Sistemi Elettrici per l'Energia - Mantenimento della qualità del vettore elettrico" (Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Elettrica) e di "Sicurezza e qualità dei sistemi elettrici" (Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica).

Attualmente insegna "Qualità e affidabilità dei sistemi elettrici" al primo anno del corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica.

E' responsabile scientifico di contratti di ricerca con CESI Ricerca, ENEL Ricerca, TERNA e la Società Consortile Energia Toscana, struttura che ha contribuito a costituire e a gestire; tale consorzio aggrega le principali pubbliche amministrazioni della regione Toscana per l'acquisto di energia elettrica e gas sul libero mercato, la promozione delle fonti rinnovabili e l'uso razionale dell'energia.

Le sue principali attività di ricerca sono riconducibili alle problematiche di affidabilità e sicurezza dei sistemi elettrici e a quelle di produzione, trasmissione e tariffazione dell'energia in un contesto liberalizzato, in particolare per quanto riguarda il trattamento economico e di incentivazione della generazione distribuita da fonti rinnovabili. Si occupa inoltre di mercato elettrico e del gas, nonché di valutazioni tecniche, economiche e ambientali riguardanti le diverse forme di produzione e consumo dell'energia.

Dal 2006 è presidente della sezione PI-LI-LU-GR-MS della Federazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazioni, dopo averne ricoperto per anni il ruolo di segretario.

E' autore di circa sessanta pubblicazioni, di cui oltre la metà a carattere internazionale, nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia.

## 9 Riferimenti bibliografici

I documenti utilizzati per la stesura della seguente relazione sono i seguenti:

1. Fonte sito T.E.B.: <http://www.teb.bergamo.it/ITA/homepage.aspx>
2. Fonte Wikipedia: [http://it.wikipedia.org/wiki/Tranvia\\_Bergamo-Albino](http://it.wikipedia.org/wiki/Tranvia_Bergamo-Albino)
3. Documento: Cap.2 Tecnica dei Trasporti ferroviari (Massimo Ceraolo)