

**MARCIO ANNIBAL PIMENTA**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam a economia de energia  
em sistemas Metroferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento -**

**Simulação computacional do sistema elétrico de tração da Linha 5-Lilás**

**São Paulo  
2016**



**MARCIO ANNIBAL PIMENTA**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam a economia de energia  
em sistemas Metroferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento -  
Simulação computacional do sistema elétrico de tração da Linha 5-Lilás**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Especialista em Tecnologia Metro Ferroviária.

**São Paulo  
2016**



**MARCIO ANNIBAL PIMENTA**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam a economia de energia  
em sistemas Metroferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento -  
Simulação computacional do sistema elétrico de tração da Linha 5-Lilás**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Especialista em Tecnologia Metro Ferroviária.

Área de Concentração: Energia e Automação  
Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Lourenço Matakas Junior

**São Paulo  
2016**

## Catalogação-na-publicação

Pimenta, Marcio Annibal

Uso de simulação para análise de estratégias que visam a economia de energia em sistemas Metroferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento – Simulação computacional do sistema elétrico de tração da Linha 5-Lilás / M. A. Pimenta -- São Paulo, 2016.

38 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia Metroferroviária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.simulação computacional 2.sistema de armazenamento de energia de tração 3.sistema metroferroviário I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Lourenço Matakas Junior, pela orientação, entusiasmo e constante estímulo transmitido ao longo de todo o processo deste trabalho.

À Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô, pelo apoio financeiro e confiança depositada pelas pessoas Milton Gioia Junior, Antonio Marcio de Barros Silva, Glauco Fernandes Lopes, Fábio Siqueira Netto, Marcio Stevani, e Jackson de Carvalho Galocha.

À Unimetro, na figura de Raquel Anderman da Silva, Dilce Carvalho de Andrade e Marilisa Pinto França Battiato pelo suporte e atenção ao longo do período.

A todos os professores do curso pela compreensão e conhecimentos compartilhados.

A todas as amizades que germinaram durante essa experiência.

E a minha família pelo apoio, compreensão, incentivo e companheirismo sempre presente.



## RESUMO

O cenário econômico - ambiental mundial demanda a busca pela eficiência energética. Imerso nesse cenário, o Metrô de São Paulo, um grande consumidor de eletricidade, cerca de 0,4% de todo o estado de São Paulo, onde 70% da energia consumida é utilizada para a tração de seus trens, se viu compelido a estudar maneiras possíveis de implementar essa economia energética. O primeiro passo é viabilizar um estudo capaz de quantificar a energia potencialmente economizada dentro das características operacionais da companhia. Para estudar a aplicação futura de tecnologias de armazenamento de energia, é implementada uma simulação elétrica computacional, a qual expõe o potencial de economia de energia em alguns cenários operacionais possíveis: alterando o número de trens em operação, aplicando armazenadores de energia ao longo da via, etc. Para esse estudo inicial, utilizaram-se as características presentes na Linha 5-Lilás que percorre a cidade entre as estações Capão Redondo e Adolfo Pinheiro.

**Palavras-chave:** Simulação computacional, sistemas de armazenamento de energia de tração, sistema metroferroviário.



## ABSTRACT

The worldwide economic and environmental scenario claims research on energetic efficiency. Considering this context, the Metro of São Paulo, a huge electricity consumer was compelled to study ways of energy saving. In this company, approximately 70% of the energy consumed is used in the train's traction, demonstrating the need to focus on this system. Firstly, it is important to study some possibilities of energy saving in the São Paulo subway scenario. To study them, a computer simulation is implemented. In order to demonstrate methods for energy saving, data were simulated changing the number of trains in line, applying savers thought the line, etc. Initially, this procedure was applied to the Line 5-Lilás, that goes from Capão Redondo Station to Adolfo Pinheiro Station.

**Keywords:** Computational simulation, traction energy storage systems, subway-railroad system.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Velocidade ao longo do tempo de percurso do trem na Linha 5-Lilás.....	12
Figura 2 - Restrição ao movimento relacionado com a velocidade do trem.....	14
Figura 3 - Aceleração do trem. ....	15
Figura 4 - Desaceleração do trem. ....	15
Figura 5 - Perfil de velocidade variando valor de nd.....	17
Figura 6 - Potência requerida variando valor de nd, evidenciando possível economia de energia.....	18
Figura 7 - Posição do trem ao longo do tempo.....	18
Figura 8 - Potência consumida ou disponibilizada por um trem ao longo do percurso.	
.....	19
Figura 9 - Posição de todos os trens ao longo do tempo.....	21
Figura 10 - Potência de todos os trens ao longo do tempo.....	21
Figura 11 - Modelo de trem em tração e frenagem.....	22
Figura 12 - Circuito equivalente para três dispositivos.....	25
Figura 13 - Circuito com impedâncias equivalentes com três dispositivos. ....	26
Figura 14 - Circuito com impedâncias equivalentes com n dispositivos. ....	26
Figura 15 - Fluxograma do programa. ....	28
Figura 16 – Fluxograma que verifica estado das retificadoras e trens.....	29
Figura 17 - Valor de tensão sobre os 8 trens com armazenadores instalados nas retificadoras. ....	30
Figura 18 - Valor de tensão sobre as 4 retificadoras com armazenadores instalados em todas. ....	31
Figura 19 - Valor das correntes das 4 retificadoras em conjunto com os armazenadores de energia.....	31

Figura 20 - Valor das correntes positivas (que carregam o armazenador) nas 4 retificadoras.....	32
Figura 21 - Valor das correntes negativas (entregues ao sistema) das 4 retificadoras. ....	32
Figura 22 - Potência entregue aos equipamentos instalados em cada retificadora. .	33
Figura 23 - Valores de tensão sobre os 8 trens sem armazenadores de energia na linha.....	33
Figura 24 - Valor de tensão sobre as 4 retificadoras sem armazenadores de energia na linha.....	34
Figura 25 - Corrente das 4 retificadoras sem armazenadores de energia na linha... .	34
Figura 26 - Valores de tensão e corrente sobre a retificadora 1.....	35

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Localização das estações da Linha 5-Lilás. ....	11
Tabela 2 - Parâmetros de acordo com nível de desempenho. (*valor default) .....	16
Tabela 3 - Localização das retificadoras ao longo da Linha 5-Lilás.....	23



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRAÇÃO .....	10
2.1. SIMULAÇÃO DE MARCHA .....	10
2.1.1. TOPOLOGIA DA LINHA 5-LILÁS .....	10
2.1.2. PERFIL DE VELOCIDADE.....	11
2.1.3. RESTRIÇÕES AO MOVIMENTO.....	12
2.1.3.1. RESTRIÇÃO DEVIDO A CURVAS .....	12
2.1.3.2. RESTRIÇÃO DEVIDO A RAMPAS.....	13
2.1.3.3. RESTRIÇÃO DEVIDA A VELOCIDADE .....	13
2.1.4. ACELERAÇÃO E DESACELERAÇÃO DO TREM .....	14
2.1.5. NÍVEL DE DESEMPENHO.....	16
2.1.6. POSIÇÃO E POTÊNCIA CONSUMIDA PELOS TRENS.....	18
2.2. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO.....	19
2.2.1. CENÁRIO OPERACIONAL .....	19
2.2.2. HEADWAY .....	20
2.3. SIMULAÇÃO ELÉTRICA .....	20
2.3.1. MODELAGEM DOS TRENS .....	21
2.3.2. MODELAGEM DAS RETIFICADORAS.....	22
2.3.3. MODELAGEM DOS ARMAZENADORES DE ENERGIA.....	23
2.3.4. CIRCUITO EQUIVALENTE DA LINHA.....	23
2.3.5. ANÁLISE NODAL .....	24
2.3.6. PROCESSO ITERATIVO .....	26
3. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	30

3.1. ARMAZENADORES DE ENERGIA INSTALADOS EM TODAS AS RETIFICADORAS .....	30
3.2. OPERAÇÃO SEM ARMAZENADORES DE ENERGIA.....	33
4. CONCLUSÃO .....	36
4.1. TRABALHOS FUTUROS.....	36
REFERÊNCIAS.....	38

## 1. Introdução

A cidade de São Paulo, ao decorrer dos séculos XIX e XX, se consolidou como uma das principais cidades no cenário econômico mundial. Em meados da década de 1930 atingiu seu primeiro milhão de habitantes. Em 1967, então com 7 milhões de habitantes, possuía uma frota de aproximadamente 493 mil veículos, o que levou ao limite a capacidade de malha viária do centro histórico. A cidade se caracterizava por bolsões industriais isolados, com uma ocupação especulativa e desordenada entre eles.

Com o intuito de suprir as necessidades de locomoção do paulistano, em 1968 foi criada a Companhia do Metrô de São Paulo e começou a construção de sua primeira linha, de norte a sul da cidade. Hoje o Metrô, como ficou conhecido, possui 59 estações e 66 km de linha e conta com uma frota de 150 trens perfazendo a distância de aproximadamente 1,8 milhão de quilômetros mensais.

Para que seja possível a operação de todo o sistema é necessário o consumo médio mensal de 46,2GWh segundo dados de 2014. Desse montante, a tração de trens responde por aproximadamente 69%, ou seja, é o principal responsável pela quantidade de energia gasta pelo sistema.

A 5% da energia utilizada na tração pelo Metrô de São Paulo na Linha 3-Vermelha é transformada em calor através de sua dissipação em resistores durante o processo de frenagem dos trens [1]. Se os dados de 2014 forem considerados, isso equivale a 1,6GWh/mês, ou aproximadamente R\$ 304.000,00 mensais literalmente queimados em resistências de freio. Isso considerando somente a operação da Linha 3-Vermelha. Esse gasto foi estimado de acordo com o custo do MWh atual de R\$ 190,00.

Em abril de 2015 foi realizado uma licitação para contratação de energia elétrica por uma empresa metroferroviária onde o lance médio mínimo obtido foi de R\$ 245,00 para cada MWh prevendo um contrato de fornecimento de 4,5 anos. No final de 2015 o Metrô também deverá realizar o mesmo processo para contratação do mesmo serviço, ou seja, se o cenário do mercado for mantido o custo da energia elétrica poderá ter um acréscimo de 129%.

Tendo esse cenário em vista, uma técnica onde seja possível a economia do consumo de energia pelo sistema de tração, uma vez que o principal consumidor da companhia pode ser atraente do ponto de vista econômico, ambiental e da imagem da empresa. Atualmente os sistemas de armazenamento de energia em sistemas

metro ferroviários mais utilizados são baterias, supercapacitores e rodas de inércia, sendo empregados individualmente ou em conjunto.

Com o objetivo de apresentar e expor aplicações dessas tecnologias e estudar sua aplicação no Metrô de São Paulo serão elaborados quatro documentos, cada um tratando de um assunto específico, sendo: i) baterias e supercapacitores e suas aplicações; ii) rodas de inércia, sistemas de armazenamento embarcados e estacionários e suas aplicações; iii) simulação computacional do sistema elétrico de tração da Linha 5-Lilás; e iv) discussão dos resultados simulados obtidos, incluindo a análise de método de restrição de velocidade para economia de energia além dos próximos trabalhos.

Esse trabalho apresentará a simulação computacional do sistema elétrico de tração da Linha 5-Lilás no intuito de propiciar o estudo de estratégias que gerem economia no consumo de energia pelo sistema de tração. Para seu desenvolvimento, são explanados, ao longo do capítulo 2, os passos necessários para sua implementação. No capítulo 3 estão descritos os resultados obtidos. O capítulo 4 conclui o documento e apresenta possibilidades para trabalhos futuros.

## 2. Simulação de um sistema de tração

Utilizando uma simulação computacional do sistema de tração num cenário metroferroviário é possível dimensionar os componentes de alimentação elétrica (subestações, cabos, distância entre alimentadores, etc.). Outra opção que a simulação traz é o planejamento de extensões, uma vez que é possível a inserção de mais trens, novos alimentadores, estações e/ou acréscimo em seu comprimento. Com isso é possível prever quais serão as necessidades em relação a número de alimentadores, potência necessária, capacidade de condutores, etc.

Para que seja possível a simulação do sistema, alguns passos são necessários. Primeiramente é realizada uma simulação de marcha, onde são levados parâmetros elétricos e mecânicos dos trens que operam, ou com previsão de operar na via. Dessa etapa são retiradas informações para que seja possível a simulação de tráfego, que nada mais é uma extrapolação da simulação de marcha com todos os trens posicionados ao longo da via com o passar do tempo. Por fim, de acordo com os dados oriundos da simulação de tráfego, é realizada a simulação elétrica, a qual irá retornar o panorama elétrico ao longo da via, incluindo o nível de tensão em pontos pré-determinados e a quantidade de energia consumida, entre outros fatores.

### 2.1. Simulação de marcha

Os parâmetros elétricos (potência consumida ou fornecida pelo trem) e mecânicos (velocidade e posição) são oriundos da necessidade dos trens se manterem em movimento de acordo com o solicitado pelo sistema de controle. Durante a aceleração do veículo, é consumida uma grande quantidade de energia que depende, principalmente, do valor da aceleração e das velocidades inicial e final. Ao longo do tempo em que o trem se mantém em velocidade constante, a potência absorvida é necessária para que a composição se oponha as forças de atrito e contrárias ao movimento (rampas, curvas e velocidade). Na desaceleração, o trem gera energia devido a frenagem regenerativa de seus motores de tração, sua quantidade depende, a exemplo da aceleração, do valor da aceleração negativa e das velocidades inicial e final.

#### 2.1.1. Topologia da Linha 5-Lilás

A Linha 5-Lilás do Metrô de São Paulo atualmente possui 7 estações, dispostas de acordo com a Tabela 1. A maior parte de sua extensão atual é

realizada em viaduto, sendo que o restante é via túnel (duas últimas estações), sempre em via dupla. Contudo está em execução a extensão dessa linha que contará com mais 10 estações, todas subterrâneas, perfazendo um total de aproximadamente 20 quilômetros.

Tabela 1 - Localização das estações da Linha 5-Lilás.

Estação	Localização (metros)
Capão Redondo	0
Campo Limpo	1579
Vila das Belezas	3396
Giovani Gronchi	5030
Santo Amaro	7322
Largo 13	8481
Adolfo Pinheiro	9336

Fonte: [2]

### 2.1.2. Perfil de velocidade

A movimentação dos trens ao longo da via é regida através de um sistema chamado ATC (Automatic Train Control). De maneira geral, esse sistema de controle faz com que os trens sejam distribuídos ao longo do percurso da maneira mais homogênea possível com o intuito de obedecer o *headway* (tempo entre trens consecutivos) estipulado. A maior parte do sistema ATC fica ao longo da linha, instalado nas estações e transmitindo informações aos trens por meio de sinais modulados em frequência que circulam pelos trilhos. Os sinais modulados circulam em circuitos fechados de aproximadamente 140 metros. Em cada circuito há geração de um sinal que será recebido pelo trem através de antenas instaladas nos primeiros eixos. Por meio do equipamento de ATC embarcado, esse sinal é transformado em uma informação de velocidade, ou seja, naquela localização o trem deverá andar a uma velocidade correspondente ao sinal recebido por suas antenas, os chamados códigos de velocidade.

Dessa forma, o movimento de cada trem e o espaçamento entre eles é controlado alterando e até zerando esses códigos de velocidade enviados ao trem em cada bloco de 140 metros. Na Linha 5-Lilás, os códigos de velocidade utilizados são: 0; 10; 20; 35; 50; 60; 68; 80, ou seja, teoricamente o trem acelera ou freia para atingir essas velocidades e mantê-las, sendo possível a troca de seu valor a cada circuito de via (bloco de 140 metros), porém na prática, dentro de um perfil de operação normal, os trens saem das estações acelerando até 50, 60 ou 68km/h,

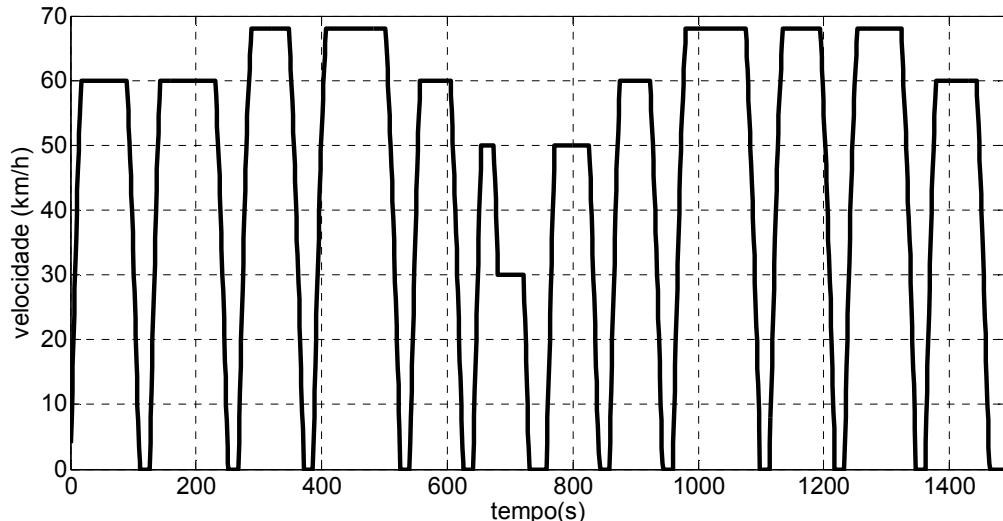
percorrem todo o trecho entre estações, parando na próxima estação. Somente em um pequeno trecho perto do final da via, na região da Estação Adolfo Pinheiro, o trem reduz sua velocidade de 50 para 30km/h.

O comportamento da velocidade do trem percorrendo a Linha 5-Lilás pode ser observado na Figura 1. Na ilustração é possível perceber os tempos de parada em cada estação. Quando o trem está parado nas estações terminais, ou seja, percorreu toda a linha e irá retornar a estação inicial, o tempo de parada é maior (30 segundos). No restante das estações o tempo que o trem permanece de portas abertas é 18 segundos. Esse tempo pode ser alterado individualmente quando necessário, inclusive separadamente na viagem de ida ou de volta.

### 2.1.3. Restrições ao movimento

Os dados necessários para que a simulação seja possível correspondem as forças de restrição ao movimento, ou seja, forças contrárias ao movimento geradas pelas curvas, rampas e velocidade. Nessa etapa do desenvolvimento da simulação, somente a restrição devido a velocidade será levada em consideração, portanto as demais restrições aqui apresentadas tem objetivo expositivo.

Figura 1 - Velocidade ao longo do tempo de percurso do trem na Linha 5-Lilás.



Fonte: [3]

#### 2.1.3.1. Restrição devido a curvas

As duas principais características construtivas de uma curva é a sua superelevação (diferença de altura dos trilhos) e raio de curvatura. Essa construção faz com que haja a atuação de força centrífuga, além de forças de atrito entre as

rodas e os trilhos, oriundas da inscrição do truque do trem na curva, gerando atrito entre suas rodas e os trilhos, pois a primeira quer continuar seu movimento retilíneo e o segundo a “puxa” para perfazer um caminho curvilíneo, e a solidariedade entre as rodas em um eixo, uma vez que numa curva o trilho externo é mais extenso que o interno, porém as rodas do trem estão instaladas em um eixo rígido.

Essas forças fazem com que haja restrição ao movimento. Essa restrição,  $r_c$ , pode ser calculada através da eq. 1 [4].

$$\begin{aligned} r_c &= \frac{650}{\rho - 55} \text{ para } \rho > 350m \\ r_c &= \frac{530}{\rho - 55} \text{ para } 250 < \rho > 350m \\ r_c &= \frac{530}{\rho - 3} \text{ para } \rho < 250m \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:  $r_c$  é a própria restrição imposta pela curva; e  $\rho$  o raio da curva em metros.

### 2.1.3.2. Restrição devido a rampas

A definição de rampas se dá através de sua inclinação, ou seja, da relação entre o desnível vertical ao longo de seu comprimento e sua projeção horizontal. O sinal de inclinação pode ser positivo quando a rampa é de subida, ou negativo quando a rampa é uma descida.

A resistência específica devido a uma rampa pode ser dada pela razão do peso decomposto do veículo paralelo ao movimento e seu peso total, que simplificando, é calculada pelo valor de sua inclinação, uma vez que o valor numérico de um seno e uma tangente para ângulos pequenos é aproximadamente igual [4], conforme ilustrado através da eq. 2.

$$r_r = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2)$$

Onde:  $r_r$  é a própria restrição imposta pela rampa;  $\Delta h$  a altura da rampa em metros; e  $\Delta l$  o comprimento da rampa, também em metros.

### 2.1.3.3. Restrição devida a velocidade

Outra restrição a qual o trem está submetido diz respeito à força contrária ao movimento que aparece à medida que a composição aumenta sua velocidade. As

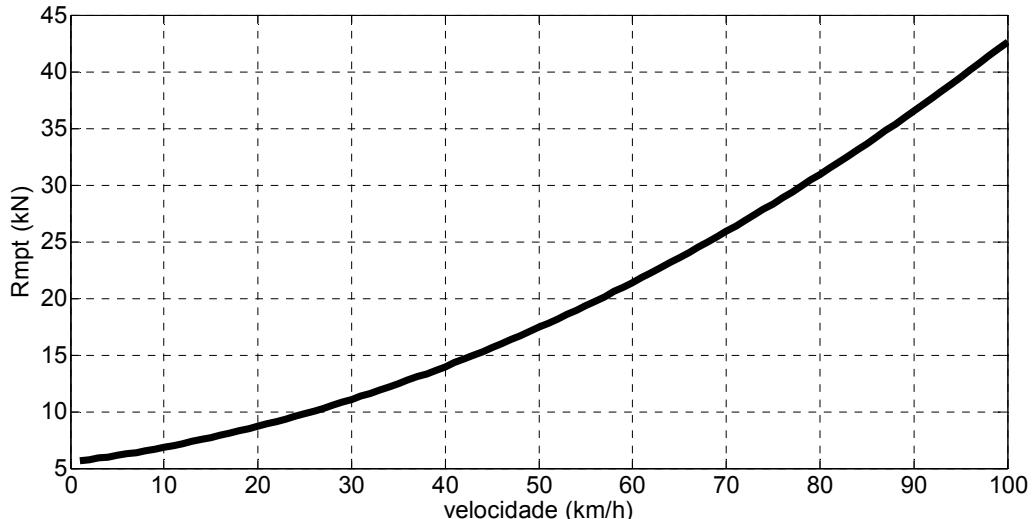
forças envolvidas nessa restrição são oriundas da própria interação entre as rodas do trem e os trilhos e a força aerodinâmica correspondente à área de atrito com o ar.

Com o intuito de estudar as forças de uma maneira unificada, algumas abordagens são apresentadas na literatura, incluindo a Fórmula de Davis, que calcula a resistência ao movimento,  $r_{mpt}$ , em função da velocidade  $V$  a partir dos coeficientes A, B e C, que dependem das características do trem, conforme apresentado na eq. 3 [4]. Os coeficientes utilizados na simulação são oriundos da Fórmula de Davis [4], admitindo todos os carros do trem sendo “carro motor”.

$$r_{mpt} = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad (3)$$

Para o caso descrito nesse documento, o comportamento da força restritiva ao movimento relacionado à velocidade é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Restrição ao movimento relacionado com a velocidade do trem.



Fonte: [3]

#### 2.1.4. Aceleração e desaceleração do trem

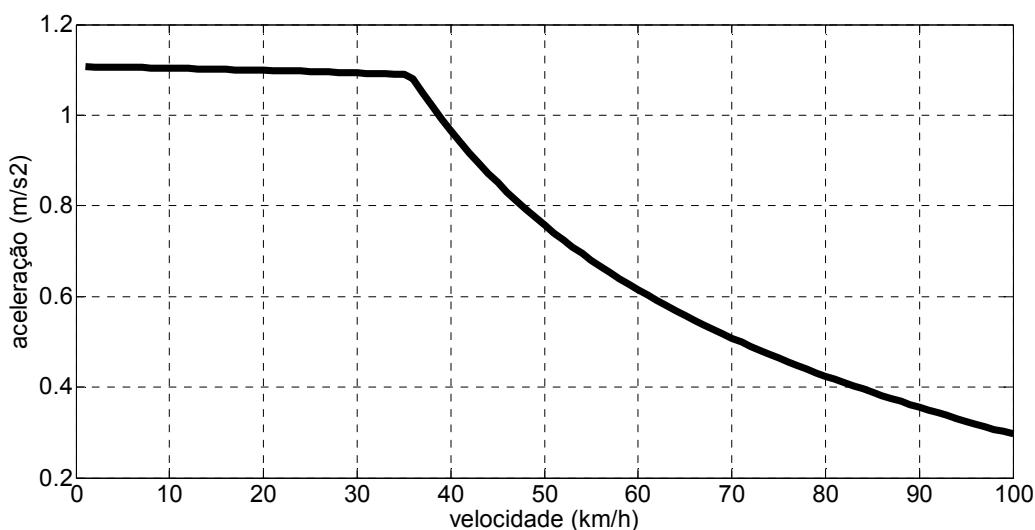
A aceleração e desaceleração inicial do trem são especificadas. No caso dos trens do Metrô, a aceleração inicial é de  $1,12 \text{ m/s}^2$  e a desaceleração é de  $1,2 \text{ m/s}^2$ . De acordo com a Segunda Lei de Newton, é sabido de que a força imposta a um corpo é proporcional à multiplicação de sua massa e aceleração.

Conforme visto anteriormente, com o aumento da velocidade, existe o aumento da força contrária ao movimento, portanto a força resultante que impulsiona o trem sofre um decréscimo.

Outro fator que deve ser levado em consideração é o fenômeno de enfraquecimento do campo magnético dos motores de tração, que a partir de uma velocidade de rotação não conseguem mais manter o torque e sim a potência. Como a potência do motor é proporcional ao torque mecânico multiplicado pela velocidade da máquina, a partir do momento em que a potência do motor é mantida e sua velocidade aumentada, a força que o mesmo consegue impor ao trem diminui.

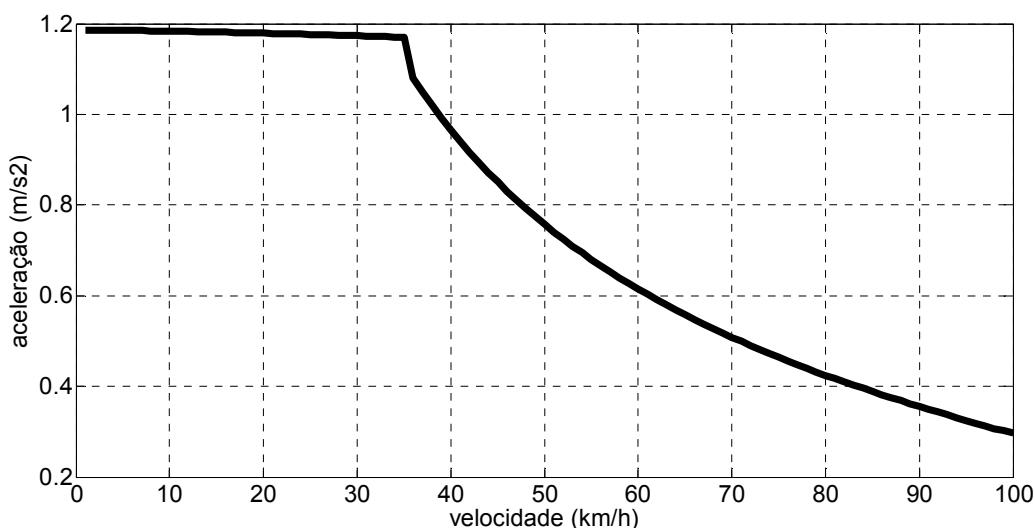
O comportamento aceleração do trem em relação à velocidade pode ser observado na Figura 3 e da desaceleração na Figura 4.

Figura 3 - Aceleração do trem.



Fonte: [3]

Figura 4 - Desaceleração do trem.



Fonte: [3]

### 2.1.5. Nível de desempenho

Um parâmetro utilizado para controlar o espaçamento entre trens e suas velocidades pelo ATC, é o chamado nível de desempenho, conhecido por nd. Essa variável é imposta ao sistema de controle embarcado do trem no momento em que o mesmo está parado na estação com portas abertas através de transmissão via antena localizada na área de plataforma. Essa informação é composta de 8 bits de dados. Os dois bits mais significativos correspondem a informação da aceleração, os próximos dois informam qual o valor da desaceleração e os quatro bits menos significativos equivalem a velocidade máxima.

Portanto essa informação pode fazer com que o trem acelere, desacelere ou controle sua velocidade, com valores diferentes aos nominais (aceleração em  $1,12\text{m/s}^2$  e a desaceleração em  $1,2\text{m/s}^2$ ). A relação desses parâmetros com os nominais está esplanada através da Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de acordo com nível de desempenho. (\*valor default)

Nível de desempenho	Aceleração [%]	Desaceleração [ $\text{m/s}^2$ ]
0	50	0,67
1	63	0,75
2	100*	0,85*
3	30	0,67
Velocidade limite [km/h]		
0	47,5	
1	51	
2	54,5	
3	58	
4	61,5	
5	65	
6	68,5	
7	72	
8	75,5	
9	79	
A	82,5	
B	86	
C	89,5	
D	93	
E	96,5	
F	100*	

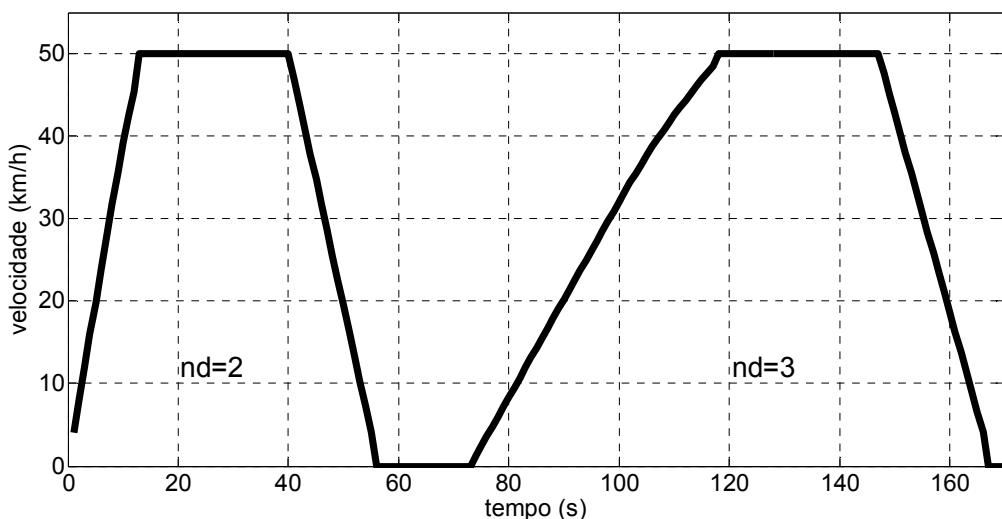
Fonte: [3]

Essa característica pode ser utilizada com o objetivo de economia no consumo de energia, principalmente por reduzir a velocidade final do trem, conforme será exposto oportunamente.

Nessa simulação, o nível de desempenho foi admitido somente para a aceleração e desaceleração, não se preocupando no momento com a restrição de velocidade final, uma vez que o tráfego foi considerado perfeito, portanto todos os trens andam em suas velocidades máximas de cruzeiro. Também o valor do  $nd$  não foi alterado entre os cenários simulados, pois se decidiu por não utilizar a manipulação dessa variável como fator de comparação no consumo de energia. Os valores possíveis para o nível de desempenho são apresentados na Tabela 2.

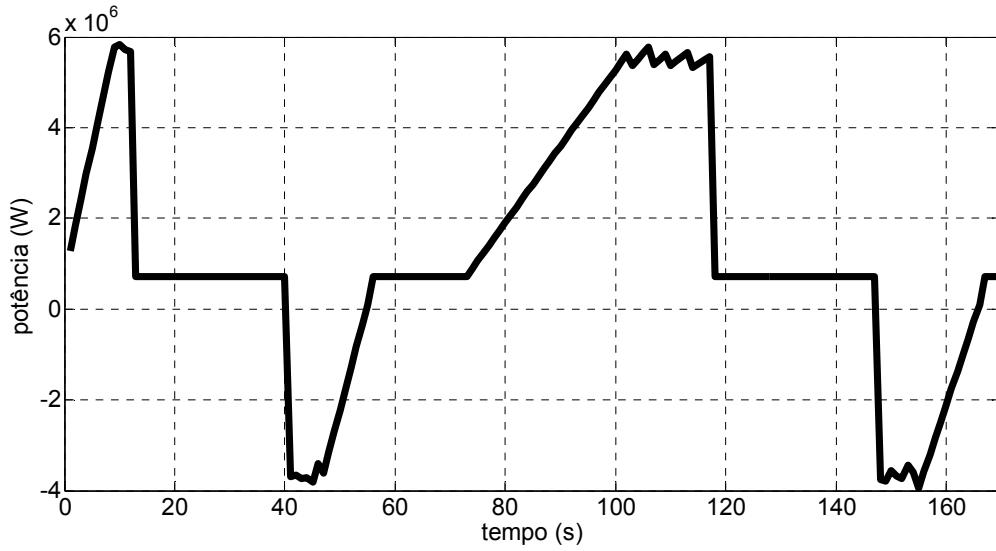
Para ilustrar a diferença de comportamento de velocidade e potência de um trem quando seu  $nd$  é alterado, as Figuras 5 e 6 são expostas. No primeiro ciclo, a aceleração seguida pelo trem não possui restrição e sua desaceleração é fixada em  $0,85 \text{ m/s}^2$ , ou seja,  $nd=2$ . No segundo, a aceleração corresponde a 30% de seu valor nominal e a desaceleração mantida em  $0,67 \text{ m/s}^2$ , ou seja,  $nd=3$ . A primeira figura ilustra o perfil de velocidade, deixando clara a diferença no valor de aceleração e a segunda o maior consumo de energia resultante do maior tempo de aceleração. Pode-se perceber que a potência nunca cai a zero, uma vez que o trem possui equipamentos auxiliares em funcionamento independentemente de sua velocidade, como ar condicionado, compressor de ar, iluminação, sistema de portas, etc.

Figura 5 - Perfil de velocidade variando valor de  $nd$ .



Fonte: [3]

Figura 6 - Potência requerida variando valor de  $nd$ , evidenciando possível economia de energia.



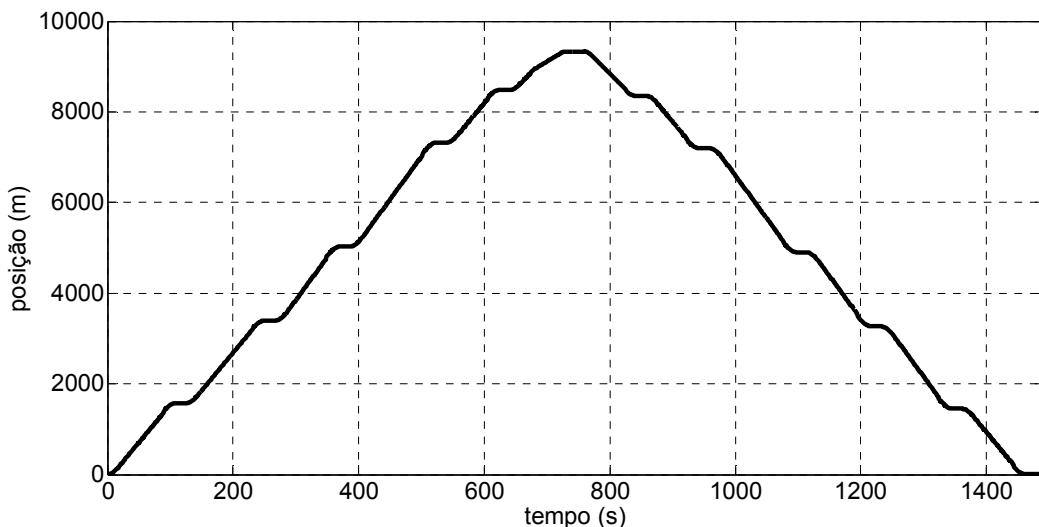
Fonte: [3]

### 2.1.6. Posição e potência consumida pelos trens

Dando continuidade ao fluxo da simulação, dois grandes vetores são montados com a posição dos trens e sua potência consumida ou fornecida em função do perfil de velocidade da via e do nível de desempenho atribuído ao trem. Cada elemento dos vetores equivale às grandezas citadas em cada segundo. Portanto se o trem percorrer toda a via em 1000 segundos, cada vetor terá 1000 elementos.

Na Figura 7 está exposta a posição do trem em função do tempo.

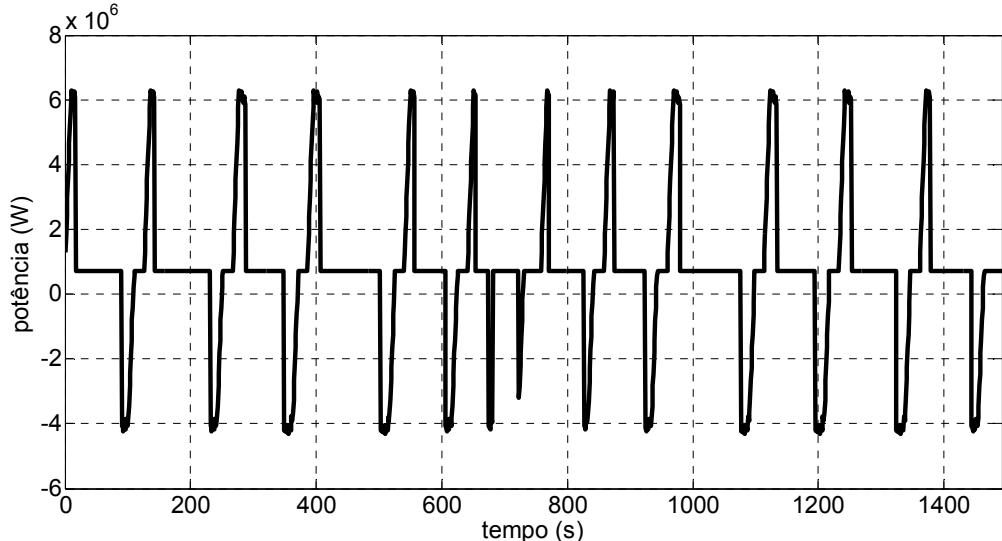
Figura 7 - Posição do trem ao longo do tempo.



Fonte: [3]

A Figura 8 mostra a potência requerida (aceleração e velocidade constante) ou disponibilizada (frenagem) pelo trem. Note que a potência requerida aparece com sinal positivo e a potência disponibilizada com sinal negativo.

Figura 8 - Potência consumida ou disponibilizada por um trem ao longo do percurso.



Fonte: [3]

## 2.2. Simulação de tráfego

O próximo passo necessário para se obter todos os dados da saída da simulação é a inserção de todos os trens ao longo da linha, uma vez que a operação é feita com todos os trens se locomovendo simultaneamente. Como resultado dessa etapa, é obtida uma matriz, onde cada linha se refere ao vetor de posição ou potência de um trem. Como o caso estudado possui 8 trens, cada matriz possui 8 linhas e 1492 colunas, uma matriz corresponde às posições dos trens ao longo do tempo e outra às potências.

### 2.2.1. Cenário Operacional

Atualmente a Linha 5-Lilás conta com oito trens para perfazer sua extensão e prestar serviço à população durante o horário de operação do sistema. Nos horários de pico (horas de maior demanda no período matutino e vespertino) é colocada em operação toda a frota disponível, ou seja, os 8 trens e nos outros períodos ao longo dia são colocados a disposição dos usuários 6 ou 7 trens, dependendo a demanda pontual e ocasiões excepcionais da cidade.

### 2.2.2. Headway

O headway, conforme já comentado, define o intervalo, em segundos, entre dois trens consecutivos que circulam na via. Essa grandeza é um dos objetivos do sistema de sinalização da linha, uma vez que está intimamente ligado à demanda, uma vez que o intervalo entre os trens e sua quantidade deve satisfazer a necessidade imposta pela demanda.

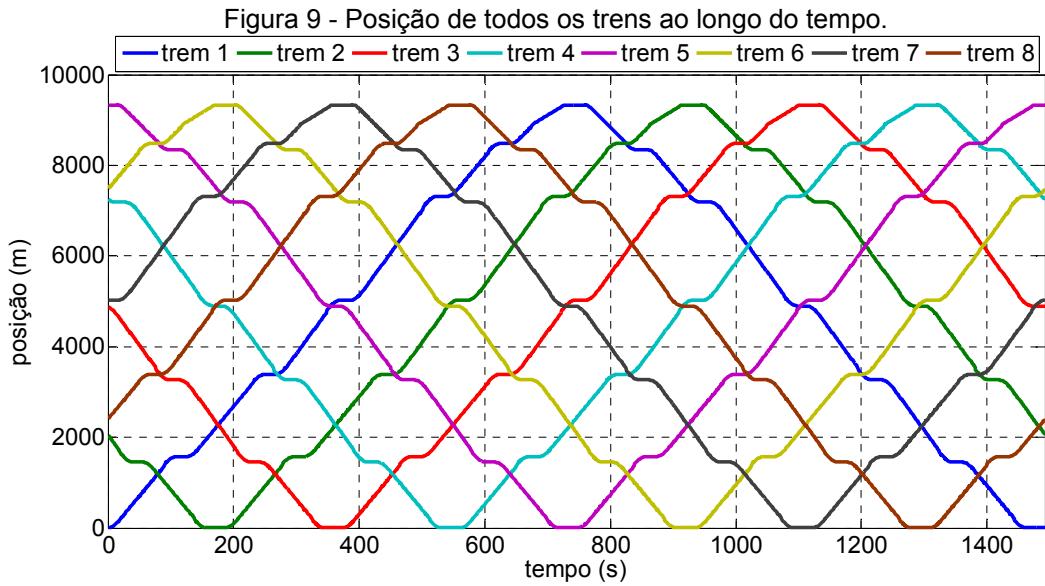
Sendo assim, o *headway* que será utilizado na simulação se restringiu a divisão do tempo necessário para que o trem percorra toda a via dividido pelo número de trens, nesse caso 186,5 segundos, pois o trem demora 1492s para percorrer toda a extensão necessária e a configuração operacional atual conta com 8 trens.

Na Figura 9 é possível observar o posicionamento de todos os trens ao longo do tempo. Um fato deve ser salientado: a posição de parada do trem não é a mesma nos dois sentidos, ou seja, devido às curvas, os pontos topográficos de paradas do trem diferem dependendo do sentido da viagem.

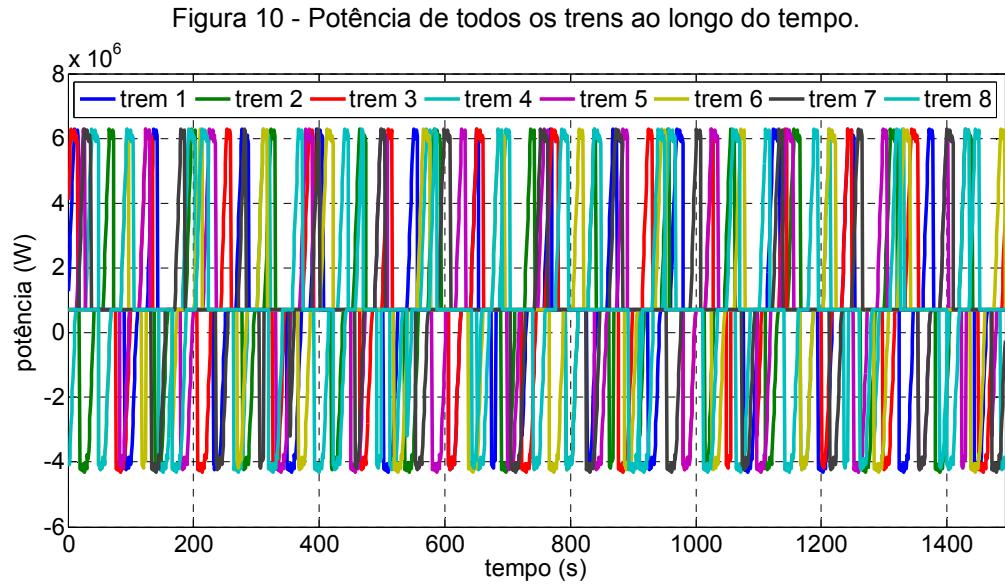
Outros valores que são exportados para a simulação elétrica do sistema são as potências de todos os trens ao longo do tempo, o que é ilustrado na Figura 10, que nada mais é a sobreposição das potências de todos os trens ao longo do tempo respeitando o headway da linha. Lembrando que a potência de somente um trem pode ser observada na Figura 8.

### 2.3. Simulação Elétrica

Depois de realizada a simulação de tráfego, obtendo a posição e a potência pontual de todos os trens ao longo do tempo, é possível simular o comportamento elétrico do sistema de tração, tendo como resultado a potência consumida pelas subestações retificadoras, o valor da tensão de vários pontos ao longo da via e a possibilidade de prever o comportamento elétrico com a adição de dispositivos armazenadores de energia. O comportamento elétrico do sistema de tração é obtido modelando seus componentes como fontes de correntes em paralelo a resistências, sendo ligados a pontos ao longo da via, a qual pode ser considerada como uma impedância, ou seja, entre os dispositivos (trens, estações retificadoras ou dispositivos armazenadores de energia) haverá uma impedância correspondente a distância dos cabos de tração entre os pontos.



Fonte: [3]



Fonte: [3]

### 2.3.1. Modelagem dos trens

Os principais componentes do circuito, os trens, conforme dito anteriormente podem ser considerados como sendo fontes de corrente em paralelo com uma resistência. Durante a aceleração e velocidade constante o valor dessa resistência é muito grande, pois o trem somente “injeta” corrente no circuito de tração. Ao longo da desaceleração, o nível de tensão no ponto de captação de energia do material rodante tende a subir e o sistema de controle de tração faz com que a tensão se estabilize num valor limite inserindo gradativamente o resistor de frenagem, que “drena” uma parcela da corrente de freio, possibilitando essa condição. No caso dos

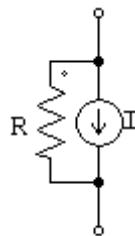
treins que circulam na Linha 5-Lilás, aquele valor limite é de 1750V. Nesta simulação a inserção do resistor de frenagem,  $R$ , é realizada de acordo a eq. 5, dependendo do valor da tensão aplicada ao trem,  $V_t$ , e sendo limitada ao valor mínimo de  $0,33\Omega$  (valor físico da resistência por composição). O valor da corrente,  $I$ , que é fornecida pelo trem é obtido através de eq. 4, onde a potência,  $Pot$ , é oriunda do vetor que compõe a Figura 10 e à tensão,  $U$ , é atribuída do valor nominal de alimentação da via, ou seja, 1500V somente para começar o processo iterativo, conforme será exposto no item 2.3.6. É conveniente lembrar que o valor da corrente do trem é positivo quando o mesmo está motorizando e negativa quando freando.

Portanto o circuito equivalente do trem pode ser resumido de acordo com a Figura 11.

$$Pot = U \cdot I \quad (4)$$

$$R = \frac{10}{(V_t - 1750) \cdot 3} \quad (5)$$

Figura 11 - Modelo de trem em tração e frenagem.



Fonte: [3]

A proposta aqui apresentada para representar a frenagem do trem não corrobora com o comumente adotado na literatura que substitui, nesse momento, o modelo de fonte de corrente por uma fonte de tensão em série com uma condutância, fazendo com que a tensão nos terminais do conjunto seja igual a tensão limite de frenagem do trem [4].

### 2.3.2. Modelagem das retificadoras

As subestações retificadoras também podem ser modeladas através de uma fonte de corrente, de forma equivalente ao que foi admitido para os trens. Neste caso, o valor da corrente  $I_{se}$  pode ser obtido por meio da eq. 6 e o valor da resistência,  $R_{se}$ , colocada em paralelo a essa fonte equivale ao valor da “resistência interna equivalente” da estação retificadora, advindo da eq. 7 [4].

$$I_{se} = \frac{P_d}{U_{d0} - U_d} \quad (6)$$

$$R_{se} = \frac{(U_{d0} - U_d) \cdot U_d}{P_d} \quad (7)$$

Onde:  $P_d$  é a potência nominal da retificadora – 7MW;  $U_d$  a tensão nominal do sistema – 1500V; e  $U_{d0}$  a tensão da retificadora em vazio – 1800V.

Para o sistema proposto, o valor de  $I_{se}$  é de 23.333,33A e  $R_{se}$  0,064Ω.

Todo o modelo discorrido acima vale para quando a tensão sobre a retificadora for menor ou igual a tensão nominal. Para valores maiores que o nominal, devido ao fato das retificadoras a diodos não possibilitarem a regeneração de energia, as mesmas são desligadas, impondo-se corrente nula e valor da resistência infinita.

A Linha 5-Lilás é eletrificada através de 4 retificadoras, sendo nomeadas de 1 a 4, sua localização é explicitada na Tabela 3.

Tabela 3 - Localização das retificadoras ao longo da Linha 5-Lilás.

Retificadora	Localização [m]
1	84,1
2	3439,4
3	6385,9
4	8590,8

Fonte: [3]

### 2.3.3. Modelagem dos armazenadores de energia

Para a elaboração desse estudo, os armazenadores de energia serão considerados uma “caixa preta”, porém também serão admitidos como sendo fontes de correntes com valores pré-estabelecidos de maneira heurística, num primeiro momento, somente drenando corrente da via mantendo-a sempre em condições de propiciar frenagem regenerativa aos trens. A utilização da energia armazenada nesse dispositivo será tema de trabalho futuro. Sua lei de funcionamento ocorre de acordo com a eq.8.

### 2.3.4. Circuito equivalente da linha

Com as modelagens dispostas anteriormente, o circuito equivalente da linha foi obtido, de acordo com a Figura 14. Como todos os componentes são fontes de

corrente com resistências em paralelo, onde são necessários os valores de corrente e impedâncias ligadas a cada ponto (trem, retificadora ou armazenador), seus valores são recalculados a cada iteração a partir das tensões em cada dispositivo, conforme exposto na eq. 18.

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \text{ se } U_n < 1500 \\ I_a &= \frac{U_n - 1500}{R_{se}} \text{ se } U_n > 1500 \end{aligned} \quad (8)$$

onde:  $I_a$  é a corrente que carrega o armazenador e  $U_n$  é a tensão sobre o mesmo.

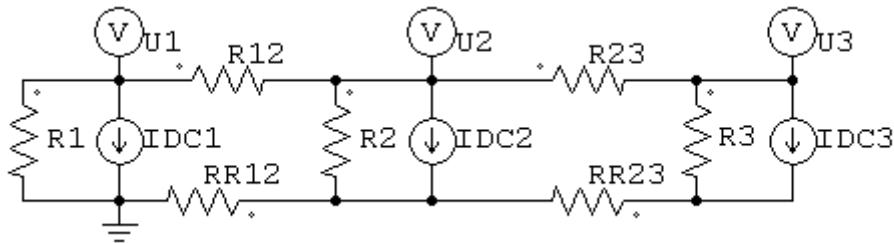
### 2.3.5. Análise nodal

Sabe-se que a posição dos trens é dinâmica com o passar do tempo, portanto o comprimento do circuito elétrico de tração entre dois trens ou um trem e uma retificadora varia, o que representa uma impedância variável. Para sanar esse problema, a cada segundo foram distribuídos os trens e retificadoras de forma crescente em relação a sua posição, levando em consideração os dados obtidos através da simulação de tráfego, atribuindo cada fonte de corrente da Figura 14 a um trem, retificador ou armazenador de energia. Essa modelagem deixou o sistema fixo e de simples resolução, sendo que o objetivo de sua resolução é encontrar o valor de tensão em cada ponto (trem ou retificadora) aplicando a Lei das Correntes de Kirchhoff a cada nó.

Para o desenvolvimento inicial, foi admitida uma rede com três dispositivos, conforme pode ser observado na Figura 12 que posteriormente será extrapolada para  $n$  componentes. Para a obtenção dos valores de tensão, algumas convenções devem ser feitas:

- as correntes que percorrem o condutor de tração da esquerda para a direita são positivas;
- as correntes que atravessam os dispositivos (trens, estações retificadoras e armazenadores de energia) saindo do condutor de tração em direção ao condutor de retorno são positivas;
- as correntes que caminham pelo condutor de retorno da direita para a esquerda são positivas;
- as correntes que saem dos nós são positivas e as que entram negativas.

Figura 12 - Circuito equivalente para três dispositivos.



Fonte: [3]

Com essas conversões feitas, é possível desenvolver as eq. 15 a 20, que refere-se a aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff aos nós.

$$I_{R1} + I_{DC1} + I_{12} = 0 \quad (9)$$

$$I_{R2} + I_{DC2} + I_{23} - I_{12} = 0 \quad (10)$$

$$I_{R3} + I_{DC3} - I_{23} = 0 \quad (11)$$

$$-I_{R1} - I_{R12} - I_{DC1} = 0 \quad (12)$$

$$-I_{R2} - I_{R23} - I_{DC2} + I_{R12} = 0 \quad (13)$$

$$-I_{DC3} - I_{R3} + I_{R23} = 0 \quad (14)$$

Substituindo a eq. 18 na eq. 15, a eq. 19 na eq. 16 e a eq. 20 na eq. 17, chega-se as conclusões expostas nas eq. 21 a 23.

$$-I_{DC1} - I_{R12} + I_{DC1} + I_{12} = 0, \text{ ou seja, } I_{12} = I_{R12} \quad (15)$$

$$I_{R12} - I_{DC2} - I_{R23} + I_{DC2} + I_{23} - I_{12} = 0, \text{ ou seja, } I_{23} = I_{R23} \quad (16)$$

$$-I_{DC3} + I_{R23} + I_{DC3} - I_{23} = 0, \text{ ou seja, } I_{23} = I_{R23} \quad (17)$$

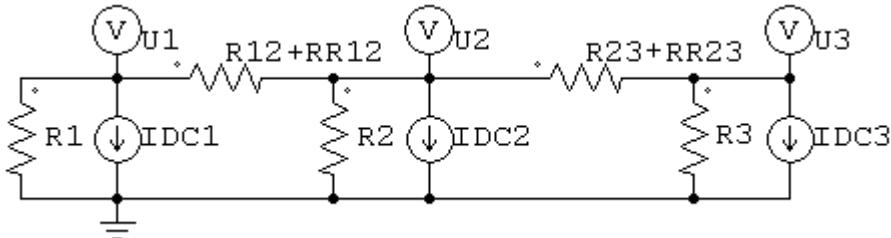
Para uma rede com  $n$  pontos, é possível extrapolar o resultado e dizer que  $I_{1:n} = I_{Rn-1:n}$ . Se a corrente no condutor de tração é igual a corrente no condutor de retorno, é possível substituir as impedâncias expostas na Figura 12 por uma equivalente, sendo a soma das citadas. Sendo assim, o circuito equivalente pode ser redesenhado conforme a Figura 13.

Extrapolando o circuito equivalente para  $n$  dispositivos (trens, retificadores ou armazenadores), chega-se a Figura 14.

Os valores que devem ser obtidos são os valores de tensão  $U_1$  a  $U_n$ , os quais são os valores de tensão sobre os dispositivos. O número de pontos depende da

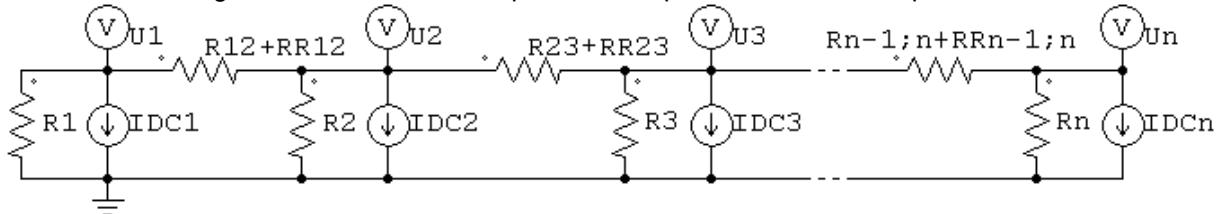
quantidade de dispositivos ligados ao condutor de tração ao longo da linha. Para o caso da Linha 5-Lilás, são 8 trens e 4 estações retificadoras, totalizando 12 pontos, portanto é obtida a eq. 18.

Figura 13 - Circuito com impedâncias equivalentes com três dispositivos.



Fonte: [3]

Figura 14 - Circuito com impedâncias equivalentes com  $n$  dispositivos.



Fonte: [3]

### 2.3.6. Processo iterativo

Devido a característica não linear dos trens, após a obtenção dos valores de tensão através da eq. 24, os mesmos são substituídos na modelagem dos trens e subestações retificadoras de modo a obter novos valores de correntes  $I_{DC1}$  a  $I_{DCn}$ , que são novamente substituídas na eq. 24. Esse ciclo é repetido até que o erro no valor de tensão seja admissível. Um erro de 0,007V em uma alimentação de 750Vdc é obtida com 11 iterações [5].

Também faz parte desse mesmo processo a verificação do estado das estações retificadoras. Levando em consideração que elas não possuem a capacidade de “devolver” energia para a distribuidora, caso haja correntes “entrando” no equipamento, o mesmo é “desligado”, ou seja, passa a ser representado por uma fonte de corrente de valor zero em paralelo com uma resistência de valor elevado.

Por fim, a cada iteração, o valor da tensão sobre cada trem é verificado e seu modelo alterado caso o nível de tensão seja maior que o máximo admissível, ou

seja, 1750V. Nesse instante é inserido o resistor de frenagem ao modelo do trem, de acordo com a relação exposta no item 2.3.1.

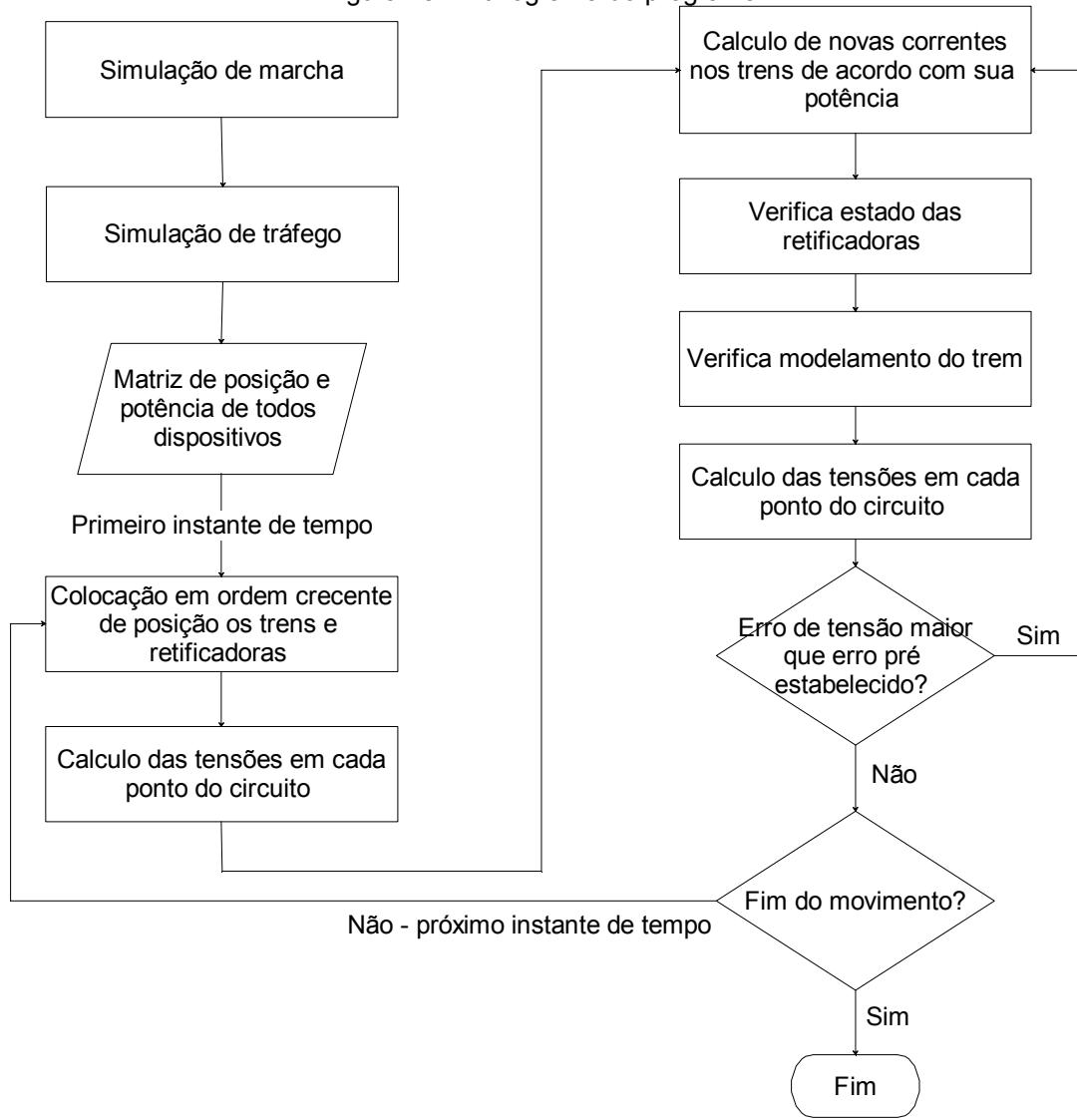
$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{\left(\frac{U_2}{R_{12}} - I_{DC1}\right) \cdot R_1 \cdot R_{12}}{R_{12} + R_1} \\
 U_2 &= \frac{\left(\frac{U_1}{R_{12}} + \frac{U_3}{R_{23}} - I_{DC2}\right) \cdot R_2 \cdot R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} \cdot R_{23} + R_2 \cdot R_{12} + R_2 \cdot R_{23}} \\
 U_3 &= \frac{\left(\frac{U_2}{R_{23}} + \frac{U_4}{R_{34}} - I_{DC3}\right) \cdot R_3 \cdot R_{23} \cdot R_{34}}{R_{23} \cdot R_{34} + R_3 \cdot R_{23} + R_3 \cdot R_{34}} \\
 U_4 &= \frac{\left(\frac{U_3}{R_{34}} + \frac{U_5}{R_{45}} - I_{DC4}\right) \cdot R_4 \cdot R_{34} \cdot R_{45}}{R_{34} \cdot R_{45} + R_4 \cdot R_{34} + R_4 \cdot R_{45}} \\
 U_5 &= \frac{\left(\frac{U_4}{R_{45}} + \frac{U_6}{R_{56}} - I_{DC5}\right) \cdot R_5 \cdot R_{45} \cdot R_{56}}{R_{45} \cdot R_{56} + R_5 \cdot R_{45} + R_5 \cdot R_{56}} \\
 U_6 &= \frac{\left(\frac{U_5}{R_{56}} + \frac{U_7}{R_{67}} - I_{DC6}\right) \cdot R_6 \cdot R_{56} \cdot R_{67}}{R_{56} \cdot R_{67} + R_6 \cdot R_{56} + R_6 \cdot R_{67}} \\
 U_7 &= \frac{\left(\frac{U_6}{R_{67}} + \frac{U_8}{R_{78}} - I_{DC7}\right) \cdot R_7 \cdot R_{67} \cdot R_{78}}{R_{67} \cdot R_{78} + R_7 \cdot R_{67} + R_7 \cdot R_{78}} \\
 U_8 &= \frac{\left(\frac{U_7}{R_{78}} + \frac{U_9}{R_{89}} - I_{DC8}\right) \cdot R_8 \cdot R_{78} \cdot R_{89}}{R_{78} \cdot R_{89} + R_8 \cdot R_{78} + R_8 \cdot R_{89}} \\
 U_9 &= \frac{\left(\frac{U_8}{R_{89}} + \frac{U_{10}}{R_{910}} - I_{DC9}\right) \cdot R_9 \cdot R_{89} \cdot R_{910}}{R_{89} \cdot R_{910} + R_9 \cdot R_{89} + R_9 \cdot R_{910}} \\
 U_{10} &= \frac{\left(\frac{U_9}{R_{910}} + \frac{U_{11}}{R_{1011}} - I_{DC10}\right) \cdot R_{10} \cdot R_{910} \cdot R_{1011}}{R_{910} \cdot R_{1011} + R_{10} \cdot R_{910} + R_{10} \cdot R_{1011}} \\
 U_{11} &= \frac{\left(\frac{U_{10}}{R_{1011}} + \frac{U_{12}}{R_{1112}} - I_{DC11}\right) \cdot R_{10} \cdot R_{1011} \cdot R_{1112}}{R_{1011} \cdot R_{1112} + R_{11} \cdot R_{1011} + R_{11} \cdot R_{1112}} \\
 U_{12} &= \frac{\left(\frac{U_{11}}{R_{1112}} - I_{DC12}\right) \cdot R_{12} \cdot R_{1112}}{R_{1112} + R_{12}}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Esse processo iterativo se dá em cada instante da simulação, uma vez que a cada segundo a posição relativa dos trens em relação às retificadoras e a linha é

alterada, fazendo com que haja alteração nos valores de impedância entre os pontos do circuito e também as condições de cada retificadora pode ser alterada, sendo ligada ou desligada dependendo do valor da tensão em seu ponto. Portanto esse processo é realizado em todos os 1492 instantes (tempo necessário para que o trem percorra toda a linha).

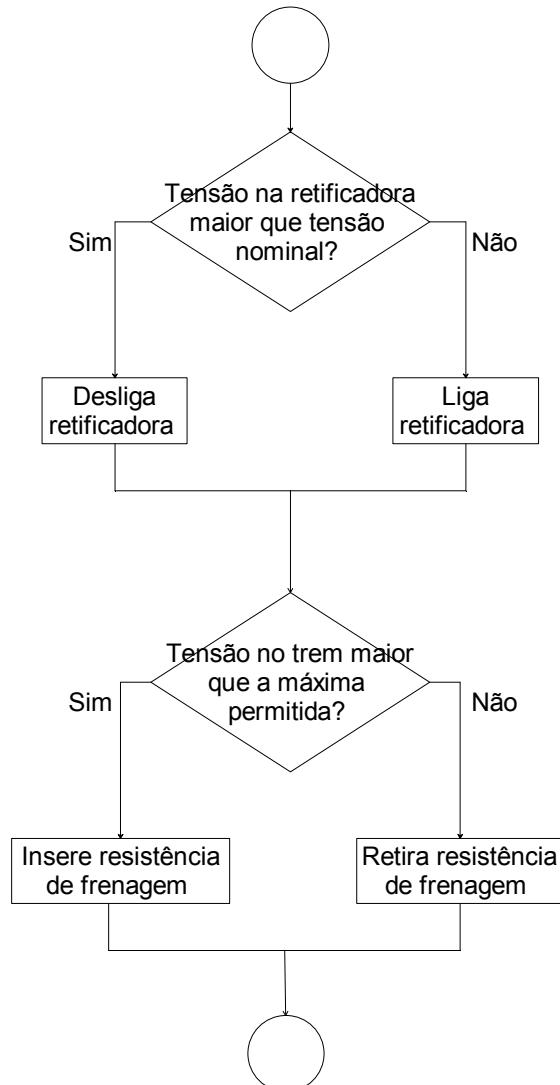
A simulação foi realizada no software MatLab , utilizando linhas de comando, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 15, com detalhamento na Figura 16.

Figura 15 - Fluxograma do programa.



Fonte: [3]

Figura 16 – Fluxograma que verifica estado das retificadoras e trens.



Fonte: [3]

### 3. Análise dos resultados

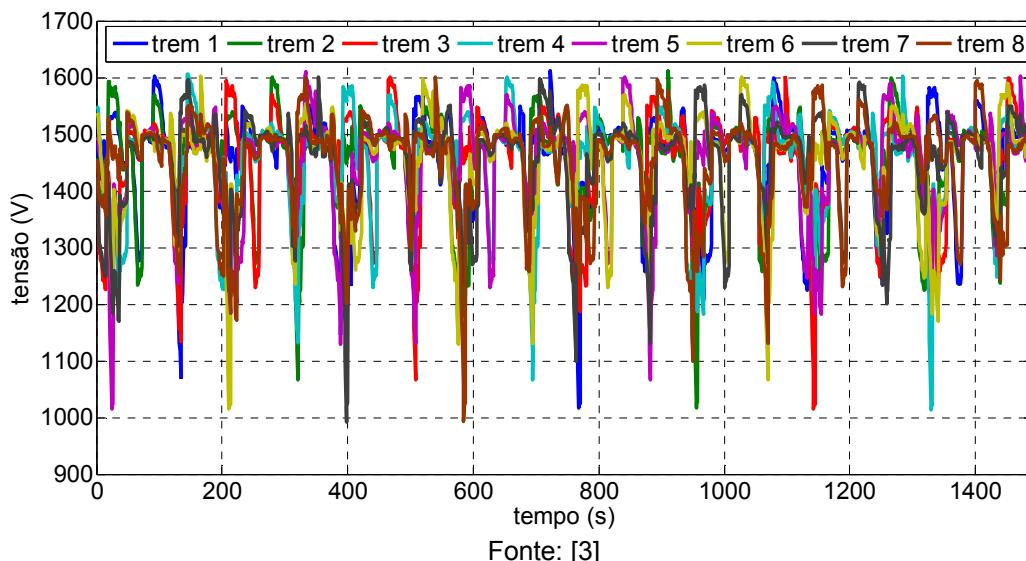
Com o objetivo de atestar a consistência dos resultados obtidos com a simulação, foram simuladas duas situações de operação do sistema: a primeira com armazenadores de energia instalados juntamente a cada retificadora; e a segunda sem armazenadores de energia.

#### 3.1. Armazenadores de energia instalados em todas as retificadoras

O primeiro cenário simulado considerou que há armazenadores de energia em todas as estações retificadoras. Seu funcionamento foi admitido com sendo idêntico a uma retificadora bidirecional, obedecendo a eq. 14. Isso quer dizer que não há energia dissipada nos resistores de frenagem, portanto não há “desperdício” de energia, sendo que toda energia regenerada é aproveitada, ou por outros trens, ou para carregar os armazenadores de energia.

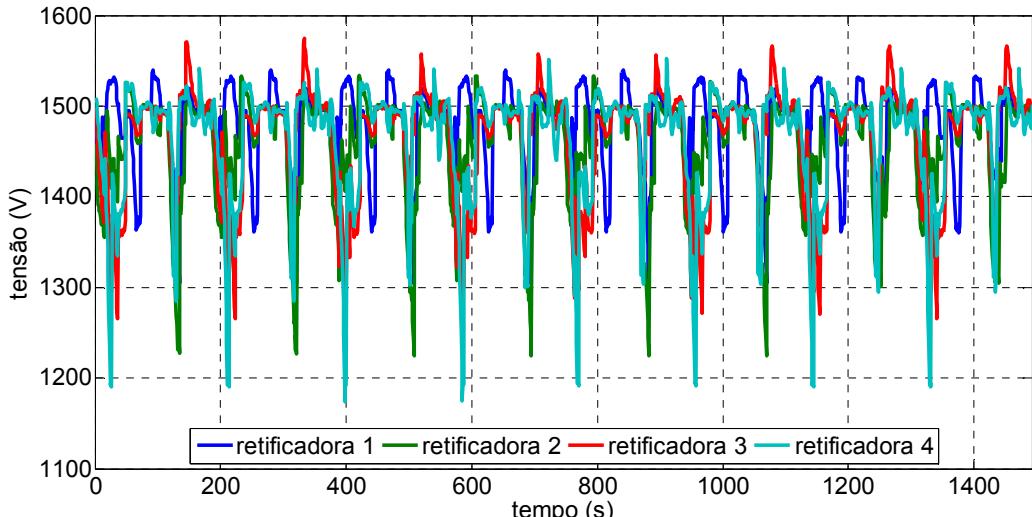
A Figura 17 ilustra as tensões sobre os trens. É possível observar que seus valores não ultrapassam 1600V, evidenciando que a energia gerada durante o processo de frenagem é absorvida pelo sistema.

Figura 17 - Valor de tensão sobre os 8 trens com armazenadores instalados nas retificadoras.



Já a Figura 18 apresenta as tensões sobre as quatro retificadoras, onde cada uma possui um armazenador instalado em paralelo.

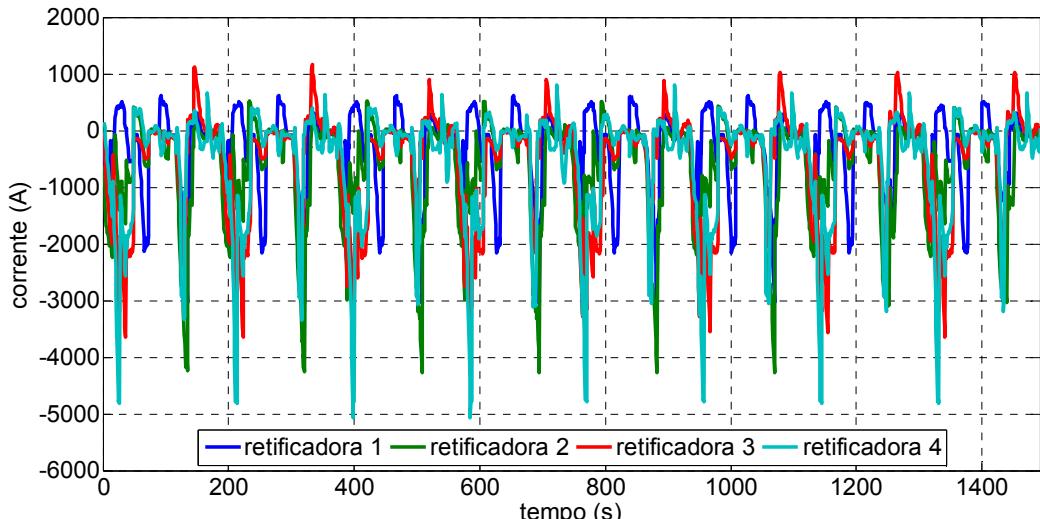
Figura 18 - Valor de tensão sobre as 4 retificadoras com armazenadores instalados em todas.



Fonte: [3]

Na Figura 19 são mostrados os valores de corrente, onde é possível observar valores positivos, pontuando os momentos em que a corrente “entra” no conjunto retificador mais armazenador, ou seja, carregam os armazenadores, e valores negativos, quando a corrente é disponibilizada para o sistema de tração.

Figura 19 - Valor das correntes das 4 retificadoras em conjunto com os armazenadores de energia.



Fonte: [3]

Separando os momentos em que as correntes nos conjuntos “retificador-armazenador” são positivas e negativas, são obtidas as Figuras 20 e 21, evidenciando os momentos em que os armazenadores são carregados e quando o conjunto disponibiliza potência ao sistema.

Figura 20 - Valor das correntes positivas (que carregam o armazenador) nas 4 retificadoras.

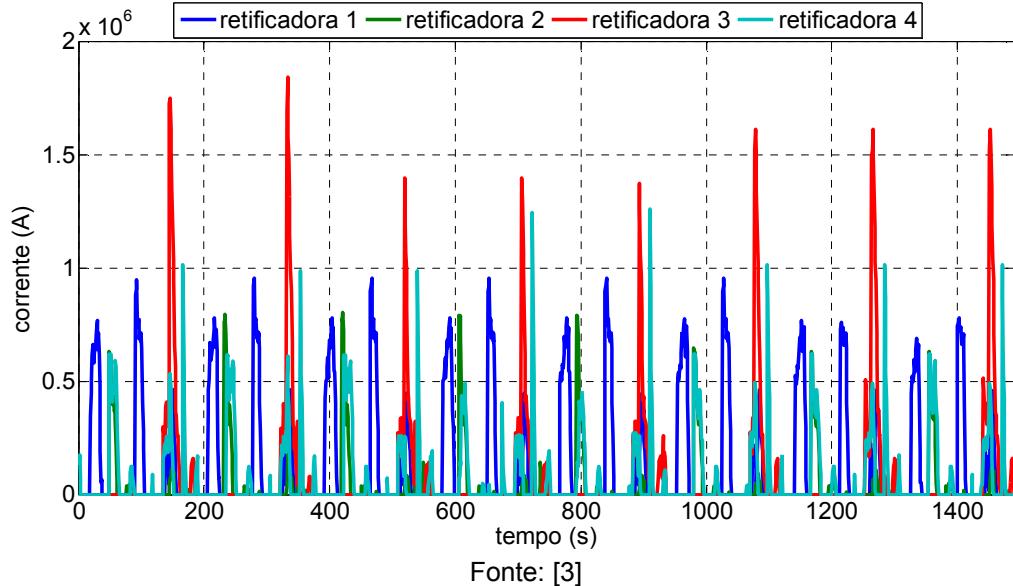
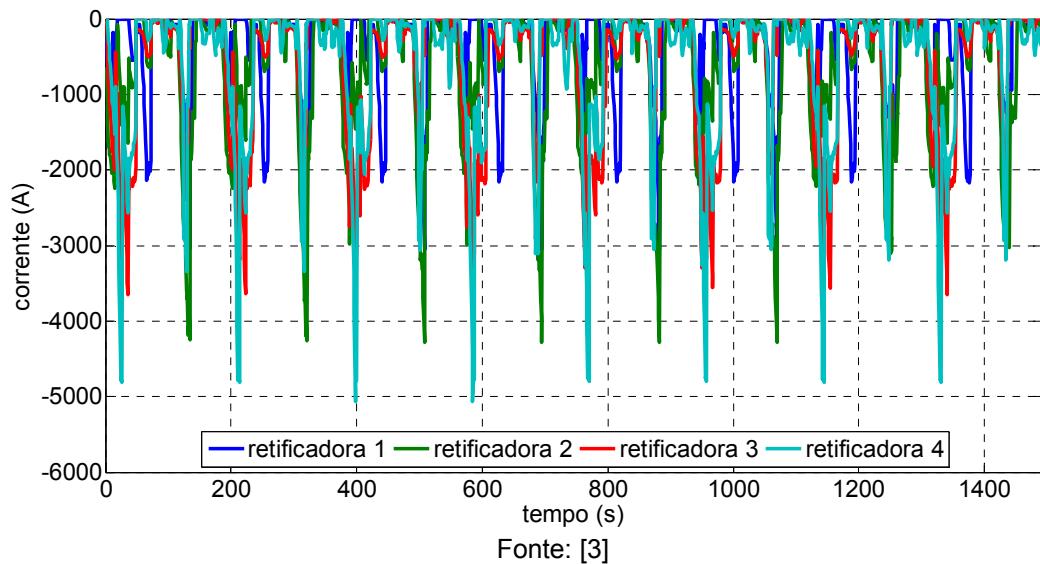
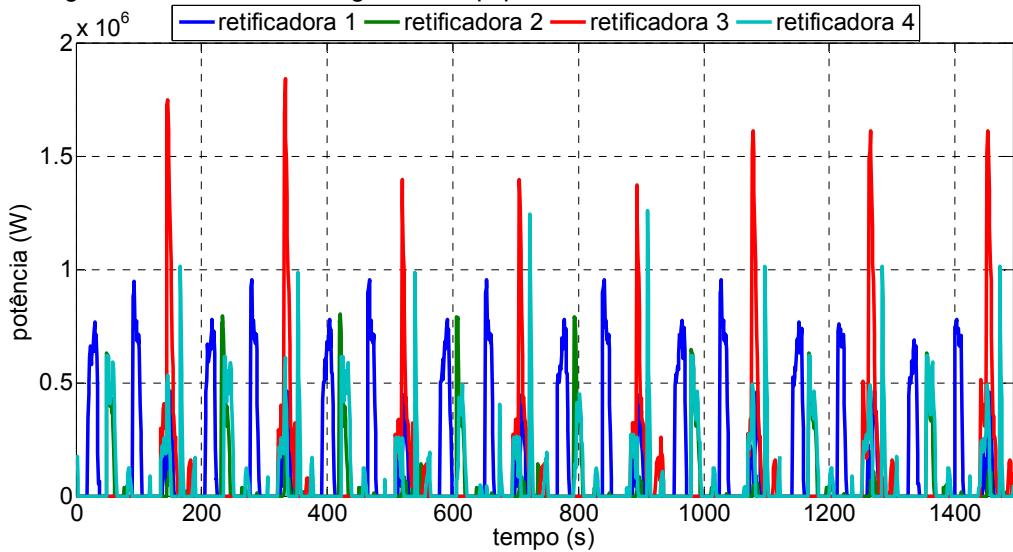


Figura 21 - Valor das correntes negativas (entregues ao sistema) das 4 retificadoras.



Nesse cenário, para se calcular a quantidade de energia que é armazenada em cada equipamento destinado a esse fim, faz-se a multiplicação dos valores positivos do corrente pelo valor de tensão nesses instantes, conforme pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 - Potência entregue aos equipamentos instalados em cada retificadora.



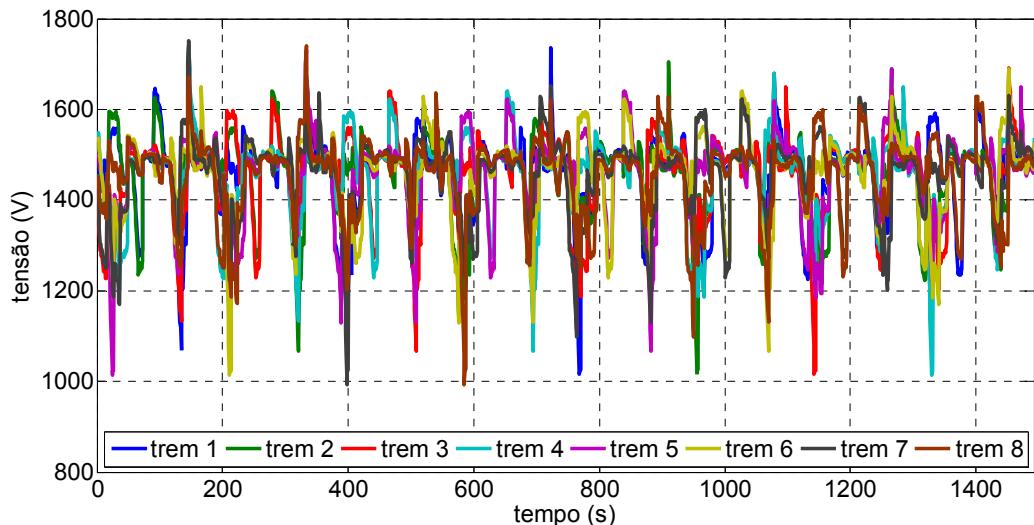
Fonte: [3]

### 3.2. Operação sem armazenadores de energia

Outro cenário simulado é sem os armazenadores de energia instalados. Nessa ocasião, quando os trens freiam, a tendência do valor de tensão sobre eles é subir, até o valor em que os resistores de frenagem são acionados. Essa elevação, ao contrário do contexto anterior, se dá, pois não há possibilidade de “devolução” de energia para a concessionária (retificadoras não regeneram) ou armazenamento de energia no sistema (não há componentes para esse fim instalados).

A Figura 23 apresenta os valores de tensão sobre os 8 trens que são mais elevados quando comparados ao caso anterior, pois não há componentes que absorvam energia ao longo da via.

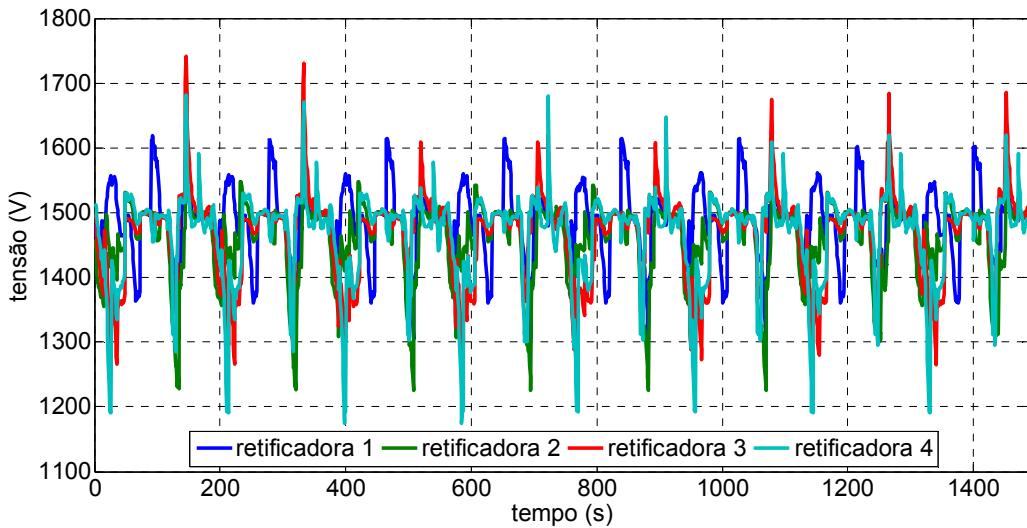
Figura 23 - Valores de tensão sobre os 8 trens sem armazenadores de energia na linha.



Fonte: [3]

A Figura 24 mostra os valores de tensão sobre as retificadoras, onde o mesmo fenômeno de aumento de valores pode ser observado, uma vez que não há componentes para regular o fluxo de potência no sistema, fazendo com que o valor de tensão do condutor de tração sofra maiores alterações.

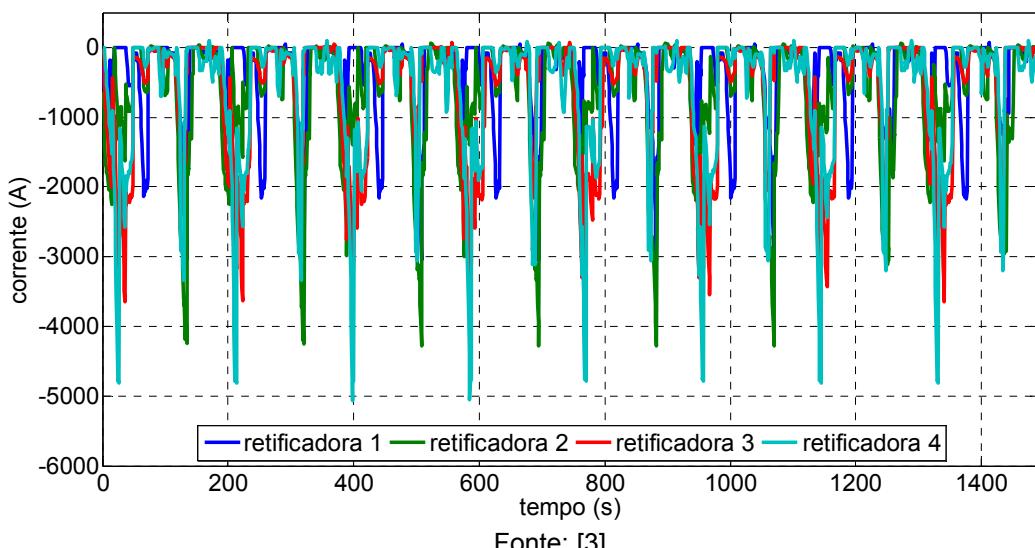
Figura 24 - Valor de tensão sobre as 4 retificadoras sem armazenadores de energia na linha.



Fonte: [3]

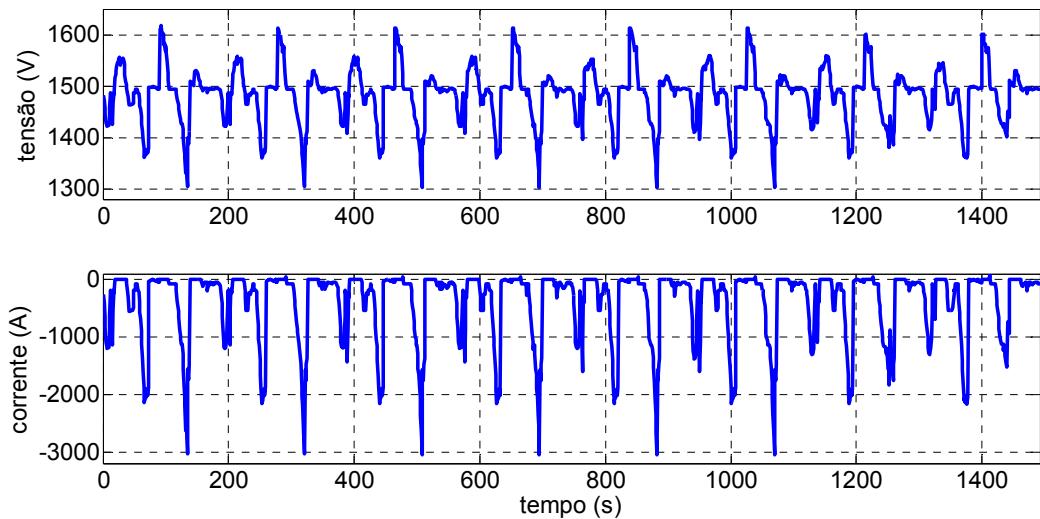
A Figura 25 ilustra as correntes nos mesmos dispositivos, que não possuem valores positivos, pois não “absorvem” energia, com isso permanecem desligadas nos intervalos de tempo onde a tensão sobre elas é maior que a tensão nominal da via (1500V), conforme ilustrado na Figura 26, tomando como exemplo a retificadora 1.

Figura 25 - Corrente das 4 retificadoras sem armazenadores de energia na linha.



Fonte: [3]

Figura 26 - Valores de tensão e corrente sobre a retificadora 1.



Fonte: [3]

#### 4. Conclusão

O intuito do presente trabalho foi colocar em prática a teoria exposta durante o curso de Especialização em Tecnologia Metroferroviária, aliando-a ao cenário econômico mundial, onde toda possibilidade de economia deve ser estudada. Como o consumo de energia elétrica do Metrô de São Paulo é uma de suas maiores despesas, um estudo que preveja sua otimização foi motivado. Primeiramente uma abordagem das tecnologias disponíveis no mercado se fez necessária, o que mostrou que a tecnologia escolhida bem como a opção por embarcá-la ou não depende de aspectos individualizados de cada aplicação e escolha dos projetistas, levando em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais. Posteriormente foi escolhido o processo de simulação computacional tendo em vista a complexidade de uma eventual coleta de dados práticos e o elevado custo de testes com equipamentos reais.

Os resultados obtidos na simulação da Linha 5-Lilás mostraram a flexibilidade da mesma e que há espaço para a inclusão de armazenadores de energia ao longo da via e que a quantidade de energia que pode ser armazenada é relevante. Comparando as situações apresentadas de inclusão ou não de dispositivos que armazenam e posteriormente fornecem energia, é possível dizer que a utilização desses pode ser uma alternativa para otimizar o consumo de energia elétrica oriunda da concessionária.

Os cenários operacionais simulados apresentaram a quantidade de energia que pode ser armazenada e a que é necessária para a operação do sistema. Essa energia armazenada equivale a economia no consumo do sistema.

No trabalho apresentado pelo Marcos Jurado Rosa, outros cenários operacionais serão apresentados, bem como a quantidade de energia que pode ser armazenada em cada um deles. Essa energia armazenada equivale a economia no consumo do sistema.

##### 4.1. Trabalhos Futuros

Tendo em vista os resultados obtidos, há espaço para que o desenvolvimento do tema continue, onde é possível: i) inserir outras restrições ao movimento na simulação de marcha que não foram levadas em consideração para o presente desenvolvimento, como rampas e curvas; ii) utilizar o simulador elaborado para estudar o comportamento de coasting (sem consumo de potência para tração, apenas para auxiliares) em vias com declives e inserir alterações nos valores de nd,

uma vez que comprovou-se pela simulação que é possível economizar energia com essa alteração; iii) alternar a quantidade de trens operando ao longo do dia, pois é sabido que o número de trens em horários de pico é diferente do que em horários de vale, bem como em dias úteis e finais de semana; iv) rever a estratégia adotada para a localização dos dispositivos armazenadores de energia; v) criar algoritmos capazes de otimizar sua localização, bem como alternativas de funcionamento testadas e; vi) mudar a lei de atuação do armazenador, bem como seu controle de fluxo de potência.

## Referências

- [1] D. M. de Moraes, L. da Cruz e R. C. Oliveira, *Estudo comparativo entre armazenador capacitivo, volante de inércia e inversor*, São Paulo, SP, 2007.
- [2] Metrô-SP, *Plantas civis da Linha 5-Lilás*, 2002.
- [3] A. F. d. S. Filho, L. C. E. de Queiroz, M. A. Pimenta e M. J. Rosa, “Uso de simulação para análise de estratégias que visam a economia de energia em sistemas Metroferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento,” 2016.
- [4] C. L. Pires, *Simulação do sistema de tração elétrica metro-ferroviária*, 370 p., São Paulo, 2006.
- [5] Y. Cai, M. R. Irving e S. H. Case, *Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking*, 1995.