

MARCOS JURADO ROSA

Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento – Aplicabilidade do simulador

São Paulo

2016

MARCOS JURADO ROSA

Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento – Aplicabilidade do simulador

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

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Lourenço Matakas Junior

v.1

São Paulo
2016

Rosa, Marcos Jurado

Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento – Aplicabilidade do simulador/ M. J. Rosa -- São Paulo, 2016.
27 p.

Monografia (Especialização em Especialização em Tecnologia MetroFerroviária.)
- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE - Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Crise energética 2.Reaproveitamento de Energia. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia
II.t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCOS JURADO ROSA

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

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

Instituição: Universidade de São Paulo Assinatura:

Prof. Dr. Lourenço Matakas Júnior

Instituição: Universidade de São Paulo Assinatura:

Prof. Dr. Mauricio Barbosa de Camargo Salles

Instituição: Universidade de São Paulo Assinatura:

RESUMO

Frente os diversos problemas do país quanto ao fornecimento de energia, o presente trabalho optou pelo estudo do sistema de armazenador de energia em sistemas metro ferroviários, cujo objetivo é gerar economia, tornando-os mais eficientes.

O sistema de tração é responsável pela maior fatia de consumo da Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô, portanto, volta-se o foco desse trabalho a esse sistema, buscando o reaproveitamento da energia regenerativa desperdiçada.

Visando atingir as expectativas do objetivo central, foi elaborado um simulador que permite utilizar diversos cenários, como a quantidade e características dos trens e controle do nível de desempenho, buscando melhores opções a serem implantadas com menor impacto operacional ou financeiro. Para esse estudo foi utilizada a linha 5 do Metrô de São Paulo.

Fica, pois, o entendimento extraído desse estudo, que a utilização dos armazenadores é uma solução eficiente, contudo, devido aos altos custos de implantação, faz-se necessário um estudo mais rigoroso quanto à combinação mais indicada para cada linha.

O simulador foi adicionalmente utilizado neste trabalho, para o estudo, via simulador, de uma alternativa para se obter economia de energia, de baixíssimo custo e fácil implantação, que consiste na restrição de velocidade final dos trens.

Palavras-chave: Crise energética, eficiência energética, linha 5 do Metrô, reaproveitamento de energia regenerativa

ABSTRACT

Brazil has been facing several problems with power generation and distribution, so this paper is focused in the study of energy storer system used in the subway and railway systems, which purpose is to save energy, making them more efficient.

The traction system (sistema de tração) is responsible for the largest portion of energy consumption in the Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ (Sao Paulo Metropolitan Company), therefore the objective of this study is on this system, that is focused on the reuse of wasted regenerative energy.

To meet the expectations of the principal goal, it has been designed a simulator which can be used in different scenarios, such as the quantity and the characteristics of the trains, and also the control of the performance level, seeking better options to be implemented that will present the lower operational or financial impact. For this study it was used the city of Sao Paulo METRO - Line 5, also known as Lilac Line.

This study concludes that the use of storers is an efficient solution; however, due to high implementation costs, it is also necessary a rigorous study related to the combination more suitable for each line.

The simulator has been used in this paper, to study, via simulator, an alternative to achieve energy saving, very low cost and easy to implement, that consists in the final speed restriction of trains.

Keywords: energy crisis, energy efficiency, city of Sao Paulo Metro – Line 5, regenerative energy recycling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático de via da Linha 5	12
Figura 2 - Percurso do trem - Linha 5-Lilás	13
Figura 3 - Posicionamento dos trens	13
Figura 4 - Posição e potência do trem no tempo	14
Figura 5 - Valor de tensão nas retificadoras	15
Figura 8 - Comparação do consumo de energia - trem com e sem restrição...	18
Figura 9 - Comparação de velocidade - trem com e sem restrição	18
Figura 10 - Potência nos armazenadores durante a operação com 8 trens - instalados juntos às retificadoras	20
Figura 11 - Potência fornecida por cada retificador com 8 trens operando	21
Figura 12 – Potência nos armazenadores durante a operação com 7 trens - instalados juntos às retificadoras	22
Figura 13 - Potência consumida com 7 trens operando	22
Figura 14 - Potência armazenada nos dispositivos instalados juntamente as retificadoras e 6 trens operando	23
Figura 15 - Potência consumida com 6 trens operando	23
Figura 16 - Potência armazenada nos dispositivos instalados juntamente as retificadoras, com R1 e 8 trens operando	25
Figura 17 - Potência consumida com R1 e 8 trens operando	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização das estações da Linha 5-Lilás	14
Tabela 2 - Restrição de velocidade R1.....	16
Tabela 3 – Resumo energético com 8 trens operando.....	21
Tabela 4 - Resumo energético com 7 trens operando	23
Tabela 5 – Resumo energético com 6 trens operando.....	24
Tabela 6 - Quantidade de energia armazenada e entregue a tração com R1 e 8 trens operando.	26
Tabela 7 - Resumo da possível economia mensal da Linha 5-Lilás com o acréscimo de armazenadores de energia	26

SUMÁRIO

Introdução	10
1. Características da linha e configuração do simulador	12
2. Economia de energia com a diminuição de velocidade do trem	16
3. Economia de energia utilizando armazenadores junto às retificadoras.....	20
4. Economia de energia a restrição de velocidade R1 e armazenadores junto às retificadoras.	25
5. Conclusão	27
Referências	28

Introdução

Motivado pela crise hídrica do país e incapacidade de suprimento elétrico para atender o crescimento tecnológico, tornou-se necessário e urgente a busca por alternativas em todos os setores da companhia de equipamentos e práticas de alta eficiência energética.

Para o material rodante, não é possível e nem viável a substituição dos trens ou sistemas do trem por equipamentos mais eficientes, portanto este trabalho foi voltado ao estudo de um sistema acoplado que gera economia de energia tornando-o mais eficiente, além de outras opções que serão apontadas ao longo desse trabalho, sendo estas de baixíssimo custo e fácil implantação.

O consumo médio mensal do Metrô de São Paulo em 2014 foi de 46,2GWh [1], sendo a tração de trens correspondente a aproximadamente 70% do total, onde foi focado nosso estudo.

Para se ter uma base dos ganhos possíveis com a utilização de recuperação da energia de frenagem, a análise da linha 3 – vermelha do Metrô mostra que 5% da energia [4] é queimada nos resistores de frenagem. Isso equivale a 1,6GWh/mês e aproximadamente R\$ 304.000,00 mensais estimado com o custo do MWh atual de R\$ 190,00.

Utilizando-se o simulador computacional desenvolvido, citado na parte do trabalho desenvolvida por Marcio Annibal Pimenta, é possível simular diferentes cenários com a possibilidade de se verificar a influência de parâmetros como a quantidade e características dos trens, a variação dos perfis de velocidade entre outros.

Escolheu-se para esse projeto, a linha 5 – lilás do Metrô de São Paulo com o objetivo de reaproveitamento máximo da energia gerada pela frenagem elétrica.

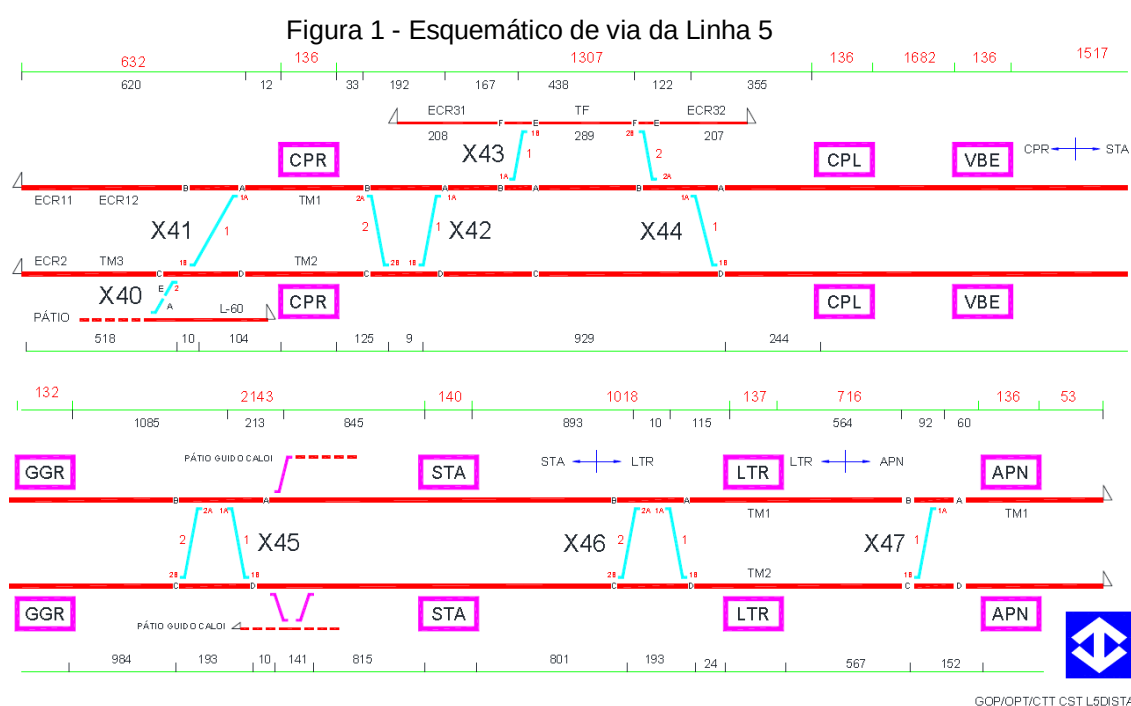
Esse trabalho fará uma breve explanação no capítulo 1 sobre as características da linha 5, do trem que foram utilizadas para elaboração do simulador, já no capítulo 2 será abordada a simulação realizada com a diminuição da velocidade máxima da via, sendo que no capítulo 3 abordou-se sobre a simulação com armazenadores e apresentou-se valores possíveis economia de energia para os diversos cenários da via, finalizando com o

capitulo 4 analisando uma combinação de utilização de armazenadores com a restrição de velocidade.

1. Características da linha e configuração do simulador

Para elaboração do simulador, foram levadas em consideração todas as características técnicas e operacionais da linha 5 do Metrô. Inicialmente criamos um simulador de marcha utilizando o MATLAB e em seguida inserido a parte elétrica possibilitando a simulação de diversos cenários.

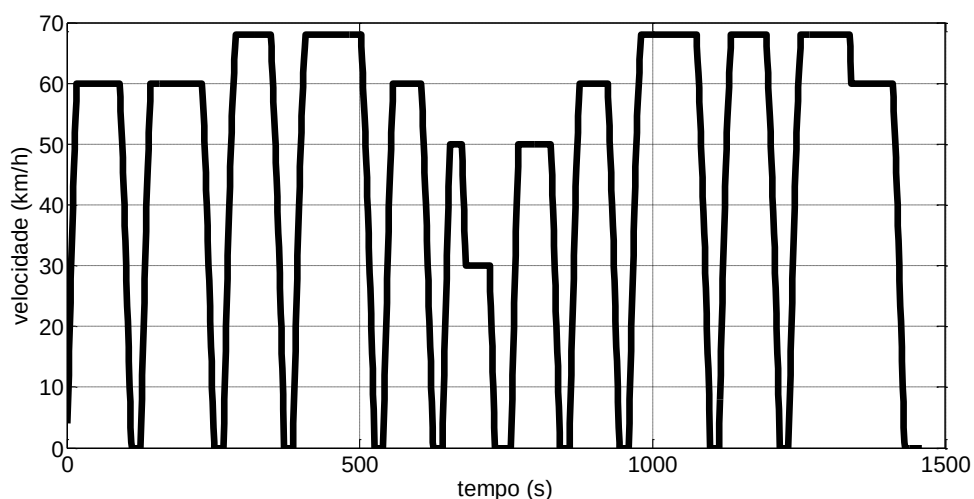
A linha 5 do Metrô atualmente está composta de 7 estações, conforme mostrado na Figura 1, 3 subestações retificadoras de 1500Vcc e 8 trens em horários de pico que abrange das 06h00 às 10h08 e das 16h30 às 19h59.



Os trens operam de modo automático e gerenciado pelo ATC (Automatic Train Control) que tem como objetivo o controle de maneira centralizada através do CCO (centro de controle operacional) da movimentação dos trens, mantendo um padrão nos horários das viagens e no headway (intervalo de tempo entre trens). O sistema ATC transmite informações para os trens por meio de sinais modulados em frequência que trafegam pelos trilhos e são recebidos pelo trem através de antenas instaladas no truque e próximas ao trilho. Esse sinal é codificado pelo trem em códigos de velocidade (limite de velocidade).

O perfil de velocidade típico, para a linha 5, está mostrado na Figura 2, onde podemos observar os limites de velocidades 68, 60 e 50 km/h com aceleração de $1,12 \text{ m/s}^2$ e desaceleração de $1,2 \text{ m/s}^2$. Os tempos de portas abertas nas estações intermediárias estão programados para 18 segundos e nas estações terminais para 30 segundos.

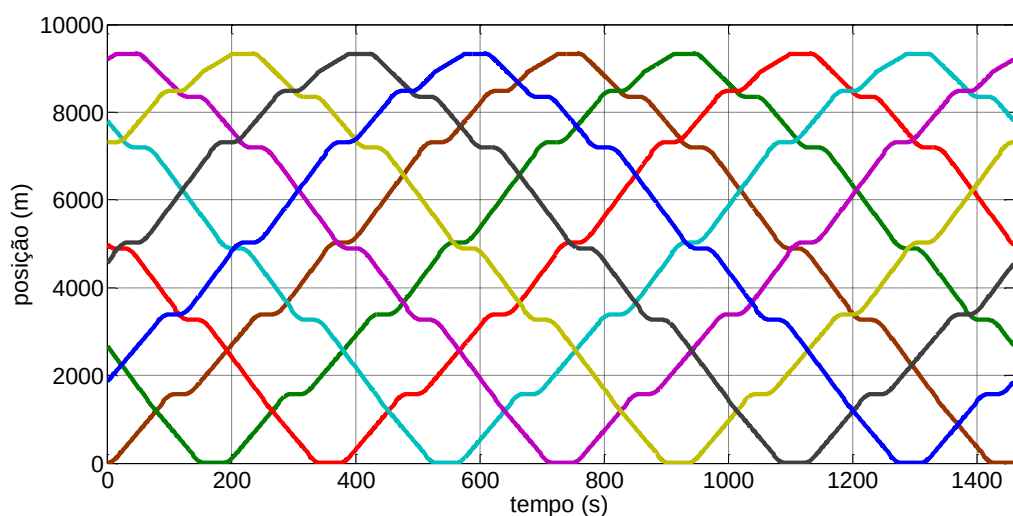
Figura 2 - Percurso do trem - Linha 5-Lilás



Fonte: (Rosa, 2016)

O headway de 183 segundos foi calculado utilizando-se do tempo que o trem leva para percorrer toda a linha, ou seja, 1459 segundos [4], dividido pelo número de trens em operação, que é de atualmente 8 trens. Na Figura 3 temos a posição de cada trem ao longo do tempo.

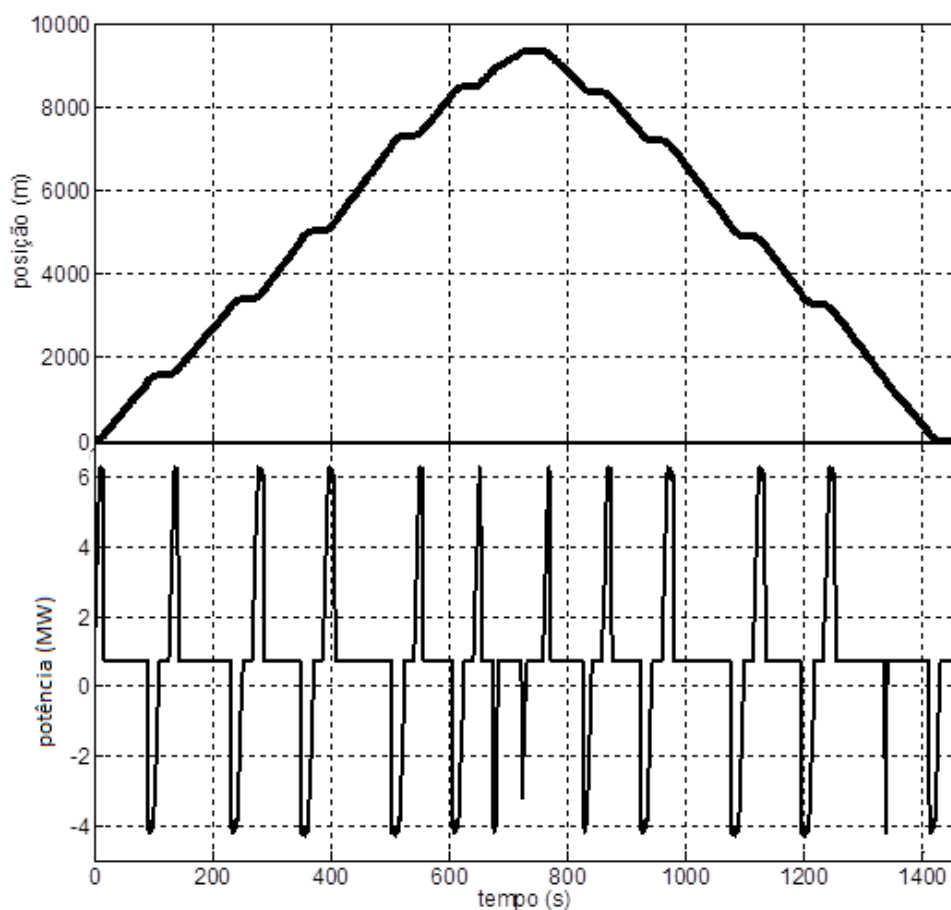
Figura 3 - Posicionamento dos trens



Fonte: (Rosa, 2016)

Na Figura 4 temos a posição e a potência do trem em função do tempo, onde a potência consumida pelo trem está representada como positiva e a potência disponibilizada pelo trem está representada como negativa.

Figura 4 - Posição e potência do trem no tempo



Fonte: (Rosa, 2016)

A tabela 1 mostra a distâncias das estações ao longo da via.

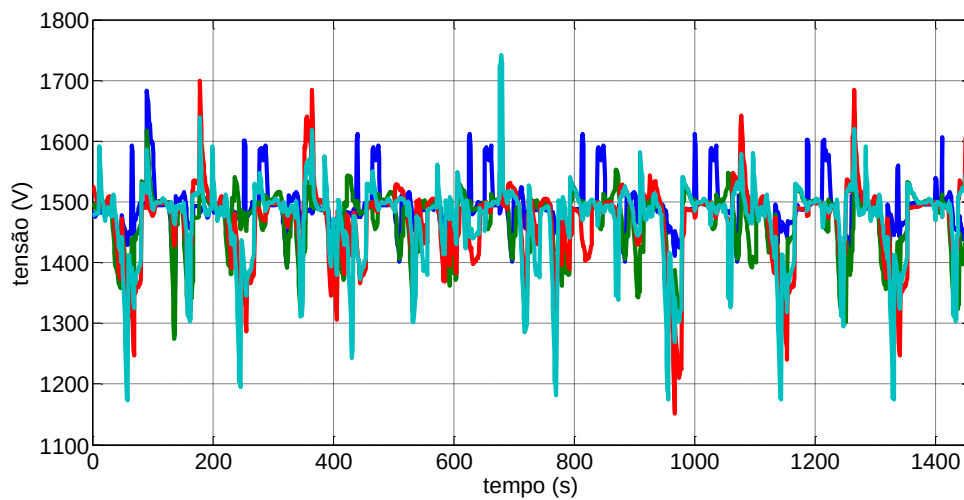
Tabela 1 - Localização das estações da Linha 5-Lilás

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: (Intranet do Metrô SP, 2016)

Para inserção da parte elétrica, foram utilizados valores de tensão nominal das retificadoras de 1500Vcc, tensão em vazio de 1800Vcc e potência nominal de 7MW. A **Figura 5** representa as tensões nas retificadoras.

Figura 5 - Valor de tensão nas retificadoras



Fonte: (Rosa, 2016)

2. Economia de energia com a diminuição de velocidade do trem

Como alternativa de baixo custo financeiro para a redução do consumo de energia dos trens, e aproveitando da disponibilidade do simulador de marcha implementado neste trabalho, estudou-se o efeito da redução de velocidade final, impondo uma restrição chamada de R1, na energia consumida pelos trens. Essa restrição é utilizada pelo ATC quando o trem está com baixa taxa de frenagem devido a alguma falha no sistema de freios, onde essa restrição impõe ao sistema uma redução para 86% na velocidade final conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Restrição de velocidade R1

Velocidade normal	Velocidade com restrição R1
80	69
68	58
60	52
50	43
35	30
20	17
10	9
0	0

Fonte: (Manual do trem – frota F do Metrô SP, 2002)

Com a restrição de velocidade imposta ao trem, os coeficientes de aceleração e desaceleração não são alterados, o único parâmetro que é alterado é a velocidade final.

De acordo com os resultados preliminares conseguidos através da simulação computacional da Linha 5, é possível comprovar que com pouca alteração na velocidade, temos grande influencia na quantidade de energia consumida. Conforme pode ser visto na

Figura 6, a potência consumida pelo trem tem seu pico durante o tempo de aceleração e desaceleração. Como R1 não altera taxa de aceleração e desaceleração, o valor da derivada positiva ou negativa da curva de potência consumida ou regenerada permanece inalterado, bem como seu valor de platô durante o processo, para as duas situações (com e sem restrição). Dessa forma, o que influencia no consumo de energia é somente o tempo em que o trem fica acelerando, ou seja, o tempo que o trem leva para chegar a uma velocidade 86% menor, também é menor.

Sabe-se que teoricamente o valor da potência consumida durante o período de tempo em que o trem está em velocidade de cruzeiro é maior quanto maior a velocidade do trem devido principalmente à força aerodinâmica contrária ao movimento, porém para as velocidades em que o Metrô de São Paulo opera, essa diferença pode ser desconsiderada, pois o tempo em que o trem permanece em velocidade de cruzeiro é pequeno devido a distância entre estações pequena e a diferença da força aerodinâmica contrária ao movimento é relativamente pequena, pois a diferença de velocidades médias dos trens com e sem restrição são pequenas.

No caso simulado mostrado na

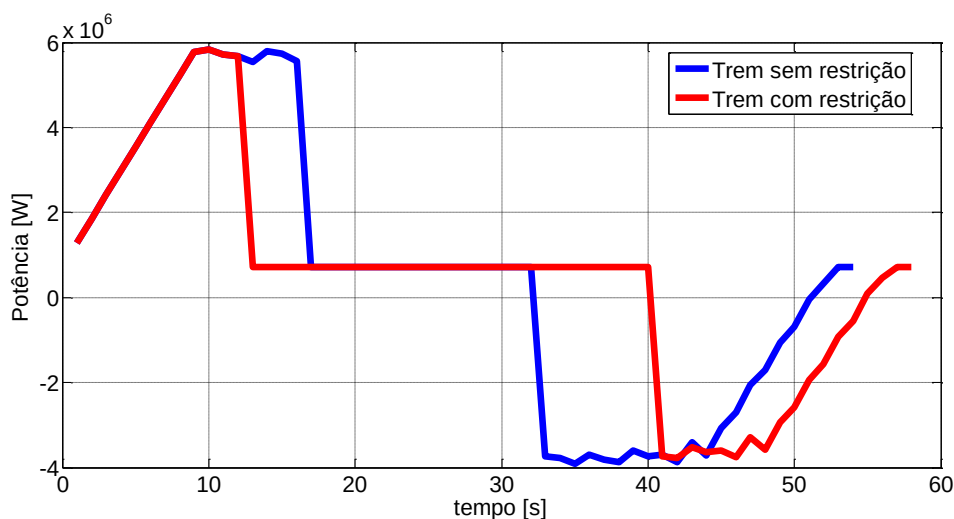
Figura 6, o trem levou 17 segundos para acelerar de 0 a 60km/h, sendo 9 segundos até chegar no valor de platô e mais 8 segundos estáveis no valor de platô, enquanto o mesmo trem com a mesma taxa de aceleração leva 13 segundos para acelerar de 0 a 50km/h, sendo os mesmos 9 segundos até chegar no valor de platô pois a taxa de aceleração não foi alterada, porém ficando somente 4 segundos estáveis no valor de platô, 50 % a menos do tempo do trem sem restrição, resultando em menor consumo de energia. Observa-se então que com uma restrição de 16,7% da velocidade conseguiu-se uma diminuição de 23,53% do tempo.

Em contra partida, a quantidade de energia que o trem pode regenerar caso a via esteja receptiva, também diminui. Para essa discussão, supõe-se que toda a energia do trem será absorvida pela via. No exemplo, tomando o

mesmo raciocínio para a aceleração, a quantidade de energia regenerada pelo trem com restrição é 36% menor comparada ao trem sem restrição. A Figura 7 compara os perfis de velocidade do trem com restrição e do trem sem restrição.

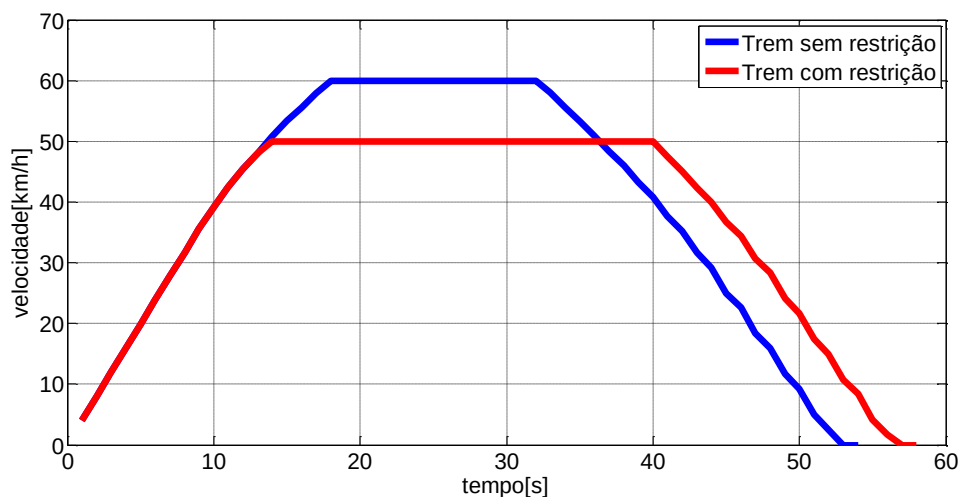
O intuito da simulação foi comprovar a possibilidade de economia de energia reduzindo-se a velocidade final do trem ao longo dos trechos de via, uma vez que a economia na aceleração é maior que a perda de disponibilidade de energia durante a frenagem, portanto em média, o consumo global será menor do trem com restrição comparado ao trem sem restrição.

Figura 6 - Comparação do consumo de energia - trem com e sem restrição



Fonte: (Rosa, 2016)

Figura 7 - Comparação de velocidade - trem com e sem restrição



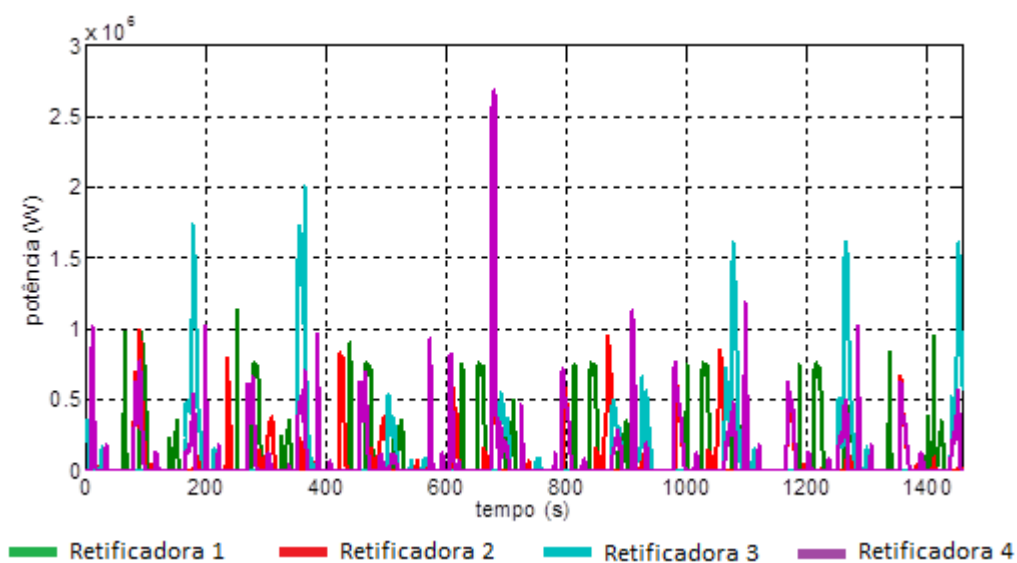
Fonte: (Rosa, 2016)

A utilização desse recurso fica condicionada deverá ser ponderada devido aos atrasos ao tempo de viagem, onde para essa linha representou um atraso por volta (ida e volta) de 144 segundos, isso representa 9% de voltas perdidas e baixando a capacidade de 39.046 para 35.532 passageiro/hora/sentido.

3. Economia de energia utilizando armazenadores junto às retificadoras

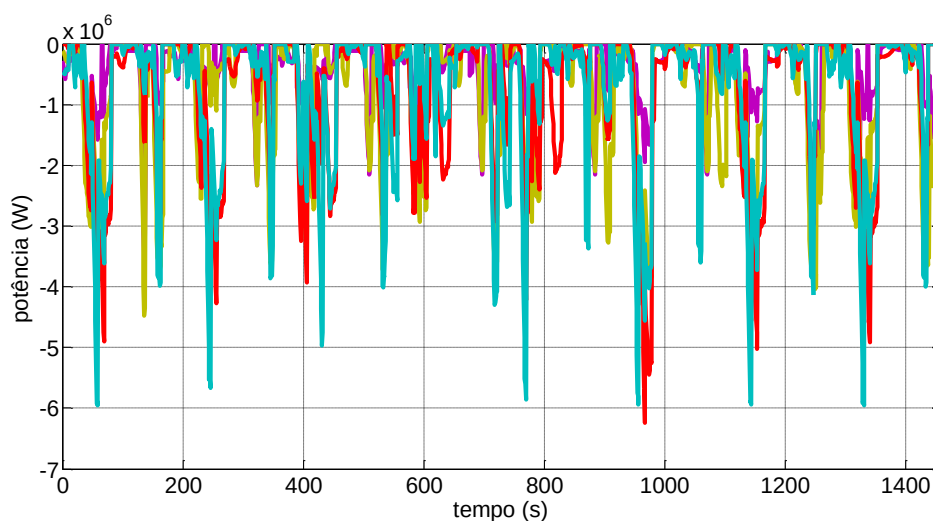
Utilizando-se novamente o simulador elaborado e explicado na parte do Márcio Pimenta, para a simulação com 8 trens, instalando-se armazenadores de energia, como explicados e exemplificados nas partes do Luiz Queiroz e do Alberto Filho, posicionados junto a cada estação retificadora, considerando-se que a energia positiva (energia da regeneração dos trens), seria reaproveitada para o carregamento do armazenador conforme **Figura 8** ou até mesmo no caso de uma retificadora bidirecional onde poderíamos vende-la à concessionária, portanto não está sendo analisado nesse momento a devolução dessa energia armazenada. A **Figura 9** mostra as potências fornecidas por cada retificadora quando a linha está operando com 8 trens.

Figura 8 - Potência nos armazenadores durante a operação com 8 trens - instalados juntos às retificadoras



Fonte: (Rosa, 2016)

Figura 9 - Potência fornecida por cada retificador com 8 trens operando



Fonte: (Rosa, 2016)

Para cálculo da quantidade de energia em cada armazenador (P_a), utilizou-se a Equação 1, representada pela somatória de todos os valores instantâneos de potência positiva ao longo do trajeto do trem t_t (1459s), multiplicado pela fração de hora do movimento correspondente. Enquanto a energia consumida da tração, P_t , é dada pela Equação 2, analogamente pegando valores negativos de potência.

$$P_a = \sum_1^t P_a(t) \cdot \frac{3600}{t_t} \quad (1)$$

$$P_t = \sum_1^t P_t(t) \cdot \frac{3600}{t_t} \quad (2)$$

Aplicando esse conceito, a Energia em cada componente é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo energético com 8 trens operando

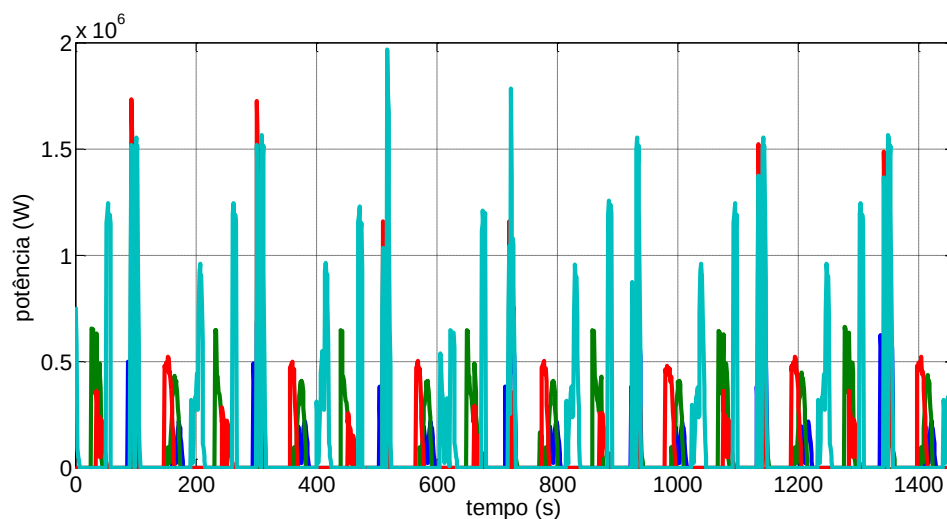
Número do armazenador	Energia armazenada P_a (MWh)	Numero do retificador	Energia consumida P_t (MWh)
1	266,54	1	1480,4
2	196,00	2	3012,9
3	302,67	3	3073,6
4	312,31	4	2961,8

Fonte: (Rosa, 2016)

O cenário acima corresponde a operação de 8 trens, porém devido a indisponibilidade do trem, somente 7 trens operam e em outros momentos como os de vale e finais de semana, somente 6 trens, portanto esses cenários operacionais também foram simulados, com seus resultados exposto nas Figura 10 e

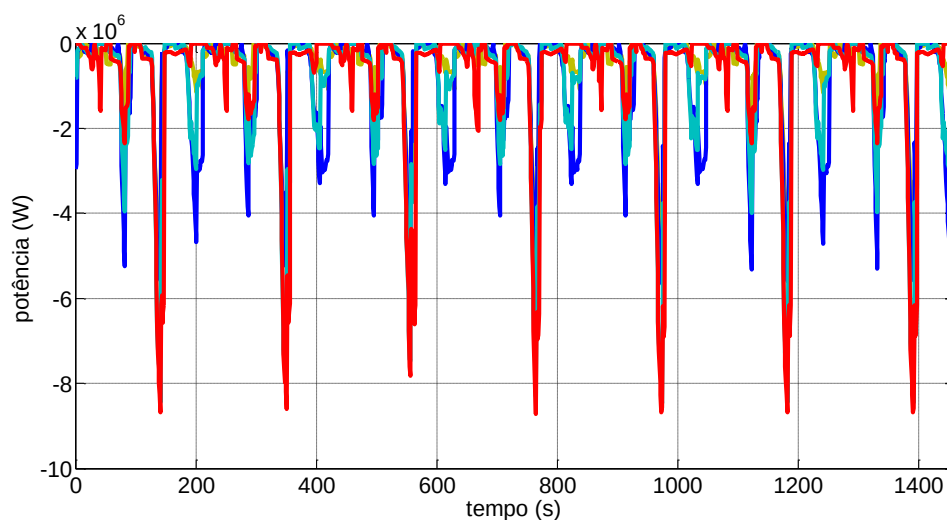
Tabela 4, e Figura 12 e Tabela 5. Vale lembrar que o valor do headway fica maior quanto menor o numero de trens na via, sendo 209s para 7 trens e 243 para 6 trens operando.

Figura 10 – Potência nos armazenadores durante a operação com 7 trens - instalados juntos às retificadoras



Fonte: (Rosa, 2016)

Figura 11 - Potência consumida com 7 trens operando



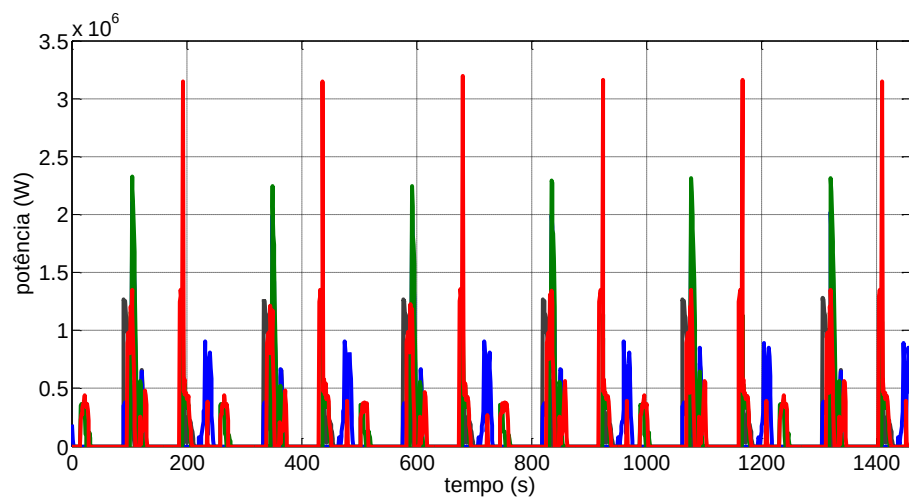
Fonte: (Rosa, 2016)

Tabela 4 - **Resumo energético** com 7 trens operando

Número do armazenador	Energia armazenada (MWh)	Número do retificador	Energia consumida (MWh)
1	173,10	1	1827,8
2	224,81	2	3179,8
3	236,17	3	3142,0
4	525,71	4	2878,6

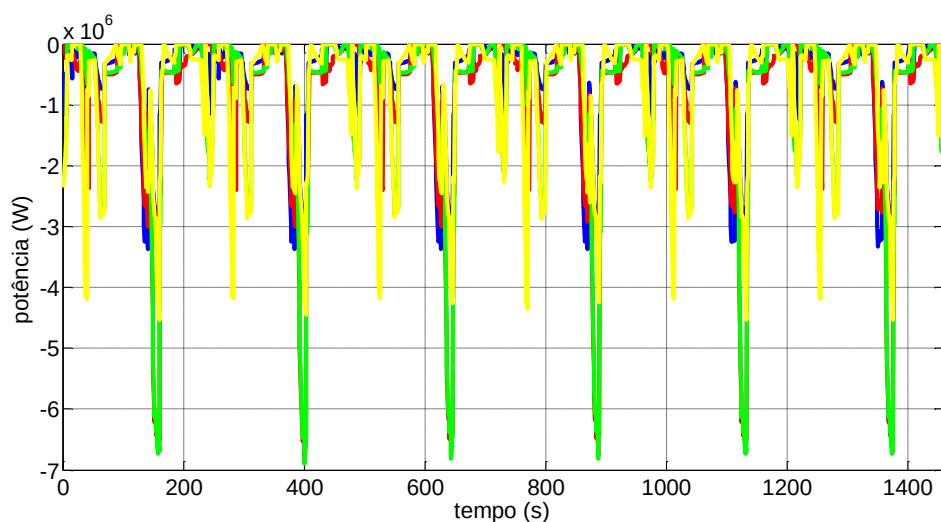
Fonte: (Rosa, 2016)

Figura 12 - Potência armazenada nos dispositivos instalados juntamente as retificadoras e 6 trens operando



Fonte: (Rosa, 2016)

Figura 13 - Potência consumida com 6 trens operando



Fonte: (Rosa, 2016)

Tabela 5 – Resumo energético com 6 trens operando

Número do armazenador	Energia armazenada (MWh)	Número do retificador	Energia entregue a tração (MWh)
1	287,26	1	1869,0
2	404,99	2	2892,0
3	390,05	3	2955,3
4	536,51	4	2644,7

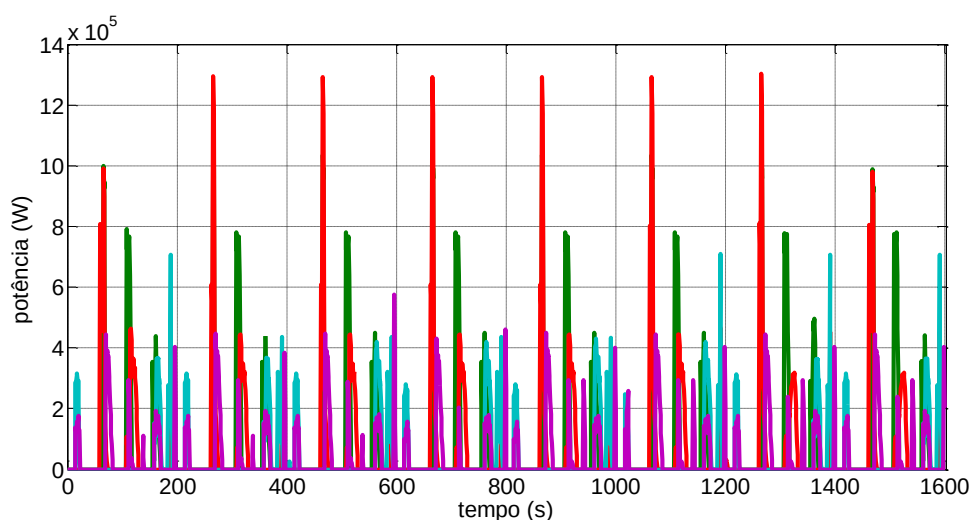
Fonte: (Rosa, 2016)

4. Economia de energia a restrição de velocidade R1 e armazenadores junto às retificadoras.

Outro cenário simulado foi utilizando-se a restrição de velocidade R1 combinada com a instalação de armazenadores e 8 trens em operação.

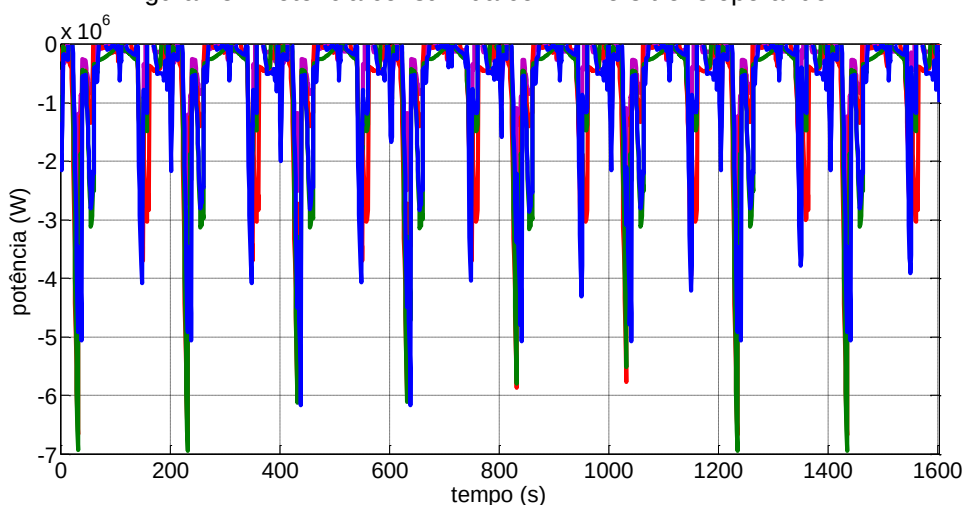
Os resultados estão expostos nas Figura 14 Figura 15 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde nota-se que como a velocidade média do deslocamento foi diminuída, consequentemente o tempo de deslocamento do trem aumentou, passando de 1459s para 1603s, com isso o headway para 8 trens foi elevado de 182 para 200s.

Figura 14 - Potência armazenada nos dispositivos instalados juntamente as retificadoras, com R1 e 8 trens operando.



Fonte: (Rosa, 2016)

Figura 15 - Potência consumida com R1 e 8 trens operando.



Fonte: (Rosa, 2016)

Tabela 6 - Quantidade de energia armazenada e entregue a tração com R1 e 8 trens operando.

Número do armazenador	Energia armazenada (MWh)	Número do retificador	Energia entregue a tração (MWh)
1	223,81	1	1334,85
2	207,15	2	2644,59
3	135,01	3	2661,97
4	146,72	4	2668,89

Fonte: (Rosa, 2016)

O que é considerado como economia, equivale a energia com potencial de ser armazenada, portanto não será necessário que mesma seja consumida da concessionária de energia no momento da tração, portanto se essa energia for subtraída da quantidade de energia que é disponibilizada para tração haverá economia. As estratégias possíveis para sua utilização será tema de discussão para trabalhos futuros.

Um resumo foi elaborado entre os cenários simulados e está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo da possível economia mensal da Linha 5-Lilás com o acréscimo de armazenadores de energia

Cenários	Energia armazenada (MWh)	Energia consumida (MWh)	Percentual de economia
8 trens	1077,52	10528,7	10,23%
7 trens	1159,79	11028,2	10,52%
6 trens	1618,81	10361	15,62%
8 trens com R1	712,68	9310,29	7,65%
Economia devido a restrição R1		11,57%	

Fonte: (Rosa, 2016)

5. Conclusão

Dentre as alternativas mostradas para economia de energia, a redução de velocidade se mostrou eficiente e sem necessidade de investimento para implantação, gerando somente prejuízos operacionais como: aumento do tempo de viagem do usuário, diminuição da vazão de usuários causando a inaplicabilidade em horários de pico devido à característica de superlotação do Metrô de São Paulo, mas podemos afirmar é uma alternativa para ser utilizada de outra forma sem gerar os prejuízos operacionais, sendo que em alguns trechos de via com declive, o sistema ATC acelera o trem em aceleração máxima e quando atingido o código de via, ele aplica freio no trem para não permitir que ultrapasse o código, sendo que nessas situações, o trem poderia tracionar somente até sair da inércia ficando em coasting e deixando o aumento da velocidade por conta do declive.

Fica claro que a utilização dos armazenadores é a solução mais eficiente, pois não afeta em nenhum ponto a operação comercial, porém devido aos altos custos de implantação, deve-se ser estudada qual a combinação mais eficiente para uma determinada linha.

Para trabalhos futuros pode-se utilizar o simulador elaborado para a simulação do sistema de coasting em vias com declives, a combinação mais eficiente de armazenadores: i) alterando suas posições (longe ou perto da retificadora), ii) alterando suas leis de funcionamento (neste trabalho a corrente injetada é função apenas da tensão em seus terminais), iii) utilizando-se de muitos armazenadores ao longo da via de pequeno porte ou poucos armazenadores de grande porte, iv) utilizando unidades estática ou móveis, instaladas nos trens, v) utilizando uma retificadoras bidirecionais, etc.

Referências

- [1] METRÔ-SP - Relatório de Sustentabilidade 2014. Disponível em <http://www.metro.sp.gov.br/metro/sustentabilidade/pdf/relatorio-sustentabilidade-2014.pdf> - Acesso em outubro de 2015.
- [2] ALSTOM, Manual de tração - frota F do Metro-SP, Apostila, São Paulo, 2009.
- [3] D. M. de Moraes, L. A. (2007). Estudo comparativo entre armazenador capacitivo, volante de inércia e inversor. Escola Politécnica de São Paulo . São Paulo, SP, Brasil.
- [4] Pires, C. L. (2006). Simulação do sistema de tração elétrica metro-ferroviária. *Escola Politécnica de São Paulo* . 370 p., São Paulo, SP.
- [5] INTRANET, Site interno do Metrô de São Paulo. Acesso em outubro de 2015.