

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS METROVIÁRIOS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS SUBESTAÇÕES DE TRAÇÃO

Sergio Luiz Pereira, Carlos Alberto de Sousa

Departamento de Engenharia de Energia e Automação - PEA, São Paulo - SP, Brasil

e-mails: carlos.as@usp.br, sergio@pea.usp.br

Resumo - Reaproveitar a energia da frenagem regenerativa produzida pelos trens de um sistema metroviário é essencial para o aumento da eficiência energética do sistema, mas de difícil aplicação no metrô de São Paulo devido ao pequeno intervalo entre composições e as partidas e frenagens frequentes. Este artigo fornece uma avaliação abrangente e comparação das soluções atualmente disponíveis para a recuperação e gestão adequada da energia da frenagem regenerativa no transporte metroviário. Neste artigo são comparadas as diferentes estratégias existentes atualmente para aumentar o aproveitamento da energia regenerada da frenagem dos trens, como o armazenamento de energia em baterias estacionárias ou em supercapacitores, a utilização de subestações inversoras recuperadoras de energia como forma de devolver o excedente de energia regenerada para a rede de distribuição e implementação de algoritmo genético para otimização do diagrama horário de partidas e paradas dos trens.

Palavras-Chave - Algoritmo Genético, Armazenadores de Energia, Eficiência Energética, Frenagem Regenerativa, Metrô, Subestação Retificadora.

COMPARATIVE STUDY OF SUBWAY SYSTEMS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF TRACTION SUBSTATIONS

Abstract – Reusing the regenerative braking energy of trains produced by a subway system is essential to increase the energy efficiency of the system, but difficult to apply in the São Paulo subway due to the small interval between compositions and departures and frequent braking. This paper provides a comprehensive evaluation and comparison of currently available solutions for the recovery and proper management of energy in regenerative braking subway transportation. In this paper different strategies are compared to increase the utilization of regenerated braking energy of trains, such as stationary energy storage in batteries or supercapacitors, the use of inverter substations reclaimers energy as a way to return the surplus energy regenerated to the distribution network and implementation of genetic algorithm to optimize the timetable of starting and stopping trains.¹

Keywords - Energy Efficiency, Energy Storage Systems, Genetic Algorithm, Rectifier Substation, Regenerative Braking, Subway.

I. INTRODUÇÃO

No sistema metroviário de São Paulo aproximadamente 77% da energia elétrica é consumida nos sistemas de tração, ou seja, movimentação dos trens [1]. Em 2012, isso representou um consumo de 561.341 MWh, equivalente a um consumo médio de mais de 3,5 milhões de consumidores residenciais [2].

Os resultados do Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Metrô [3] mostraram que o transporte metroviário emite aproximadamente 50 vezes menos gases de efeito estufa por passageiro transportado por quilômetro do que o equivalente transportado por automóveis e 25 vezes menos que os ônibus.

Segundo a APTA (American Public Transportation Association) [4] o transporte público evita o uso de 4,2 bilhões de litros de gasolina por ano nos Estados Unidos. A APTA atribui uma redução de cerca de 223 litros de gasolina por família, por ano nos EUA, devido ao fácil acesso ao sistema de metrô nas grandes metrópoles do país.

Sistemas de metrô prestam um grande benefício para as comunidades, entretanto os sistemas metroviários necessitam de uma grande quantidade de energia para funcionar [5].

A maioria dos sistemas metroviários dos metrôs mais modernos do mundo como a linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo e a linha 14 da RATP na cidade de Paris na França é equipada com tecnologia de frenagem regenerativa. Parte da energia gerada na frenagem regenerativa dos trens é aproveitada pelos próprios sistemas auxiliares do trem como: iluminação, ar condicionado, sistema de comunicação entre outros. A parcela que não é consumida pelos sistemas auxiliares e enviada para linha de tração onde pode ser consumida por outro trem. Entretanto, dificilmente existe o sincronismo entre partida e paradas dos trens. Assim grande parte da energia gerada pela frenagem regenerativa de um trem é geralmente dissipada em banco de resistores no próprio trem ou ao longo da linha. Porém, na rede CA sempre existirá uma carga que possa consumir a energia gerada, como por exemplo, elevadores, escadas rolantes, ventilação e iluminação das estações.

Considerando a questão energética, o ponto principal não é a capacidade de o sistema transformar uma energia em outra. O que se faz necessário é que a rede esteja preparada para

¹Artigo submetido em 19/06/2015. Primeira revisão em 21/10/2015. Segunda revisão em 12/03/2016. Aceito para publicação em 12/03/2016, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

receber a energia regenerada. As tecnologias e estratégias mais propícias que possam maximizar a recuperação de energia proveniente da frenagem regenerativa dos trens são:

- Unidade estacionária de armazenamento de energia: seu método de funcionamento é baseado na absorção da energia dos veículos em frenagem, armazenando esta energia em capacitores para reaproveitamento nos veículos em aceleração;
- Sistema de regeneração por inversor para rede CA: seu método de funcionamento é o aproveitamento da energia dos veículos em frenagem, convertendo-a para tensão alternada, utilizando um inversor para seu reaproveitamento nos equipamentos ligados no sistema de distribuição de energia em média tensão.
- Algoritmos de controle: algoritmo para otimizar o diagrama horário de partidas e paradas dos trens de modo que aumente o tempo coincidente dos períodos de aceleração e de frenagem dos trens, deste modo aumentando o aproveitamento da energia proveniente das frenagens dos trens.

A partir do quadro delineado, esse estudo compara as tecnologias existentes para aumentar a eficiência energética, explorando o potencial da aplicação destas estratégias no gerenciamento de energia em sistemas metroviários.

II. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os avanços da eletrônica de potência e das tecnologias de armazenamento de energia permitiram que sistemas de armazenadores capacitivos se tornassem uma opção muito promissora para aproveitar a energia proveniente da frenagem regenerativa dos trens no transporte metroviário. Os armazenadores de energia (ESS - *Energy Storage Systems*) podem ser instalados a bordo dos trens ou em pontos específicos ao longo da linha metroviária.

A primeira opção permite que os trens armazenem, temporariamente, a sua própria energia de frenagem para reutilizá-la na aceleração subsequente. A segunda opção permite acumular energia a partir da frenagem de qualquer trem nas proximidades para reutilizá-la no sistema. A seleção das tecnologias de armazenamento de energia depende das necessidades particulares de cada caso, mas, nas aplicações em sistemas metroviários exigirá atender às seguintes características:

- Grande número de ciclos de carga e descarga;
- Alta capacidade de dissipar potência;
- Alta capacidade de armazenamento de energia;
- Peso e volume reduzidos, especialmente para sistemas a bordo dos trens.

Atualmente, as principais tecnologias que satisfazem estes requisitos são os capacitores de dupla camada elétrica EDLCs - *Electrical Double-Layer Capacitors*, conhecidos como supercapacitores, e as baterias de Li-ion e NiMH [6].

Os sistemas armazenadores de energia têm um alto potencial de seu aproveitamento em transporte metroviário. Assim, em linha com intervalos entre trens superiores a 4 minutos, o consumo de energia de tração pode ser reduzido em cerca de 15% a 35% usando sistemas armazenadores de energia, de acordo com os seguintes estudos:

- Na linha 25 do VLT (Veículo Leve sobre Trilhos) de Bruxelas, simulado com o veículo T3000 Bombardier Flexity, com um intervalo mínimo entre trens de 6 minutos, obteve-se uma economia de 19 a 21,5% de consumo de energia [7];
- Nas linhas de Metrô de Madrid com intervalo entre trens de 3,5 a 15 minutos, atingiu-se 13% de economia de energia [8];
- No VLT da Blackpool Tramway na Inglaterra, com intervalos entre trens de 12 minutos, foi obtida uma economia de 30,6% na energia consumida [9].

A. Armazenadores de Energia a Bordo do Trem

O ESS a bordo do trem ajuda a minimizar os picos de potência durante a aceleração dos trens, o que resulta em redução dos custos de energia e menos perdas resistivas na linha de distribuição [10]. O ESS pode ser projetado para ajudar a estabilizar a tensão da rede [11] ou, ainda, para fornecer certo grau de autonomia para os serviços sem catenária, por exemplo, em linhas que percorrem centros históricos [12]. Quando comparado com os sistemas estacionários, o ESS a bordo do trem apresenta uma maior eficiência devido à ausência das perdas provenientes da linha.

A Figura 1 ilustra a aplicação do ESS de bordo em um trem do sistema metroviário.

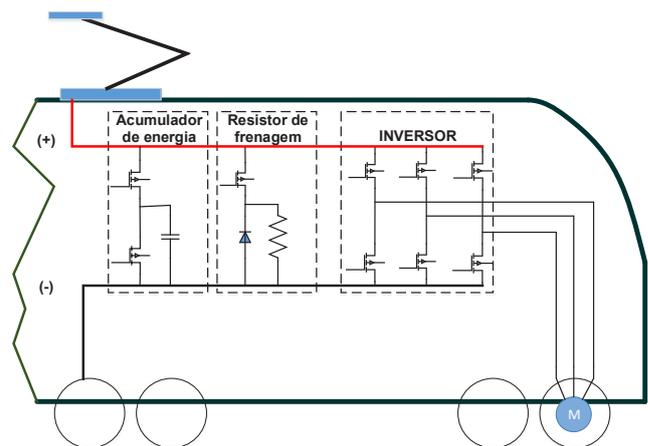


Fig. 1. Aplicação do ESS de bordo em um trem do sistema metroviário.

A gestão da energia recuperada é mais simples, devido ao fato de o controle ser independente das condições de tráfego. No entanto, os dispositivos móveis de armazenamento, geralmente, exigem grandes espaços no veículo e apresentam um aumento considerável de peso. Por estas razões, a instalação do ESS a bordo do trem é recomendado para projetos totalmente novos e não para a adaptação das frotas em uso.

Atualmente, no Brasil, não existem projetos para aplicação desta tecnologia. Os principais motivos para a ausência de projeto de implementação de ESS's de bordo são:

- Um custo maior de projeto do trem para manter a mesma quantidade de usuários transportados e de manutenção da via, devido ao acréscimo de peso no trem para instalação do ESS de bordo;

- b) Menor vida útil do ESS em linhas com as características do metrô de São Paulo, onde o sistema opera com curtos intervalos de aceleração e frenagem;
- c) O incremento de peso no trem, devido à instalação dos capacitores, aumenta o consumo de energia do trem na tração o que diminui a eficiência do sistema;
- d) Em condições de sobretensões aumenta a probabilidade de explosões dos supercapacitores, o que acarreta o aumento do risco de acidentes com usuários.

Comparando os sistemas acumuladores de energia a bordo do trem existentes, pode-se afirmar, com base em [10] que:

- a) Os acumuladores de energia desenvolvidos com capacitores apresentam uma capacidade de armazenamento de energia baixa, entre 0,8 kWh a 1 kWh, mas necessitam de tempos curtos para carga;
- b) Os acumuladores desenvolvidos com bateria apresentam uma capacidade de armazenamento de energia elevada, entre 40 kWh a 120 kWh, mas necessitam de tempos prolongados para carga.

A maioria dos sistemas de acumuladores de energia que empregam a tecnologia dos supercapacitores está sendo implementada em sistemas de VLT. Isto se deve às características dos supercapacitores de rápida carga e descarga, ou seja, elevada capacidade de armazenamento de energia em intervalos curtos de tempo e um baixo custo de implementação, em comparação com os demais sistemas. No entanto, a baixa capacidade de fornecimento de energia durante períodos maiores de tempo dificulta a utilização de supercapacitores em sistemas projetados para fornecer um grau de autonomia para movimentação dos trens. Nestes casos, as baterias de alta potência, como Li-ion ou NiMH são melhores opções, devido a sua característica de armazenar grandes quantidades de energia. Porém, para isto é necessário um período de tempo maior de carga.

B. Sistemas Estacionários de Armazenamento de Energia

O sistema estacionário de armazenamento de energia em sistemas de tração tem como características:

- a) Armazenamento da energia proveniente das frenagens dos trens que não pode ser consumida instantaneamente, para posterior reaproveitamento;
- b) Estabilização da tensão da rede, o que representa uma vantagem importante sobre os inversores para regeneração de energia [10];
- c) Limitação dos picos de energia durante acelerações dos trens;
- d) Autonomia energética para os trens, durante um período de tempo, em caso de falha de alimentação elétrica.

Em comparação com os dispositivos instalados a bordo dos trens, restrições de instalação como espaço e peso não são um grande problema em instalações na via. As manutenções dos ESS estacionários não afetam a oferta de trens. Por outro lado, o ESS estacionário envolve perdas de transmissão mais elevadas na linha, o que exige um estudo cuidadoso para determinar a posição ideal dos dispositivos de armazenamento na rede [10]. A gama de tecnologias de armazenamento de energia para sistemas estacionários é maior do que para os dispositivos a bordo do trem.

A Figura 2 ilustra a aplicação de ESS estacionário em um sistema de tração.

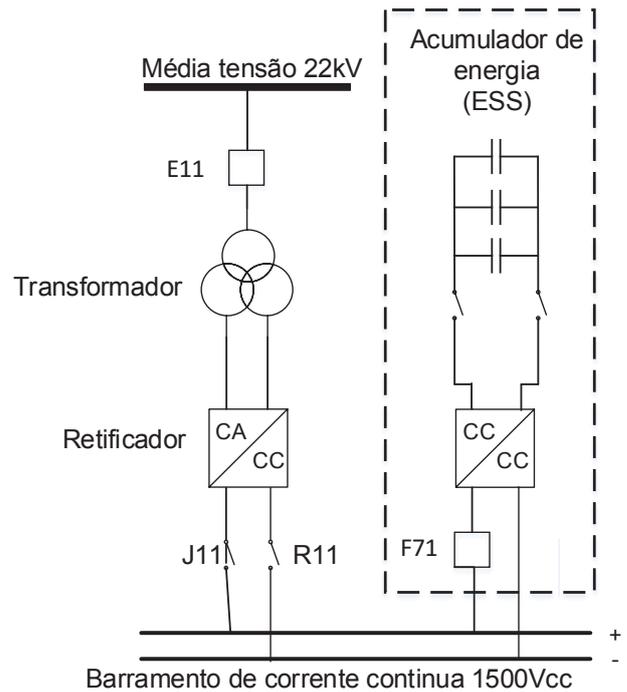


Fig. 2. Aplicação do ESS estacionários em um sistema de tração.

Comparando os sistemas acumuladores de energia estacionários existentes, pode-se afirmar, com base em [10], que:

- a) Os acumuladores de energia capacitivos apresentam uma capacidade de armazenamento de energia baixa, entre 1 kWh a 16 kWh, mas necessitam de tempos curtos para carga;
- b) Os acumuladores desenvolvidos com bateria apresentam uma capacidade de armazenamento de energia elevada, aproximadamente 400 kWh, mas necessitam de tempos prolongados para carga.

Atualmente, no Brasil, não existem projetos para aplicação desta tecnologia. O principal motivo para a ausência de tais projetos é a menor vida útil do ESS em linhas com as características do metrô de São Paulo, onde o sistema opera com curtos intervalos de aceleração e frenagem.

III. SUBESTAÇÕES INVERSORAS DE TRAÇÃO

Subestações inversoras para regeneração de energia proveniente da frenagem dos trens incluem conversores que permitem um fluxo bidirecional de energia em redes de corrente contínua. Isto implica que toda a energia regenerada que não é consumida pelos trens no sistema pode ser conduzida de volta à rede de distribuição de energia CA, para ser consumida por outros equipamentos como elevadores, escada rolantes, iluminação das estações ou também pode ser reaproveitada na rede de tração.

Subestações inversoras são concebidas, principalmente, para maximizar a utilização da energia de frenagem, retornando o excedente para a rede elétrica CA. Os projetos de subestações inversoras devem prever condições para minimizar o nível de harmônicas, a fim de garantir uma boa qualidade da energia que retorna para a rede CA.

Vários estudos têm demonstrado que esta tecnologia pode economizar entre 7 e 14% em sistemas metroviários [10]. As perdas de transformação nas subestações inversoras são menores que as perdas de transformação no ESS, apesar das perdas resistivas em linha possam ser grandes, dependendo da localização da subestação [13].

As utilizações de subestações inversoras possibilitam a recuperação de energia proveniente da frenagem em qualquer momento, devido ao fato de as linhas de corrente alternada serem, permanentemente, receptivas.

Um das principais barreiras para o uso de subestações inversoras no sistema metroviário são os seus custos elevados de investimento. Dado o seu potencial para reduzir o consumo total de energia no transporte metroviário, fabricantes de sistemas metroviários vêm investindo no desenvolvimento de subestações inversoras confiáveis nos últimos anos. Como mostrado na Tabela I, atualmente existem sistemas metroviários onde foram implementadas subestações inversoras, apesar da sua aplicação prática estar restrita, até agora, a sistemas onde o intervalo entre trens esteja acima de 4 minutos.

TABELA I
Subestações Inversoras Implementadas em Sistemas de Tração
Características

Desenvolvedor	Potência (kW)	Local de desenvolvimento
Asltom	300	Implementado na linha de trem T1 da RATP na cidade de Paris na França
Siemens	2200	Em teste no Metrô de Oslo
Ingeber	1500	Em teste no metrô de Bilbao desde 2009
Enville (ABB)	1000	Em implementação no VLT de Łódź
ABB	1000	Em implementação na linha 4 de metrô da cidade de São Paulo desde 2009 (projetada para intervalo entre trens de 90s)

Fonte: adaptado de [14]

A. Subestações Inversoras de Tração no Brasil

No sistema de transporte sobre trilho da cidade de São Paulo, na década de 80, a antiga concessionária de transporte FEPASA, hoje CPTM, instalou subestações inversoras na Linha 8 Diamante. Neste projeto foram desenvolvidos inversores tiristorizados nas subestações Barra Funda e Imperatriz Leopoldina, fabricados pela Siemens, e nas subestações de Osasco, Santa Terezinha e Santa Rita fabricados pelas Jeumont-Schneider. A concepção do sistema de inversores instalados tinha, como filosofia, devolver a energia excedente para a concessionária.

Os inversores de fabricação Siemens e Jeumont-Schneider foram uma experiência sem sucesso de conversão CC-CA dentro da FEPASA, devido à grande quantidade de defeitos que este sistema apresentou. Como a concepção de projeto era a devolução de energia à concessionária, devido às variações na tensão de entrada disponibilizada pela concessionária, ocorria, frequentemente, a atuação da proteção dos inversores tiristorizados.

Atualmente estão em fase de implantação os inversores para recuperação na energia na Linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo.

Os inversores implantados nos sistemas de transporte sobre trilho da cidade de São Paulo utilizaram tiristores na implementação da ponte inversora e se valeram do transformador do grupo retificador para devolver a energia para a rede de distribuição, conforme ilustrado pela Figura 3.

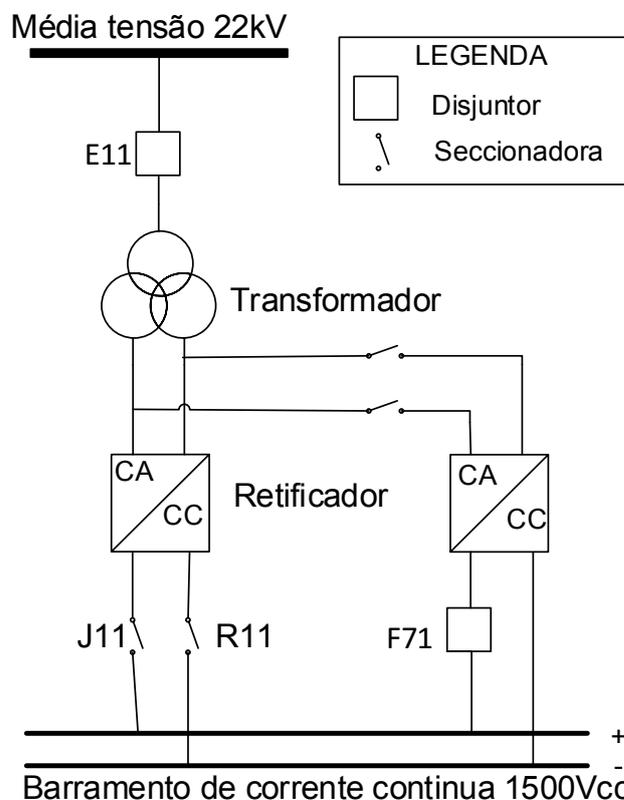


Fig. 3. Configuração da subestação inversora da linha 4 do metrô da cidade de São Paulo.

Os problemas principais para a implantação das subestações inversoras na linha 4 do metrô de São Paulo são:

- Ocorrência de falhas no controle do desligamento dos tiristores e curtos-circuitos, causados por variações nos níveis de tensão da rede elétrica e da frenagem regenerativa;
- Curto ciclo de aproveitamento da energia, gerado por intervalos pequenos entre os trens devido à elevada demanda de passageiros.

Uma solução para aplicação em um sistema de transporte sobre trilho com intervalos entre trens abaixo de 120 segundos, como é o caso do metrô da cidade de São Paulo, é o desenvolvimento de uma subestação inversora independente da subestação retificadora conforme Figura 4.

As principais características que devem conter nesta configuração de subestação inversora são:

- Ponte inversora desenvolvida com IGBT's, assim o controle não será dependente do nível de tensão. Também com a utilização de IGBT's é possível chevar a ponte em intervalos menores [15];
- O acoplamento da subestação inversora com o sistema elétrico de distribuição por um transformador independente. Esta configuração tem como vantagens a simplificação da instalação da subestação inversora e

o isolamento de falhas que possam ocorrer na subestação inversora [16].

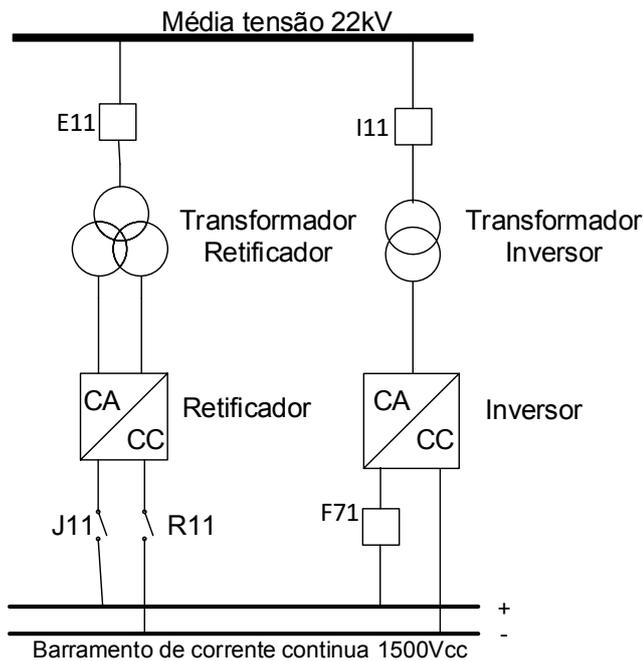


Fig. 4. Configuração da subestação inversora independente da subestação retificadora.

IV. ALGORITMO PARA OTIMIZAÇÃO DO DIAGRAMA HORÁRIO

Sincronizar a aceleração e frenagem de trens diferentes, por meio de algoritmos de controle para otimização do diagrama horário dos trens do metrô é uma solução com baixo custo de implantação, mas eficaz, para maximizar o uso de frenagem regenerativa nos sistemas metroviários urbanos. Esta solução permite economizar energia de tração, mas também ajuda a reduzir os picos de energia causados por aceleração simultânea de vários trens no sistema.

Vários estudos têm proposto algoritmos de controle para a otimização do diagrama horário para aumentar a recuperação da energia proveniente da frenagem dos trens no sistema metroviário urbano. Os principais trabalhos são:

- Nasri et al. [17] desenvolveu um método de otimização que, com base em um algoritmo genético, determina os valores ótimos do tempo de reserva que maximizam o uso de frenagem regenerativa;
- Peña-Alcaraz et al. [18] propuseram um novo diagrama horário para a linha 3 do metrô de Madrid, resolvendo um problema de otimização por programação linear. Após uma semana de aplicação do sistema, obteve-se uma economia de energia média de 3%, embora os autores afirmam que este número pode ser de 7% se restrições operacionais fossem diminuídas;
- O estudo de Boizumeau, Leguay e Navarro [19] demonstrou que no sistema de metrô Rennes uma economia anual de 12% foi obtida por meio da otimização do diagrama horário.

Para obtenção de melhores índices de economia de energia por meio da otimização do diagrama horário é necessário uma implementação em tempo real de um sistema de controle que determine as melhores estratégias de condução do trem.

Um sistema de controle em tempo real deve recalculá-lo automaticamente a programação em caso de imprevistos, como atrasos e incidentes menores. Os custos relativamente baixos de investimento associado a esta medida, especialmente se comparado com a instalação de acumuladores de energia ou de subestações inversoras, o torna uma opção fundamental para o aumento dos benefícios da frenagem regenerativa no transporte metroviário.

A. Desenvolvimento do Algoritmo de Controle – ACTREM

Em [16] foi desenvolvido o Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM para melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária.

Para elaboração do ACTREM foram utilizados os conceitos de algoritmos genéticos, devido a sua característica de combinar procedimentos de busca direcionada e aleatória, de modo a obter o ponto ótimo de uma determinada função, mesmo quando esta apresenta particularidades não lineares, múltiplos picos e descontinuidades.

Algoritmos genéticos são algoritmos iterativos, em que a cada iteração a população é modificada, usando as melhores características dos elementos da geração anterior e submetendo-as aos três tipos básicos de operadores, para produzir melhores resultados [20].

Para atingir estes objetivos inicialmente gera-se a população inicial, ou seja, um conjunto inicial de strings denominados em AG (Algoritmos genéticos) de cromossomos, que é gerado de modo aleatório. Em seguida, as populações evoluem em gerações, basicamente por meio de três operadores [21]:

- Seleção;
- Cruzamento;
- Mutação.

A Tabela II contém a definição dos termos da AG adotados para o desenvolvimento do algoritmo de controle ACTREM.

TABELA II
Nomenclatura do AG

Terminologia do AG	Modelo
Gene	Tempo de parada na estação
Cromossomo	Conjunto de todos os tempos de parada nas estações da linha em estudo
Indivíduo	Uma solução completa, tempo de parada, resultado da função de avaliação e o operador genético a ser aplicado.
Geração	Conjunto de todos os indivíduos atualmente ativos

Fonte: adaptado de [14]

O desenvolvimento do ACTREM foi dividido em 4 macro etapas:

- Macro etapa entrada de dados;
- Macro etapa geração da primeira população;
- Macro etapa avaliação da população;
- Macro etapa operadores genéticos.

Como a utilização de algoritmos de controle de tráfego não é um método empregado atualmente pelas empresas metroviárias, para comprovação da eficiência da aplicação do ACTREM optou-se pelo desenvolvimento de um simulador do sistema de tração metroviário. Para o desenvolvimento do simulador foram realizadas as seguintes etapas:

- Modelagem dinâmica do movimento de um trem;
- Modelagem do tráfego de trens;
- Modelagem do sistema elétrico;
- Desenvolvimento do simulador empregado no desenvolvimento em programação C++.

Para validação do simulador empregado na análise do ACTREM, foram realizadas medições nas subestações e trens da linha 4 – Amarela de São Paulo para levantamento dos dados de consumo, desempenho e operação do sistema em estudo.

V. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

O resultado da simulação da aplicação do algoritmo ACTREM para otimização do diagrama horário, no horário de vale no metrô da linha 4 da cidade de São Paulo é mostrado na Figura 5.

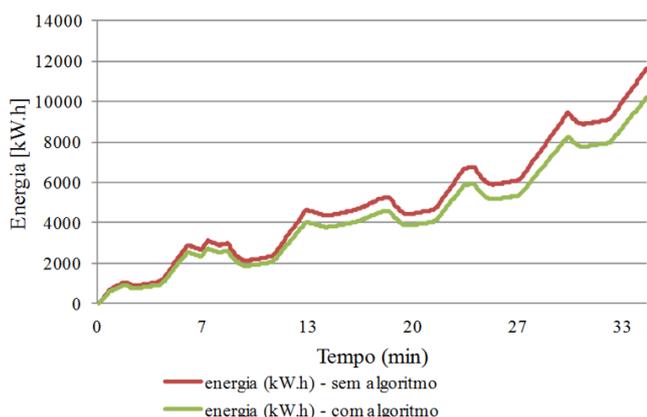


Fig. 5. Gráfico comparativo do consumo de energia.

Os resultados iniciais da simulação do uso do algoritmo ACTREM para otimizar o diagrama horário da linha 4 de metrô da cidade de São Paulo demonstra que no horário de pico a economia de energia pode chegar a 3%. Este valor é baixo devido principalmente às restrições operacionais impostas neste período, porém os resultados obtidos na simulação no horário de vale indicam que a economia de energia pode chegar a 12% [16].

Com a utilização do algoritmo de controle ACTREM obteve-se uma redução de 9,5% da energia consumida. Sem o algoritmo apenas 34,2% da energia proveniente da frenagem era aproveitada, com a utilização do algoritmo de controle 53,63% da energia de frenagem é aproveitada [16].

A Tabela III mostra o resultado da simulação da utilização do algoritmo de controle ACTREM. Os resultados obtidos foram comparados com os dados obtidos pela simulação da tração.

TABELA III
Energias Geradas e Consumidas na Linha 4 – Amarela

Subestação retificadora	Energia consumida	Energia de frenagem disponível		Energia de frenagem reaproveitada – sem algoritmo		Energia de frenagem reaproveitada – com algoritmo	
	[kWh]	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
Pátio	5526,31	2616	100	922	35,28	1498	57,29
Caxingui	5967,14	2824	100	996	35,29	1329	47,07
Pinheiros	6643,73	3145	100	1080	34,34	1828	58,14
Fradique Coutinho	6897,05	3265	100	1121	34,34	1479	45,31
Paulista	7089,85	3356	100	1120	33,37	2249	67,02
República	5611,09	2656	100	886	33,36	1493	56,24
Luz	4746,74	2247	100	751	33,46	998	44,45

Considerando a linha com 11 estações e 19 trens circulando no horário de pico e 12 trens no horário de vale, o consumo de energia elétrica simulado da linha 4 – Amarela no período de um mês é:

- 15.065 MWh/mês sem a utilização o algoritmo de controle ACTREM;
- 13.373 MWh/mês com a utilização do algoritmo de controle ACTREM, mediante as condições expostas anteriormente.

Pode-se afirmar que com a utilização do algoritmo de controle ACTREM é possível obter uma redução do consumo de energia elétrica de 1.692 MWh/mês.

Outro benefício gerado pela utilização do algoritmo de controle ACTREM é a redução da emissão de CO_2 . Considerando que a matriz de energia elétrica brasileira tem um fator de emissão $125 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ [22] é possível garantir que na linha 4 – Amarela:

- Sem a utilização do algoritmo de controle ACTREM gera mensalmente 1883t de CO_2 .
- Com a utilização do algoritmo de controle ACTREM gera mensalmente 1671t de CO_2 .

Pode-se afirmar que com a utilização do ACTREM gera-se uma redução emissão de CO_2 mensal de 212t.

A simulação da utilização de apenas subestações de tração inversora na linha 4 amarela, sem a utilização do algoritmo de controle ACTREM, demonstra que pode-se economizar entre 4,71% a 6,65% da energia consumida.

A combinação da utilização do algoritmo de controle ACTREM e de subestações de tração inversoras, mostra por meio de simulação que pode-se aproveitar entre 64,69% a 69,52% da energia de frenagem, isto representa uma economia de 2,61% a 3,75% da energia consumida em relação ao cenário da utilização somente do algoritmo de controle ACTREM.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo fornece uma visão geral das tecnologias e estratégias atualmente disponíveis para uma gestão ótima da energia proveniente da frenagem dos trens no transporte metroviário. Isso incluiu uma discussão sobre a utilização de acumuladores de energia a bordo do trem ou instalados na via, utilização de subestações inversoras e a otimização do diagrama horário.

O ESS é uma solução válida para regular a energia regenerada que não pode ser consumida instantaneamente dentro do sistema. A utilização do ESS, além da economia de

energia de tração, também contribui para suprimir os picos de energia e estabilizar a tensão da rede. Atualmente os EDLCs são a tecnologia mais adequada para estes sistemas, embora a combinação dos EDLCs e baterias de alta potência oferecem características muito interessantes para aplicações de bordo que requerem um alto grau de autonomia.

A utilização de subestações inversoras é uma alternativa para reduzir o consumo de energia dos sistemas metroviários urbanos, enviando o excesso de energia regenerada para a rede CA.

A utilização de algoritmos de controle para otimização do diagrama horário de modo que seja aproveitada mais energia da frenagem é viável. Porém, somente o uso de algoritmos não é suficiente para atingir o máximo do uso da energia da frenagem, fato que é comprovado pelo resultado das simulações mostrado na Tabela III, onde somente foi possível utilizar 53,63% da energia de frenagem.

A simulação da combinação de da utilização do algoritmo de controle ACTREM e de subestações de tração inversoras demonstrou que 64,69% a 69,52% da energia de frenagem é utilizada.

Este trabalho conclui que a aplicação de somente uma tecnologia para reaproveitamento da energia de frenagem, não extrai a máxima regeneração de energia do sistema de frenagem para a rede, deste modo a correta combinação entre estrutura da rede elétrica de regeneração e o uso de um algoritmo de controle horário de partidas e frenagens dos trens maximizam a eficiência da frenagem do sistema metroviário.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Antônio Marcio Barros Silva e Mauricio Soares de Moraes pela colaboração neste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] C. L. Pires, S. I. Nabeta, J. R. Cardoso, "Simulação de composição ferroviária acionada por motores de indução e inversores de tensão," *Revista Controle & Automação*, vol. 16, nº1, pp. 1-12, Jan.,Fev. e Março 2005.
- [2] EPE, "Resenha mensal do mercado de energia elétrica," Ano VI, número 65, fevereiro 2013.
- [3] METRÔ, "Relatório de sustentabilidade," 2011. [Online]. Disponível em: <http://www.metro.sp.gov.br/metro/sustentabilidade/pdf/relatorio-sustentabilidade-2014.pdf>. [Acesso em 10 novembro 2015].
- [4] APTA, "Public Transportation Saves Energy and Helps Our Environment," 2009. [Online]. Disponível em: http://www.apta.com/gap/policyresearch/Documents/facts_environment_09.pdf. [Acesso em 10 novembro 2015].
- [5] R. A. H. Oliveira, L. S. Mattos, A. C. Ferreira, R. M. Stephan, "Regenerative braking of a linear induction motor used for the traction of a maglev vehicle," *Eletrônica de Potencia*, vol. 19, nº03, pp. 241-251, agosto 2014.
- [6] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, "Energy storage systems for transport and grid applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, nº04, pp. 3881-3895, setembro 2010.
- [7] R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo, "Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 244, nº03, p. 207-225, maio 2010.
- [8] M. Domínguez, A. P. Cucala, A. Fernández, R. R. Pecharrom, J. Blanquer, "Energy efficiency on train control design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices," in *9th World Congress on Railway Research - WCRR*, pp.1-12, 2011.
- [9] M. Chymera, A. Renfrew, M. Barnes, "Analyzing the potential of energy storage on electrified transit systems," in *8th World Congress of Railway Research - WCRR 2008*, Seoul, South Korea, pp. 1-10, 2008.
- [10] A. Gonzalez-Gil, R. Palacin, P. Batty, J. P. Powell, "Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy," *Transport Research Arena (TRA) 2014 Proceedings*, pp. 1-9, 2014.
- [11] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, P. Tricoli, "Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 24, nº1, pp. 36-49, outubro 2012.
- [12] A. L. Allègre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, "Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, nº12, pp. 4001-4012, maio 2010.
- [13] B. Mellitt, Z. S. Mouneimne, C. J. Goodman, "Simulation study of DC transit systems with inverting substations," *IEE Proceedings B, Electric Power Applications*, vol. 131, nº03, pp. 38-50, abril 1984.
- [14] R. Burian, *Algoritmos genéticos na alocação de dispositivos de proteção de distribuição de energia elétrica*, Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [15] P. Antoniewicz, D. Swierczynski, W. Kolomyjski, "Technology Comparison of Energy Recuperation Systems for DC Rail Transportation," in *IEEE 5th International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, pp. 372 - 376, 2015.
- [16] C. A. Sousa, *Desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária - ACTREM: Melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária*, Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

- [17] A. Nasri, M. Fekri Moghadam, H. Mokhtari, “Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems”, in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion – SPEEDAM 2010*, pp 1218 - 1221, 2010.
- [18] M. Peña-Alcaraz, A. Fernandez, A. P. Cucala, A. Ramos, R. R. Pecharromás “Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 226, nº04 pp. 397-408, 2011.
- [19] J. R. Boizumeau, P. Leguay, E. Navarro, “Braking energy recovery at the Rennes metro,” in *Workshop on Braking Energy Recovery Systems – Ticket to Kyoto Project*, pp 01-06, 2011.
- [20] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1º Edição, Boston, 1989.
- [21] N. Kagan, H. P. Schmidt, C. C. Barioni, H. Kagan, *Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência*, Blucher, 1º Edição, São Paulo, 2009.
- [22] M. M. D. Miranda, *Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da Avaliação do Ciclo de Vida*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Alberto de Sousa, nascido em São Paulo – SP - Brasil em 1976, graduou – se Engenheiro Eletricista pela Universidade de Mogi das Cruzes – UMC em 2001. Em 2004, formou-se em especialista em Engenharia de Segurança do trabalho de Universidade Paulista. Em 2007 formou-se em especialista em Automação Industrial pelo PECE_USP. É professor da Universidade Nove de Julho - UNINOVE. Trabalha como engenheiro em uma empresa de concessionária da linha 4 do Metrô de São Paulo. Sua área de interesse inclui engenharia de automação e sistema elétrico de potência e eletrônico em sistema de subestações retificadoras.

Sergio Luiz Pereira, nascido em São Paulo – SP - Brasil em 1955, graduou-se Engenheiro Eletricista pela Faculdade de Engenharia São Paulo em 1982. Em 1988, obteve o título de M.Sc. em Systems Robotics and Application pela Coventry University (Inglaterra). Concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica em 1995 na Escola Politécnica da USP - EPUSP. É professor da EPUSP e orientador de alunos de graduação, de mestrado e de doutorado. É também professor da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo e professor da BSP – Business School São Paulo. É consultor de automação industrial, trabalhou em diversos projetos e também como coordenador de curso de engenharia. Sua área de interesse e de pesquisa inclui engenharia de automação, robótica, inteligência artificial, gestão das operações, manufatura, qualidade e desenvolvimento sustentável.