

ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE SUBESTAÇÕES INVERSORAS EM SISTEMAS DE TRACÇÃO METROVIÁRIOS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Sergio Luiz Pereira¹, Ruan Streitenberger Guedes¹, Carlos Alberto de Sousa¹

¹Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), São Paulo – SP, Brasil

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

Resumo – Este artigo apresenta o estudo sobre a viabilidade técnico-econômica da implantação de uma subestação inversora em paralelo com a subestação retificadora unidirecional existente no sistema de tração. Para comprovar a viabilidade do projeto, neste trabalho é feita uma breve introdução à aplicação da tecnologia de subestações inversoras conectadas à rede de energia do metrô de São Paulo para permitir a recuperação de energia do sistema de tração corrente contínua (CC), a revisão de três concepções possíveis de serem aplicadas ao projeto e a modelagem com a simulação da redução de energia com aplicação da subestação inversora. Os objetivos desta proposta são aumentar a eficiência energética em sistemas metroviários alimentados em CC, suprimir os problemas ocorridos em outras implementações de subestações inversoras no Brasil e regular o nível de tensão no sistema de distribuição de energia para os trens.

Palavras-chave – Eficiência Energética, Frenagem Regenerativa, Simulação Computacional, Subestação Inversora, Tração Elétrica.

FEASIBILITY ANALYSIS FOR THE IMPLEMENTATION OF INVERTER SUBSTATIONS IN SUBWAY TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY

Abstract – This article presents the technical-economic feasibility study of the implementation of an inverter substation in parallel with a unidirectional rectifier substation existing in the traction system. In order to prove the feasibility of the project in this work, a brief introduction to the application of inverter substations technology connected to the energy network of the São Paulo subway is made to allow energy recovery from the direct current (DC) traction system, a review of three possible conceptions of be applied to the design and modeling with the simulation of energy reduction with the application of the inverter substation. The objectives of this proposal are to increase energy efficiency in subway systems powered by direct current, to suppress the problems that occurred in other implementations of inverter substations in Brazil and to regulate the voltage level in the energy distribution system for the trains.

Manuscript received 01/04/2023; first revision 06/02/2023; accepted for publication 06/02/2023, by recommendation of Editor Telles Brunelli Lazzarin. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2023.2.0002>.

Keywords – Computer Simulation, Electric Traction, Energy Efficiency, Regenerative Braking, Reversible Substation.

I. INTRODUÇÃO

No sistema metroviário de São Paulo, aproximadamente, 77% da energia elétrica utilizada é consumida nas subestações retificadoras, ou seja, destina-se à movimentação dos trens [1]. Em 2018, isso representou um consumo de 551 GWh [2]. Uma forma de reduzir esse consumo é o reaproveitamento da energia proveniente da frenagem do trem.

De acordo com Khodaparastan geralmente, as subestações retificadoras nos sistemas metroviários trabalham com um fluxo de energia unidirecional, ou seja, a energia flui da rede interna de distribuição de energia de média tensão em corrente alternada (AC) para a carga, sem a possibilidade de reaproveitamento da energia proveniente da frenagem regenerativa do trem [3].

Para sistemas metroviários com intervalos de trens acima de 4 minutos, já foi proposto por Zhongbei em 2018 [4], Ortega em 2011 [5] e Peter em 1995, a aplicação de inversores regenerativos para o aumento do aproveitamento do excedente de energia da frenagem regenerativa dos trens e, com isso, a redução do consumo de energia de uma linha metroviária.

No sistema de transporte sobre trilhos do Brasil já houve projetos para implementação de subestações inversoras de tração na cidade de São Paulo na década de 80. A antiga concessionária de transporte FEPASA, hoje CPTM, instalou subestações inversoras na linha 8 – Diamante. Nesse projeto foram implantadas subestações inversoras tiristorizadas nas subestações Barra Funda e Imperatriz Leopoldina, fabricadas pela Siemens, e nas subestações de Osasco, Santa Terezinha e Santa Rita, fabricadas 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 esse sistema apresentou. Como a concepção de projeto era a devolução de energia à concessionária, devido às variações na tensão de entrada disponibilizada por ela mesma, ocorria, frequentemente, a atuação da proteção dos inversores tiristorizados.

No metrô de São Paulo na década de 70 foi prevista, no projeto da linha 1 – azul, a implementação de subestações inversoras que, devido às dificuldades tecnológicas da época, não foram efetivadas. Atualmente, estão em fase de

implantação os inversores tiristorizados para recuperação da energia na linha 4 – amarela do metrô da cidade de São Paulo.

Os problemas principais para a implantação das subestações inversoras nos sistemas metroviários brasileiros foram:

- Ocorrência de curtos-circuitos devido a falhas no controle do desligamento dos tiristores, ocasionados por variações nos níveis de tensão da rede elétrica e da frenagem regenerativa;
- Problema no controle do chaveamento dos tiristores, devido ao curto período entre os intervalos de aproveitamento da energia, gerado por pequenos espaços de tempo entre os trens, em função da elevada demanda de passageiros.

Devido às características das subestações retificadoras instaladas no metrô da cidade de São Paulo, este artigo propõe estudar, por meio de simulações do sistema de tração elétrica da linha 1 do metrô da cidade de São Paulo, a aplicação e viabilidade de se utilizar inversores regenerativos para reaproveitamento do excedente de energia regenerada pelos trens durante a frenagem elétrica, energia esta que, normalmente, é dissipada nas resistências de frenagem dos próprios trens, em forma de calor.

Este trabalho tem, como objetivo principal, o estudo de viabilidade da implantação de uma subestação inversora em paralelo com a subestação retificadora unidirecional existente no sistema de tração. A implantação da proposta descrita neste trabalho tem, como finalidade, aumentar a eficiência energética em sistemas metroviários alimentados em CC, suprimir os problemas ocorridos em outras implementações de subestações inversoras no Brasil e regular o nível de tensão no sistema de distribuição de energia para os trens [6].

Para este estudo foram utilizados, como base, os dados da linha 1 – azul do metrô da cidade de São Paulo, onde foram simulados vários cenários operacionais, de acordo com as características operantes da linha [7]. Com os resultados obtidos por meio de simulações computacionais do sistema de tração elétrica, foram estimados o potencial energético economizado e a viabilidade técnico-econômica da aplicação da subestação inversora em uma das subestações que compõem o sistema de alimentação elétrica da linha estudada [8].

II. SUBESTAÇÕES INVERSORAS APLICADAS AO SISTEMA METROVIÁRIO

Conforme o estudo de Gray [9] existem vários arranjos de subestações inversoras diferentes que foram considerados aplicáveis a sistemas metroviários, cada um com suas vantagens e desvantagens.

- Bidirecional: subestação retificadora e inversora autônoma única, a implementação desta configuração é indicada para projetos novos de subestações retificadoras; atualmente, no mundo, o único projeto de subestação inversora bidirecional para sistema de tração metroviário é o projeto HESOP (*Harmonic and Energy Saving Optimizer*) da Alstom [10], [11];

- Unidirecional complementar: subestação inversora complementar à subestação retificadora não controlada existente, esta configuração é aplicada em circunstâncias em que a subestação retificadora é composta por um único grupo retificador; nesta condição, o transformador do grupo retificador é utilizado para conectar o grupo inversor à rede de distribuição;
- Unidirecional em paralelo: subestação inversora ligada em paralelo com a subestação retificadora não controlada existente, esta configuração é aplicada em circunstâncias em que a subestação retificadora é composta por um conjunto de grupos retificadores em paralelo.

Para aplicação em um sistema de transporte sobre trilho, com intervalos entre trens abaixo de 120 segundos e com subestações retificadoras existentes com três grupos retificadores em paralelo – como é o caso da linha 1 – azul do metrô da cidade de São Paulo – a concepção adequada é a implementação de uma subestação inversora com IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), independente da subestação retificadora.

As principais características que devem apresentar novos projetos 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 chavear a ponte em intervalos menores [12];
- 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 [13].

A utilização de inversores para regeneração da energia de frenagem pode gerar harmônicos na rede de distribuição; para atenuação da distorção harmônica presente no ponto de conexão comum entre o inversor e a rede, bem como para atenuação das componentes harmônicas de alta frequência geradas pela ação de chaveamento do inversor, filtros de saída são partes imprescindíveis nesses sistemas [14].

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.

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 tais sistemas vêm investindo no desenvolvimento de subestações inversoras confiáveis nos últimos anos.

A. Configuração da subestação inversora

A maioria das subestações retificadoras nos metrôs brasileiros utiliza diodos. Nessas subestações, a tensão de saída depende da resistência equivalente da subestação, que é composta pela queda de tensão nos semicondutores, resistência dos cabos e resistência devido aos efeitos de

TABELA I
Subestações Inversoras Implementadas em Sistemas de Tração no Mundo

Características			
Fabricante (modelo)	Tipo	Potência (kW)	Local
Alstom (HESOP)	bidirecional	900	linha de trem T1 da RATP mm Paris
Alstom (HESOP)	bidirecional	1000	Metrô de Londres
Siemens (Sitras-TCI)	unidirecional complementar	1500	Metrô de Oslo
Siemens (Sitras-TCI)	unidirecional complementar	2200	Ferrovia na montanha Zugspitze na Baviera
Ingeber (INGETEAM)	unidirecional complementar	1500	Metrô de Bilbao
ABB (Enviline ERS)	unidirecional complementar	1000	VLT da Polônia

comutação; assim, a energia pode ser transmitida no sentido da rede de média tensão CA para a rede CC [15].

Para possibilitar a reutilização do excedente de energia da regeneração dos trens proposta nesse artigo, foi adotada, para as simulações computacionais, uma topologia utilizando uma subestação inversora ligada em paralelo com a subestação retificadora, conforme ilustrado na Figura 1.

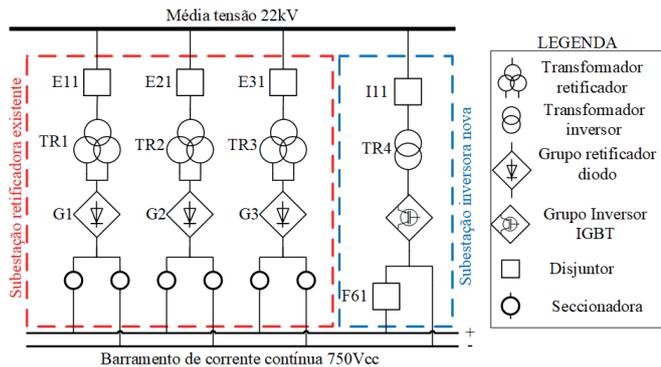


Fig. 1. Topologia proposta da subestação inversora.

B. Operação das subestações inversoras

Partindo da premissa de que os três grupos retificadores a diodo não serão alterados, a topologia de ligação do inversor com transistores IGBT acionados por um controlador PWM (*Pulse Width Modulation*) em paralelo é a mais adequada.

O inversor PWM proposto fornece um caminho reverso para a energia regenerada pelos trens e tem a vantagem de ser capaz de operar sob condições de fator de potência unitário com um controle adequado [13]. No entanto, também deve ser mencionada a desvantagem de maiores perdas de chaveamento, tamanho e custos do conversor, quando comparado aos inversores com tiristores [12].

A subestação retificadora com o inversor em paralelo pode operar de três modos distintos:

- Modo retificador: a tensão da linha CC é inferior à tensão sem carga, devido à carga do trem. O retificador de diodo de 12 pulsos opera;
- Modo de transição entre retificador-inversor: a corrente circulante flui entre o retificador e o inversor em operação paralela. Nesse modo, o sistema apresenta estabilidade e

respostas rápidas ao mudar do modo de inversão para o modo de retificação;

- Modo inversor: como a tensão da linha CC é maior do que a tensão de operação do inversor, o inversor começa a operar.

As faixas de tensão típicas de operação em cada um dos modos citados são ilustradas na Figura 2.

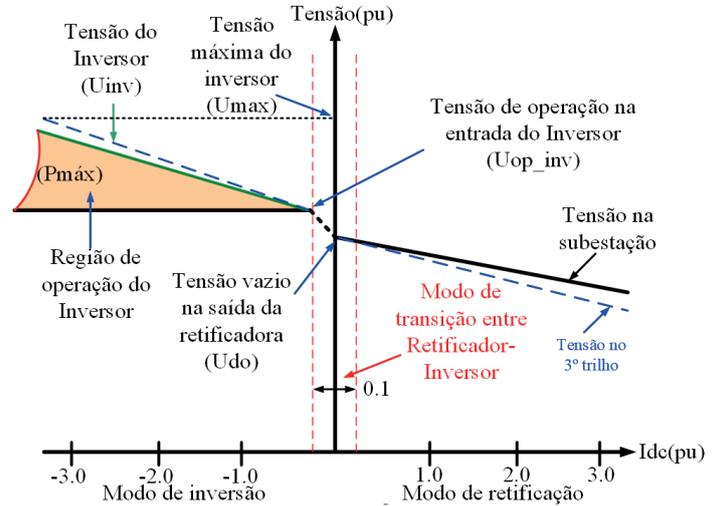


Fig. 2. Topologia proposta da subestação inversora.

A modelagem da subestação inversora é obtida por meio de uma resistência associada em série com uma fonte de tensão ideal [16].

A região de transição entre o modo de retificação e o modo de inversão é necessária para evitar corrente circulando entre o retificador e o inversor; dessa forma, a tensão de operação do inversor deve ser maior que a tensão em vazio da subestação retificadora [17]. A equação da tensão de regulação da subestação inversora pode ser expressa por:

$$U_{inv} = U_{op_inv} - I_{inv} \cdot R_{inv}. \quad (1)$$

Conforme Mellitt [17], a resistência interna do inversor R_{inv} causa uma interferência na inclinação de sua curva de operação, conforme ilustra a Figura 2. A resistência R_{inv} é determinada pelos parâmetros de operação do inversor, dada por:

$$R_{inv} = \frac{U_{max}(U_{max} - U_{op_inv})}{P_{max}}. \quad (2)$$

III. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE TRAÇÃO METROVIÁRIO.

Para verificar o potencial da subestação inversora em absorver o excedente de energia regenerativa proveniente da frenagem dos trens, esse estudo abordou o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação elétrica do sistema metroviário. Essa ferramenta permite modelar e calcular o desempenho dos trens operando no sistema metroviário, simular o tráfego de trens e efetuar os cálculos elétricos obtidos por meio da interação entre os trens e destes com o sistema elétrico da linha modelada, composto pelas subestações, alimentadores, cabos, terceiro trilho, trilho de rolamento, etc.

Para isso, foram desenvolvidos algoritmos utilizando o programa Matlab [18], onde foi possível calcular a energia consumida pelos trens por meio das subestações retificadoras, a troca de energia entre os trens em aceleração e frenagem e o potencial de energia a ser recuperado com a aplicação da subestação inversora.

O circuito equivalente da rede de tração ilustrado na Figura 3 representa, de forma genérica, uma linha metroviária composta por duas vias, uma de ida e uma de volta, com quatro trens sendo alimentados por três subestações retificadoras, onde seus componentes foram equacionados em termos de fontes de correntes e condutâncias.

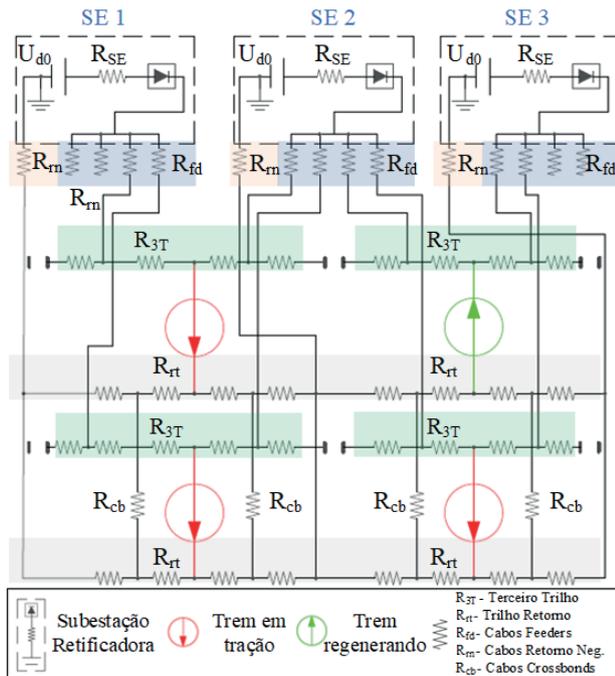


Fig. 3. Modelo do circuito elétrico de tração.

Segundo Pires [19], a análise nodal consiste em se determinar as tensões em todos os nós referidas ao nó de referência. Aplica-se então a lei das correntes de Kirchhoff para cada nó do sistema, obtendo-se as equações com tensões incógnitas.

Com os dados do desempenho dos trens obtidos por meio da simulação de marcha e da simulação de tráfego, a cada instante de tempo do período simulado, o circuito equivalente é equacionado em forma matricial, que gera uma matriz esparsa, e as tensões e correntes de cada nó poderão ser obtidas por meio de cálculos iterativos [20]. Escrito de forma geral temos:

$$[U] = [G]^{-1} \cdot [I]. \quad (3)$$

Onde I representa o vetor das correntes nodais, G , a matriz quadrada e simétrica das condutâncias nodais e U representa o vetor das tensões nodais. O fluxo de potência consiste em se determinar as potências das barras das subestações, que podem ser consideradas como “slack bus” tendo, assim, sua tensão conhecida e as tensões nodais dos trens, que podem ser considerados como “load bus”, onde as potências são conhecidas [20].

De acordo com Goodman e Siu [21], o método de Cholesky é a melhor solução para resolução de redes alimentadas em CC. Neste estudo foi desenvolvido um algoritmo utilizando o método Cholesky para solucionar as equações propostas no modelamento da aplicação da subestação inversora. A título de exemplificar esse algoritmo utilizado para solução de 3, ele é detalhado a seguir:

A matriz G de coeficientes é decomposta da seguinte forma [22]:

$$G = L \cdot L^T, \quad (4)$$

onde L é calculada pelo algoritmo:

$$\begin{cases} L_{jj} = \sqrt{G_{jj} - \sum_{k=1}^{j-1} L_{jk}^2} & j = 2, 3, \dots, n \\ L_{ij} = \left(G_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} L_{ik} L_{jk} \right) / L_{jj} & i = j+1, j+2, \dots, n, \quad j = 2, 3, \dots, n-1 \end{cases} \quad (5)$$

A solução final do sistema é dada por meio de uma combinação entre a substituição direta e substituição reversa [19]:

$$\begin{cases} U_i = \left(I_i - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij} U_j \right) / L_{ii} & \text{para } 1 \leq i \leq n \\ U_i = \left(I_i - \sum_{j=i+1}^n L_{ji} U_j \right) / L_{ii} & \text{para } n \geq i \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

Conforme Tian [22] o resultado procurado do valor de tensão para um trem depende do estado dos outros trens na rede, o método iterativo vetor-corrente pode ser solucionado primeiramente iniciando os valores de todos os trens com a tensão em vazio das subestações.

$$U_{trem_n}^{(0)} = U_{d0}. \quad (7)$$

A potência elétrica conforme 8 dos “n” trens que já foram distribuídos na via por meio da simulação de tráfego, é utilizada para calcular o vetor de correntes nodais, de acordo com os algoritmos citados anteriormente, obtendo-se, assim, as novas tensões nodais da solução do sistema.

$$\begin{cases} I_{trem_n}^{(k+1)} = \frac{P_{trem_n}}{U_{trem_n}^{(k)}} \\ [U^{(k+1)}] = [G]^{-1} [I^{(k+1)}] \end{cases} \quad (8)$$

A cada solução encontrada por 8, uma nova potência é calculada para os “n” trens por:

$$P_{trem_n}^{(k+1)} = U_{trem_n}^{(k+1)} \cdot I_{trem_n}^{(k+1)}. \quad (9)$$

Conforme Tian [22] nos algoritmos de resolução existem dois casos que podem gerar problemas de convergência, não sendo possível obter uma solução.

- O primeiro deles é quando a energia gerada pelos trens em regime de frenagem regenerativa não é consumida na rede por outros trens, causando um aumento da tensão nos nós das subestações e uma diminuição das

tensões nos trens na primeira iteração; ou seja, quando a linha não está receptiva como descrita anteriormente, o algoritmo pode apresentar erro de convergência [22];

- O segundo caso acontece quando a capacidade das subestações não consegue suprir os trens em tração. Em muitas situações, os trens em regeneração elevam a tensão de algumas subestações acima de sua tensão em vazio, fazendo com que elas não conduzam e, com isso, as outras subestações não conseguem suprir os trens em tração.

Para as simulações realizadas, o primeiro caso é identificado pelo algoritmo que considera um valor de tensão predeterminado para todos os trens e as subestações desligadas e, desse modo, as próximas iterações serão calculadas e ajustadas. Para o segundo caso, com subestações do tipo inversora, o problema descrito não irá ocorrer nas regiões onde há essas subestações. Nessa configuração, a receptividade da linha será bem alta e essas situações de excesso de regeneração dos trens significam um maior reaproveitamento do excedente de energia.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

A. Estudo de caso 1 – simulações situação atual da linha 1 – azul

Os cenários utilizados para as simulações foram baseados na quantidade e intervalo entre trens praticados numa operação comercial da linha 1 – azul, com referência aos dados do mês de janeiro de 2020.

O carregamento de passageiros, adotado para cada cenário, foi baseado em médias de medições reais dos trens para possibilitar uma simulação mais realista.

A Tabela II apresenta o resumo de todos os cenários considerados para avaliação do consumo de energia para a linha, ou seja, com todas as subestações como retificadoras.

TABELA II

Cenários Operacionais da Simulação da Tração dos Trens

Cenário	Período	Carregamento passageiros	Intervalo de trens	Quant. trens
1	Dia Útil – Pico	80%	107 s	41 s
2	Dia Útil – Vale	30%	122 s	35 s
3	Sábado – Dia	30%	148 s	29 s
4	Sábado – Noite	20%	285 s	15 s
5	Domingo – Dia	30%	215 s	20 s
6	Domingo – Noite	20%	267 s	16 s

B. Resultados obtidos – situação atual da linha 1 – azul

Na Tabela III é apresentado o fluxo de energia no sistema de tração nos dois cenários que apresentam os extremos para regeneração.

A avaliação dos dados obtidos permite observar algumas considerações importantes para se entender a complexidade do fluxo de energia no sistema de tração:

- O consumo de energia dos trens no cenário 1 é consideravelmente maior que nos outros cenários, devido ao carregamento adotado, sendo facilmente identificada essa diferença pelo maior consumo específico dos trens;

- Neste caso, também é possível observar uma maior energia disponível no freio elétrico e energia regenerada;
- Nos cenários com um maior número de trens e menor intervalo entre eles, a eficiência da regeneração é elevada, devido ao alto reaproveitamento da energia regenerada pelos outros trens em regime de tração;
- No cenário 4, com maior intervalo entre trens, é possível verificar uma menor eficiência da regeneração, devido ao fato de que uma quantidade maior de energia é dissipada nos resistores de frenagem. Esse fato também afeta o consumo específico, ou seja, o consumo final do trem é maior pela menor eficiência na regeneração.

O consumo total de energia das subestações obtido no cenário 1 é distribuído entre as subestações, conforme ilustrado na Figura 4.

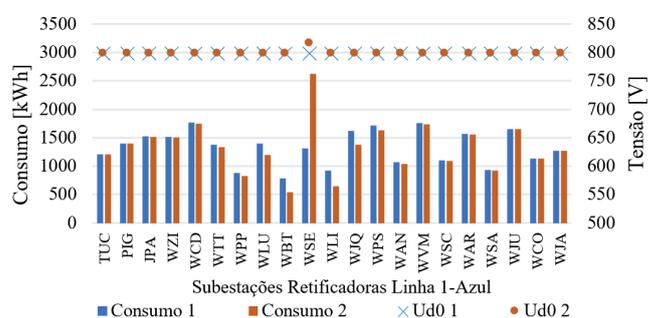


Fig. 4. Consumo das subestações retificadoras – cenário 1.

TABELA III

Fluxo de Energia na Tração Cenários 1 e 4

Simulação	Cenário 1	Cenário 4
Energia total subestação [MWh]	27,91	10,75
Energia retificada (E_{ser}) [MWh]	27,91	10,75
Energia invertida (E_{inv}) [MWh]	0,00	0,00
Perdas na subestação [MWh]	0,94	0,17
Perdas na rede [MWh]	2,72	0,73
Energia dos trens (E_{trem}) [MWh]	25,19	9,86
Energia tração dos trens ($E_{tração}$) [MWh]	42,40	13,65
Energia sistemas auxiliares dos trens (E_{aux}) [MWh]	6,06	2,31
Energia freio elétrico disponível ($E_{freio_ele_disp}$) [MWh]	26,71	8,29
Energia regenerada (E_{regen}) [MWh]	23,28	6,10
Eficiência da regeneração (η_{reg}) [%]	87,14%	73,56%
Total percorrido pelos trens [km]	1790,40	665,55
Consumo Específico [kWh/km]	14,07	14,01

Os dados em azul representam o consumo de cada subestação, considerando sua tensão em vazio 797 V. Os dados em laranja representam a alteração da tensão a vazio da subestação WSE para 817 V. Nesse caso, devido à tensão mais alta dessa subestação, o consumo é consideravelmente mais alto, influenciando bastante as subestações adjacentes. Essas considerações já foram observadas na prática em diversos casos nas linhas do metrô de São Paulo.

O resultado da trajetória do trem na simulação é ilustrado nas Figuras 5 e 6, onde pode ser vista a velocidade desenvolvida pelo trem e os limites de velocidade impostos pelo sistema de controle automático de trens nas duas vias da linha 1 – azul.

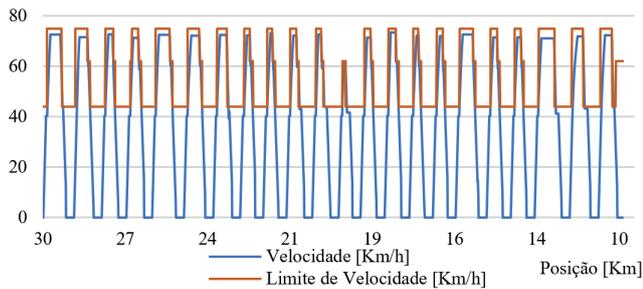


Fig. 5. Trajetória do trem na via 1- JAB-TUC.

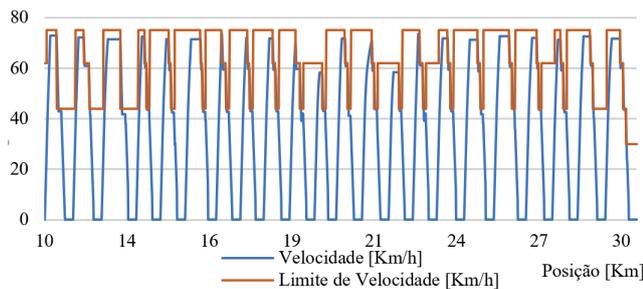


Fig. 6. Trajetória do trem na via 2- TUC-JAB.

A receptividade da linha CC para regeneração da energia de frenagem depende da relação entre a tensão das retificadoras e tensão gerada. A Figura 7 ilustra a potência elétrica desenvolvida por um trem simulado no cenário 1, onde a linha tracejada demonstra a potência elétrica total durante a frenagem e a linha contínua, a potência que realmente o trem conseguiu exportar para rede.

Conforme exposto no modelamento do trem em frenagem regenerativa operando em sobretensão, o excesso de energia injetada na linha de contato tende a elevar o nível de tensão, caso outros trens não estejam absorvendo essa energia. A diferença entre as duas linhas é dissipada nos resistores de frenagem do trem pela proteção do próprio inversor de tração do trem para proteção contra sobretensão; nesse caso, pode ocorrer um complemento do freio de atrito para se atingir o esforço freante solicitado. Em tal circunstância, o trem consegue exportar apenas uma pequena parte para a rede.

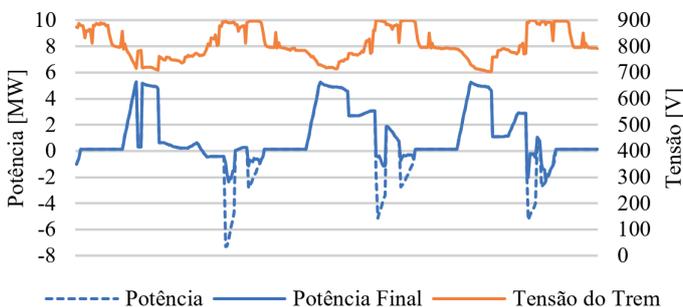


Fig. 7. Potência elétrica x tensão de linha trem – cenário 1.

C. Estudo de caso 2 – avaliação do potencial nas subestações

Nesse estudo de caso, denominado cenário 7, foi proposta uma situação hipotética do comportamento de todas as subestações retificadoras, operando, também, como inversoras, adotando um valor de 2 MW para cada uma delas. Assim, quando a tensão da subestação for maior que sua

tensão em vazio, ela passará a inverter a energia para a rede CA.

O objetivo desse cenário foi avaliar o comportamento de todas as subestações, operando, também, como inversoras para se identificar quais locais apresentaram um melhor potencial de recuperação, sendo que esse pode ser influenciado pela distância entre as estações, o perfil altimétrico da linha com inclinações mais acentuadas e a interação entre os trens.

Como é possível verificar na Tabela III do primeiro estudo de caso, na simulação do cenário 4 que remete a uma condição de apenas 15 trens circulando na linha (intervalo de 285 s entre trens), a eficiência da regeneração cai consideravelmente. Esse cenário, assim como outros com menor número de trens em operação, proporciona uma disponibilidade maior de energia que seria dissipada nos resistores de frenagem para recuperação no sistema inversor.

O fluxo de energia para o cenário 7 é apresentado na Tabela IV.

TABELA IV
Cenário 7 – Todas Subestações Inversoras

Simulação	Cenário 4	Cenário 7
Energia total subestação [MWh]	10,75	8,55
Energia retificada (E_{ser}) [MWh]	10,75	11,61
Energia invertida (E_{inv}) [MWh]	0,00	2,79
Perdas na subestação [MWh]	0,17	0,27
Perdas na rede [MWh]	0,73	0,75
Energia dos trens (E_{trem}) [MWh]	9,86	7,80
Energia tração dos trens (Etração) [MWh]	13,65	13,65
Energia sistemas auxiliares dos trens (E_{aux}) [MWh]	2,31	2,31
Energia freio elétrico disponível ($E_{freio_ele_disp}$) [MWh]	8,29	8,29
Energia regenerada (E_{regen}) [MWh]	6,10	8,15
Eficiência da regeneração (η_{reg}) [%]	73,56%	98,36%
Total percorrido pelos trens [km]	665,55	665,55
Consumo Específico [kWh/km]	14,01	11,72

O resultado do fluxo de energia retificada no cenário 4 e o resultado da energia retificada e invertida no cenário 7 para cada subestação são ilustrados na Figura 8.

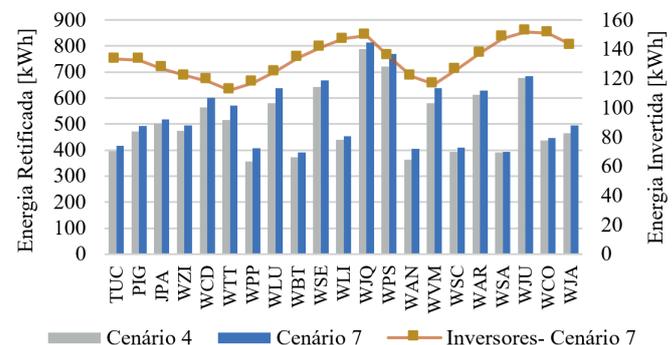


Fig. 8. Energia retificada e recuperada – cenário 7 com inversores.

Os resultados obtidos permitem observar alguns pontos importantes:

- A energia retificada das subestações no cenário 7 é 7,19% mais alta que no cenário 4. Esse aumento de consumo permite observar que a solução de se instalar inversor

em todas as subestações não é vantajosa não só pelo custo de implantação, mas também porque a melhor eficiência não é obtida nesse caso, já que os inversores ficariam subutilizados até por não ter energia excedente da frenagem dos trens para ser reaproveitada.

- De qualquer forma, a energia totalizada da subestação é 19,17% menor em comparação ao cenário 4;
- A eficiência da regeneração é próxima de 100%, isto é, os trens estariam exportando toda energia de frenagem disponível;
- Com isso, o consumo específico dos trens também diminui significativamente;
- As subestações com maior capacidade de reaproveitamento, conforme Figura 8, estão próximas aos extremos da linha e em algumas estações no meio da linha.

D. Estudo de caso 3 – aplicação e avaliação em uma estação

Nesse estudo de caso, a avaliação da aplicação da subestação inversora será feita para uma estação e o potencial será estudado para todos os cenários do primeiro estudo de caso. A potência do inversor simulada foi de 1,12 MW, escolhido por ser potência disponível entre os equipamentos no mercado para a tensão nominal de 750Vcc, como é o caso da linha em estudo. Devido às perdas de conversão para os cálculos, foi considerada uma eficiência de 95% do equipamento inversor.

Para o estudo foi escolhida a subestação retificadora de São Judas, identificada como WJU na Figura 8.

Para ilustrar os resultados obtidos nas simulações e a interação entre os trens e as subestações, dois exemplos são mostrados. No primeiro, ilustrado na Figura 9, é possível ver a limitação que ocorre na frenagem, onde as linhas pontilhadas representam a potência que será dissipada nos resistores de frenagem devido à limitação de tensão da linha; nesse caso, a subestação não conduzirá por ser um retificador.

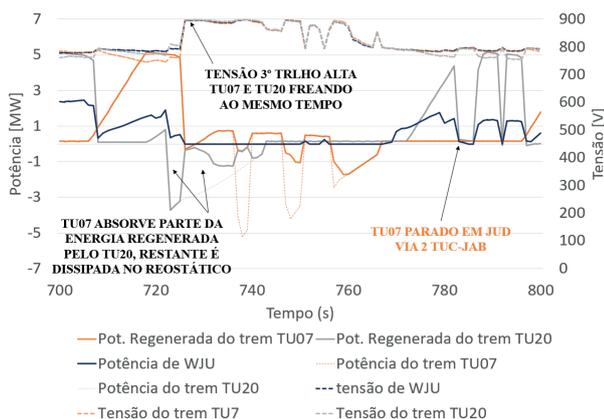


Fig. 9. Interação Subestação Retificadora WJU x Trens 07 e 20.

No segundo, ilustrado na Figura 10, é possível ver o comportamento da subestação operando também como inversora e a interação entre os trens e a subestação.

Conforme mostrado nas figuras 9 e 10, o trem em frenagem regenerativa, operando em sobretensão, a energia injetada na linha de contato pelo trem tende a elevar o nível de tensão, caso outros trens não estejam absorvendo essa energia. Neste

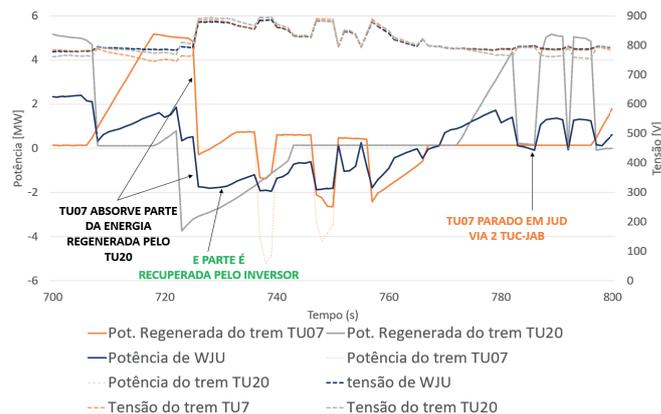


Fig. 10. Interação Subestação Inversora WJU x Trens 07 e 20.

caso, sem a implementação de uma subestação inversora, o trem consegue exportar apenas uma pequena parte para a rede, sendo grande parte da energia dissipada nos resistores de frenagem.

E. Análise da viabilidade técnico-econômica

Para avaliar o custo de um equipamento inversor e sua instalação conforme proposta, será analisado o retorno do investimento para dois cenários distintos.

Em ambos os cenários, o valor da tarifa bruta é corrigido anualmente pelo índice IPCA, sendo adotado um valor de 3,5% conforme dado pela previsão do Banco Central [23].

Dessa forma, as considerações adotadas para uma análise mais realista dos possíveis custos são explicadas e detalhadas na Tabela V.

TABELA V
Valores Adotados Tarifa de Energia

Ano	TE sem IPCA cenário 1	Tarifa bruta com IPCA (TE+TUSD) cenário 1	TE sem IPCA cenário 2	Tarifa bruta com IPCA (TE+TUSD) cenário 2
2020	\$45,14	\$80,38	\$45,14	\$80,38
2021	\$38,86	\$76,32	\$38,86	\$76,32
2022	\$34,29	\$74,12	\$34,29	\$74,12
2023	\$32,00	\$74,19	\$32,00	\$74,19
2024	\$43,81	\$90,27	\$28,57	\$72,87
2025	\$43,81	\$93,43	\$28,57	\$75,42
2026	\$43,81	\$96,70	\$28,57	\$78,06
2027	\$43,81	\$100,09	\$28,57	\$80,79
2028	\$43,81	\$103,59	\$28,57	\$83,62
2029	\$43,81	\$107,21	\$28,57	\$86,54
2030	\$43,81	\$110,97	\$28,57	\$89,58
2031	\$43,81	\$114,85	\$28,57	\$92,71
2032	\$43,81	\$118,87	\$28,57	\$95,95
2033	\$43,81	\$123,03	\$28,57	\$99,31
2034	\$43,81	\$127,34	\$28,57	\$102,79
2035	\$43,81	\$131,79	\$28,57	\$106,39
2036	\$43,81	\$136,41	\$28,57	\$110,11
2037	\$43,81	\$141,18	\$28,57	\$113,96
2038	\$43,81	\$146,12	\$28,57	\$117,95
2039	\$43,81	\$151,23	\$28,57	\$122,08
2040	\$43,81	\$156,53	\$28,57	\$126,35
2041	\$43,81	\$162,01	\$28,57	\$130,78
2042	\$43,81	\$167,68	\$28,57	\$135,35
2043	\$43,81	\$173,54	\$28,57	\$140,09
2044	\$43,81	\$179,62	\$28,57	\$144,99
2045	\$43,81	\$185,91	\$28,57	\$150,07

Os demais dados utilizados para o cálculo são descritos na Tabela VI.

TABELA VI
Dados para Cálculo de Retorno do Investimento

Dados	Valor
Custo de energia [\$]	Tabela V
Potência Nominal do Inversor [kW]	1.125
Economia de energia obtida [kWh/ano]	1.040.293
Economia média obtida [\$/ano]	114.286
Custo do equipamento [\$]	666.673
Custo estimado instalação [\$]	95.239

A Figura 11 ilustra o retorno do investimento para dois cenários futuros do valor da tarifa de energia, sendo possível também estabelecer-se uma comparação entre eles. Com a tarifa de energia ficando mais alta para os contratos a partir de 2023, o retorno do investimento do projeto dar-se-á em, aproximadamente, 9 anos, conforme curva azul do gráfico. Por outro lado, a tarifa, ficando mais baixa, esse tempo poderá aumentar para 10 anos e 5 meses no caso estudado, conforme curva laranja do gráfico.

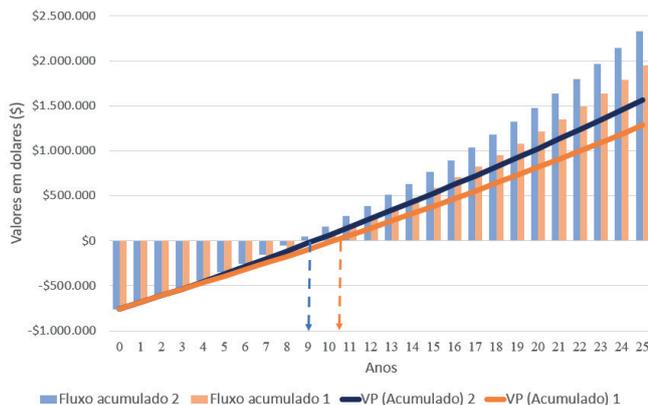


Fig. 11. Retorno do investimento do projeto.

Em ambos os casos, a aplicação demonstra-se viável, considerando a vida útil do ativo no mínimo, maior que 20 anos.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o estudo de aplicação de uma subestação inversora para aumento da eficiência energética aplicada ao sistema de tração elétrica do metrô de São Paulo, simulado em 3 estudos de casos distintos.

Os resultados obtidos no primeiro estudo de caso permitirão verificar o consumo de energia em diferentes cenários operacionais e validar os resultados de consumo de energia obtidos pela simulação, por meio da comparação com medições reais da frota de trens utilizada no estudo de caso.

No segundo estudo de caso foi avaliado o potencial de energia com a aplicação da subestação inversora em todas as subestações, buscando identificar onde a proposta de aplicação estaria sendo mais bem utilizada.

No terceiro estudo de caso foi mostrada a viabilidade de utilizar uma subestação inversora para o aumento da eficiência energética no sistema de tração. Dependendo da quantidade de trens em circulação, valores entre 9,5% e 41,37% da energia

consumida da subestação nas simulações horárias podem ser reaproveitados, e, anualmente, uma estimativa de 12,94% em relação ao total de energia consumida da subestação.

Este trabalho conclui que a aplicação da subestação inversora para reaproveitamento da energia de frenagem é viável para maximizar a utilização da energia de frenagem em sistemas metroviários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ricardo dos Santos, pela colaboração neste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, W. Brandauer, "Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 8, pp. 2831–2847, Ago. 2019, doi: 10.1109/its.2018.2886809.
- [2] *Relatório Integrado*, COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, 2018.
- [3] M. Khodaparastan, A. Mohamed, "Modeling and simulation of a reversible substation for recuperation of regenerative braking energy in rail transit systems", in *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1–5, IEEE, Jun. 2019, doi: 10.1109/itec.2019.8790530.
- [4] Z. Tian, G. Zhang, N. Zhao, S. Hillmansen, P. Tricoli, C. Roberts, "Energy evaluation for DC railway systems with inverting substations", in *IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, pp. 1–6, IEEE, Nov. 2018, doi:10.1109/esars-itec.2018.8607710.
- [5] J. Ortega, "Ingeber system for kinetic energy recovery & Metro Bilbao experience", in *Rail Technological Forum for Internationalization*, 2011.
- [6] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation", in *Electrical systems for aircraft, railway and ship propulsion*, pp. 1–9, IEEE, Out. 2010, doi: 10.1109/ESARS.2010.5665264.
- [7] F. Fan, B. G. Stewart, "Power flow simulation of DC railway power supply systems with regenerative braking", in *IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, pp. 87–92, IEEE, Jun. 2020, doi: 10.1109/melecon48756.2020.9140462.
- [8] F. Fan, Y. Li, S. Ziani, B. G. Stewart, "Reversible substation modelling with regenerative braking in DC traction power supply systems", in *IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, pp. 1–6, IEEE, Fev. 2021, doi:10.1109/tpec51183.2021.9384922.
- [9] A. Gray, D. Stinton, "Designing reversible substations using inverters", in *7th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS 2015)*, pp. 1–5, IET, Jun. 2015, doi: 10.1049/ic.2015.0336.

- [10] A. Bitoleanu, M. Popescu, C. V. Suru, “Bidirectional static system for active DC traction substations: Theoretical and experimental evaluation”, in *5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, pp. 1–10, IEEE, Out. 2017, doi: 10.1109/iseee.2017.8170635.
- [11] F. E. U. Reis, R. P. Torrico-Bascope, F. L. Tofoli, L. D. S. Bezerra, “Bidirectional three-level stacked neutral-point-clamped converter for electric vehicle charging stations”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 37565–37577, Fev. 2020, doi:10.1109/access.2020.2976003.
- [12] C. A. de Sousa, S. L. Pereira, “Comparative study of existing methods for improving the energy efficiency of the system traction of subway”, in *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–5, IEEE, Nov. 2015, doi: 10.1109/cobep.2015.7420268.
- [13] M. R. Nascimento, L. C. Borin, E. Mattos, C. R. Osorio, G. G. Koch, R. P. França, F. H. Dupont, V. F. Montagner, “Comparação de controladores PIDs robustos otimizados para aplicação em conversores de potência”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 26, no. 2, pp. 104–114, Mar. 2021, doi:10.18618/rep.2021.1.0060.
- [14] G. V. Hollweg, P. J. Evald, G. G. Koch, E. Mattos, R. V. Tambara, H. A. Gründling, “Controlador Robusto Adaptativo Super-Twisting Sliding Mode por Modelo de Referência para Regulação das Correntes Injetadas em Redes Fracas por Inversores Trifásicos com Filtro LCL”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 26, no. 2, pp. 1–12, Mai. 2021, doi:10.18618/rep.2021.2.0001.
- [15] P. Lukasiak, 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, IEEE, Mai. 2015, doi:10.1109/powereng.2015.7266345.
- [16] G. Zhang, Z. Tian, P. Tricoli, S. Hillmansen, Y. Wang, Z. Liu, “Inverter operating characteristics optimization for DC traction power supply systems”, *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3400–3410, Abr. 2019, doi: 10.1109/tvt.2019.2899165.
- [17] B. Mellitt, Z. Mouneimne, C. Goodman, “Simulation study of DC transit systems with inverting substations”, in *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, vol. 131, pp. 38–50, IET, Mar. 1984, doi:10.1049/ip-b.1984.0008.
- [18] R. S. Esfandiari, *Numerical methods for engineers and scientists using MATLAB®*, Crc Press, Abr. 2017, doi: 10.1201/9781315152417.
- [19] C. L. Pires, *Engenharia Elétrica Ferroviária E Metroviária: Do Trólebus Ao Trem de Alta Velocidade*, Grupo Gen-LTC, Jan. 2013.
- [20] Z. Tian, S. Hillmansen, C. Roberts, P. Weston, N. Zhao, L. Chen, M. Chen, “Energy evaluation of the power network of a DC railway system with regenerating trains”, *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 6, no. 2, pp. 41–49, Jun. 2016, doi:10.1049/iet-est.2015.0025.
- [21] C. Goodman, L. Sin, “DC railway power network solutions by diakoptics”, in *Proceedings of IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, pp. 103–110, IEEE, Mar. 1994, doi:10.1109/rcon.1994.289015.
- [22] Z. Tian, *System energy optimisation strategies for DC railway traction power networks*, tese de doutorado, University of Birmingham, Jun. 2017, doi: 10.3403/30296074u.
- [23] M. Albuquerque, R. Perissinotto, “Inflação, política monetária e capacidade política: o caso do CMN (1964–2018)”, *Desenvolvimento em Debate*, vol. 10, no. 1, Abr. 2022, doi:10.51861/ded.dmvdo.1.003.

DADOS BIOGRÁFICOS

Sergio Luiz Pereira, 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 como coordenador de curso de engenharia.

Ruan Streitenberger Guedes, Engenheiro Eletricista pela Faculdade Cidade de São Paulo em 2013. Em 2020, conclui Pós-Graduação em Eficiência Energética pelo SENAI-SP, com módulo de extensão na RWTH, em Aachen na Alemanha. Trabalhou nas áreas de manutenção de material rodante e projetos na Companhia do Metropolitano de São Paulo, onde, atualmente, é Engenheiro Especializado na Engenharia de Manutenção. Cursa, no momento presente, mestrado em Engenharia Elétrica na área de concentração de Sistemas de Potência na Escola Politécnica da USP – EPUSP.

Carlos Alberto de Sousa, Engenheiro Eletricista pela Universidade de Mogi das Cruzes – UMC em 2001. Em 2004, formou-se especialista em Engenharia de Segurança do trabalho na Universidade Paulista. Em 2007 formou-se especialista em Automação Industrial pelo PECE-USP. Em 2010 obteve o título de mestrado na Escola Politécnica da USP – EPUSP. Concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica em 2015 na Escola Politécnica da USP – EPUSP. Trabalha como engenheiro na Companhia do Metrô de São Paulo.