

### **CATEGORIA 3**

## **CONSIDERAÇÕES P/ O PROJETO - ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO**

## **RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

### **INTRODUÇÃO**

Apresentar as considerações sobre a definição da tensão para os projetos elétricos de sistemas de tração de metrô, quanto às tendências atuais das implantações, estudos para os desenvolvimentos dos projetos elétricos, eficiência energética elétrica - que é um conceito que caracteriza o nível da economia dos recursos das fontes e utilização nos sistemas elétricos de potência.

Aspectos e reflexos serão avaliados quanto a escolha da tensão elétrica que se pretende para uma linha, as possíveis e consequentes vantagens: redução do número de equipamentos elétricos instalados, ganhos com a energia elétrica recuperada dos trens, conservação da energia, otimização da operação e manutenção. Com destaque

na redução no consumo de energia do sistema elétrico, como um todo, gasta mensalmente.

Estudos realizados com as recomendações contidas nas normas (EN50163 - IEC 60850) referente à determinação atual da tensão para o projeto elétrico de uma linha, e para traçados de linhas existentes que necessitam de modernizações elétricas são evidenciados.

## **DIAGNÓSTICO**

As normas EN-50163 e IEC-60850 mostram as tensões padronizadas para os sistemas de tração para o projeto elétrico.

As análises comparativas e simulações elétricas, são realizadas com as alternativas de tensão nominal 750 Vcc e 1500 Vcc. Buscando os melhores resultados nos sistemas elétricos, para projetos inovadores e otimizados de novas linhas e nas linhas que já estão atualmente em funcionamento.

Sistemas elétricos Metroferroviários de linhas em operação antigas, estão sendo modernizados devido à obsolescência. Melhores sistemas, equipamentos, configurações e características elétricas resultarão em melhoria da eficiência elétrica.

O aspecto tensão elétrica, é relevante nos estudos de alternativas do sistema de alimentação elétrica de tração. Pois pode impactar nos custos de implantação e nos futuros custos operacionais (custo mensal da energia elétrica).

Alguns fatores podem influenciar o consumo de energia (independentes da tensão escolhida):

**Tabela 1 – Fatores que podem influenciar no consumo**

	FATOR	CRITÉRIO
1	Traçado da linha	distâncias, rampas e curvas
2	Trens	quantidades, composição, isolações, características dos motores, acionamentos, pesos, capacidade de regeneração da energia das frenagens, etc.
3	Suprimento de energia	retificação (ou não), isolações, <b>tensões, correntes, impedâncias, rendimentos, linhas de contato (trilhos de retorno, terceiro trilho, catenária, etc.)</b> .
4	Sinalização e controle	confiabilidade, precisão, circuitos de via, simultaneidades, distâncias permitidas, alternativas de desempenho, automatismos nas acelerações, velocidades, previsão e controle dos tempos de deslocamento, parada, headway, etc.
5	Forma de operação/ políticas de uso das alternativas disponibilizadas pelos sistemas de sinalização e controle	estratégias, desempenho imposto, uso de máximas acelerações, velocidades, mínimos tempos de deslocamento, parada, headway, número de viagens, etc.

Várias pesquisas mostram a redução do consumo da energia elétrica, principalmente no sistema de tração elétrica, que é significativo quanto ao custo operacional e a otimização dos critérios de uso, parâmetros, especificações e características dos equipamentos e sistemas.

Estas pesquisas podem orientar novos projetos de eletrificação, para a conservação de energia nas novas linhas, possibilitando a melhoria de custos de implantação e operação

nos sistemas elétricos e equipamentos: vias, trilhos, equipamentos de manobra, trens, acumuladores, etc.

O Metrô-SP vem realizando vários estudos, simulações elétricas e ações, buscando melhorias no uso do sistema: trens, subestações, controle de movimentação de trens, equipamentos auxiliares, iluminação, monitoramento de fluxos de potência, etc. empenhados na redução do consumo de energia elétrica e do custo operacional, com o mínimo impacto no desempenho e na oferta de conforto e transporte aos passageiros.

O livro intitulado "Subways of the World", publicado pelo "Japan Subway Association", em maio de 2000, contém as principais características de 117 sistemas de Metrôs do mundo.

**Tabela 2 – Amostra de aplicação das tensões 750Vcc e 1500 Vcc**

País		Linhas antigas	Linhas atuais/ futuras
		Vcc	Vcc
Alemanha		600	1500
Inglaterra		600	1500
França		600	1500
Espanha	Madri Metrosur	600	1500
Itália		750	1500
(maioria dos países da Ásia)		750	1500

fonte: Subways of the World - 05/2000, publicado pela Japan Subway Association

Por que o sistema de alimentação de 1500 Vcc está sendo escolhido em linhas recém-construídas que possuem capacidade média e pesada?

## **ANÁLISE**

### **1. Algumas vantagens de um Sistema 1500 Vcc:**

Um sistema deve ser econômico, moderno e operado sem problemas. Para tanto, vários aspectos devem ser avaliados, estudados e ponderados, conforme abaixo:

Tabela 3 – Alguns aspectos a avaliar

	Aspecto	Sist. 750 Vcc	Sist. 1500 Vcc	Observações
1	Menores correntes = menores quedas de tensão			Comparado o sistema de 750 Vcc, as correntes de saída, para uma mesma demanda de energia, são reduzidas pela metade em 1500 VCC. Assim, serão reduzidas as “quedas de tensão” ao longo dos trilhos condutores. Isso possibilitará um “aumento na distância entre as subestações
2	Redução do número de subestações			Aplicações práticas mostram que 1500 a 2500 m entre as subestações, é adequado sistemas 750 Vcc. Enquanto que para sistemas 1500 Vcc, distância poderia ser aumentada para aproximadamente 4000 m
3	Menor custo de construção			A redução no número de subestações, diminuirá o custo de construção.
4	Menor secção transversal dos cabos			Com correntes menores, será menor a secção transversal dos cabos alimentadores
5	Menor capacidade de corrente do sistema de captação de energia			Com correntes menores, os "trilhos condutores" do sistema de captação de energia (terceiro trilho ou catenária e sapatas coletoras) também poderá ter capacidades nominais menores
6	Redução das horas de manutenção			Em uma subestação, há inspeção e manutenção periódicas. Diminuir o número de subestações, resulta na redução de custos de manutenção
7	Aumento do uso de energia regenerada			O uso da energia de regeneração depende dos trens e dos locais das subestações. Com o aumento do espaço entre as subestações, a possibilidade de existência de mais de um trem na mesma seção de alimentação é maior, especialmente em headways curtos. A faixa de tensão permitida (em V) é maior (ver tabela da EN50163)
8	Menor perda de energia na transmissão (conversão e linhas de contato)			A perda de energia elétrica, ocorre em qualquer processo de transmissão. As linhas de transmissão, contato, e equipamentos das subestações, são locais de perdas de energia por Efeito Joule. Conforme a lei de Ohm expandida: $P = R \times I^2$ , a potência (no caso, da perda de energia) é proporcional ao quadrado da corrente x resistência elétrica (no caso, cabos e trilhos). De forma simplificada: Para uma mesma potência da carga, dobrar a tensão, reduziria a corrente pela metade. Circular a metade de corrente pelos condutores e "linhas de contato", reduz as perdas para 1/ 4 .

## 2. Estudo comparativo realizado pelo Umraniye Metro M5, da cidade de Uskudar-Turquia.

Em 2004, a tensão do sistema de alimentação de energia foi objeto do estudo realizado pela Istanbul Technical University, para o Umraniye Metro M5, da cidade de Uskudar-Turquia. Foi usado o programa de simulação de sistemas ferroviários chamado “SimuX”. Foi comparado o uso das tensões 1500 Vcc e 750 Vcc.

**Tabela 4 – Características principais da Linha Umraniye**

16 km de extensão.
13 estações de passageiros.
gradiente máximo de 4%
trens de 6 carros (todos motorizados).
estimado 25.000 pphpd (passageiros/ hora/ sentido) para o ano de 2010
prevê-se que a capacidade aumentará para 35.000 pphpd (passageiros/ hora/ sentido) no ano 2025
headway é calculado como 210 segundos, no início da operação
para o fluxo final futuro, o headway irá para 150 segundos

**Tabela 5 - Considerações**

Simulações realizadas para 750 Vcc
Simulações realizadas para 1500 Vcc
Duração do ciclo 2 horas
Trens totalmente carregados (Full Load - FL)
Trens meio carregados (Half Load - HL)
Headway 150 s
Headway 300 s
não deve haver restrição operacional, mesmo quando não há a disponibilidade de uma subestação

Com a execução de uma simulação elétrica CC (corrente contínua), os resultados, são os valores numéricos das principais variáveis:

- correntes CC: nos trilhos, cabos alimentadores, equipamentos de manobras, grupos retificadores;
- tensões nos trens ao longo de toda a linha;
- tensões negativo-terra ao longo de toda a linha.

Resultados da simulação da Istanbul Technical University:

No caso da simulação para o Umraniye Metro M5, foi concluído que utilizando a alimentação em 750 Vcc, seriam necessárias 6 Subestações retificadoras, e caso fosse optado pelo sistema em 1500 Vcc seriam suficientes 4 Subestações.

Os dados de “consumo total de energia” e “perda de energia” são representados na tabela abaixo. Apresenta a energia gasta se o sistema for com alimentação em 750 Vcc e no caso de 1500 Vcc.

Mostra uma redução de aproximadamente 10% no consumo de energia de tração para as mesmas condições de operação, em relação ao 750 Vcc.



Tabela 6 – 750 Vcc e 1500 Vcc - Consumo total x Perdas

Carregamento	Hw	Tensão						diferença entre as perdas em 750 e 1500
		750 Vcc			1500 Vcc			
		Total	Perdas	%	Total	Perdas	%	
	s	KWh	KWh		KWh	KWh		
FL	150	16087	1744	10,84%	14612	704	4,82%	9,17%
HL	150	13978	1412	10,10%	12562	570	4,54%	10,13%
FL	300	8995	857	9,53%	7837	363	4,63%	12,87%
HL	300	7901	674	8,53%	6970	280	4,02%	11,78%

A coluna “**Total**” representa a quantidade de energia em todo o sistema.

A coluna “**Perdas**” são valores calculados, levando-se em conta as correntes, distâncias, períodos e resistividades dos alimentadores de corrente contínua.

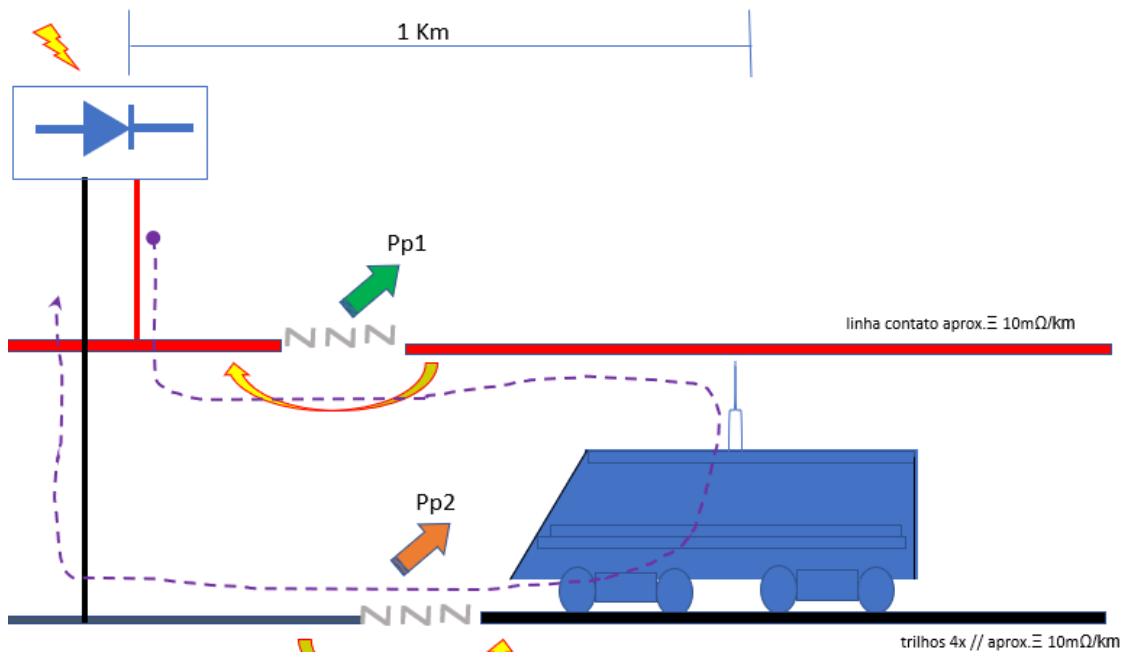
$$E \text{ perda (\%)} = E \text{ perdas} / E \text{ consumida} \times 100$$

Conforme uma das simulações, para as duas horas de ciclos, a energia consumida do sistema seria de 16087 kWh, e perdido no sistema 1744 kWh. Para este caso, o percentual de perda de energia foi calculado como **10,84%**. Para a mesma condição, alimentado com 1500 Vcc, o percentual de perda de energia foi de **4,82%**. Isto representou uma diferença entre eles, de **9,17%**.

Tomando-se como exemplo a linha Aksaray - Havalimani LRT de Istambul, que consome aproximadamente 2 GWh/ mês, pode-se dizer que 200.000 kWh de energia, está sendo “perdida” pelo sistema.

$$P_{\text{perda}} = R \times I^2$$

(instantânea)



$$P_{\text{perda}} = R \times I^2$$

(instantânea)

Considerando 1000 A & 1 Km:

$$\begin{aligned} P_{\text{perda}} &= P_{p1} + P_{p2} \\ &= (10 \text{ m}\Omega \times (1000)^2) + (10 \text{ m}\Omega \times (1000)^2) \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times (1000)^2 \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times 1.000.000 \end{aligned}$$

$$P_{\text{perda}} = 20 \text{ kW}$$

Considerando 2000 A & 1 Km:

$$\begin{aligned} P_{\text{perda}} &= P_{p1} + P_{p2} \\ &= (10 \text{ m}\Omega \times (2000)^2) + (10 \text{ m}\Omega \times (2000)^2) \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times (2000)^2 \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times 4.000.000 \end{aligned}$$

$$P_{\text{perda}} = 80 \text{ kW}$$

Figura 1 – Exemplo de “perdas” nas linhas de contato – Trilho de retorno e alimentador

### 3. Escolha da “tensão em vazio” das subestações retificadoras

Ainda de acordo com a Norma EN50163, conforme a tensão de trabalho escolhida para um sistema elétrico de tração (750 Vcc ou 1500 Vcc) é permitida uma faixa de tensão, com os seus limites máximos e mínimos. Embora as faixas de tensão sejam proporcionais, em quaisquer das “tensões nominais” é de grande importância a determinação da “tensão em vazio” das saídas das subestações retificadoras, tendo em vista os critérios de eficiência energética, deve ser estudado o uso da menor “tensão em vazio” possível.

Tabela 1

#### EN 50163

Table 1 – Nominal voltages and their permissible limits in values and duration

Electrification system	Lowest non-permanent voltage $U_{min2}$ V	Lowest permanent voltage $U_{min1}$ V	Nominal voltage $U_n$ V	Highest permanent voltage $U_{max1}$ V	Highest non-permanent voltage $U_{max2}$ V
d.c. (mean values)	400	400	600 <sup>a</sup>	720	800
	500 <sup>c</sup>	500	750	900 <sup>c</sup>	1 000
	1 000	1 000	1 500	1 800 <sup>c</sup>	1 950
	2 000	2 000	3 000	3 600	3 900 <sup>b</sup>
a.c. (r.m.s. values)	11 000	12 000	15 000	17 250	18 000
	17 500 <sup>c</sup>	19 000 <sup>c</sup>	25 000	27 500 <sup>c</sup>	29 000
Special national conditions for France, see Annex B.					
<sup>a</sup> Future d.c. traction systems for tramways and local railways should conform with system nominal voltage of 750 V, 1 500 V or 3 000 V.					
<sup>b</sup> Special national conditions for Belgium, see Annex B.					
<sup>c</sup> Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.					

Item 4.1. c), da mesma norma :

A tensão em vazio, no barramento da subestação, deve ser menor ou igual a  $U_{max1}$

Para subestações DC é aceitável ter esta tensão em vazio menor ou igual a  $U_{max2}$ , desde que quando o trem está presente, a tensão em seus pantógrafos deverá estar em conformidade com esta tabela 1

Fonte: EN50163

Em estudos internos ao Metrô-SP, constatamos este importante aspecto a ser considerado para a alimentação para os trens:

Para os sistemas de suprimento de energia (subestações, trafos, retificadores, equipamentos de manobra, cabos, trilhos de retorno, alimentadores positivos, etc.) e de acordo com as simulações elétricas, o uso e a determinação do valor da “tensão em vazio” a maior, e evita que os trens recebam o limite da “tensão mínima” estabelecida na norma e que desliga os trens, que ocorre quando há grande solicitação de correntes em configurações de contingência (por exemplo: uma subestação desativada), pois as distâncias aumentam e conseqüentemente as quedas de tensão nas linhas de contato (trilho de retorno e barramento positivo).

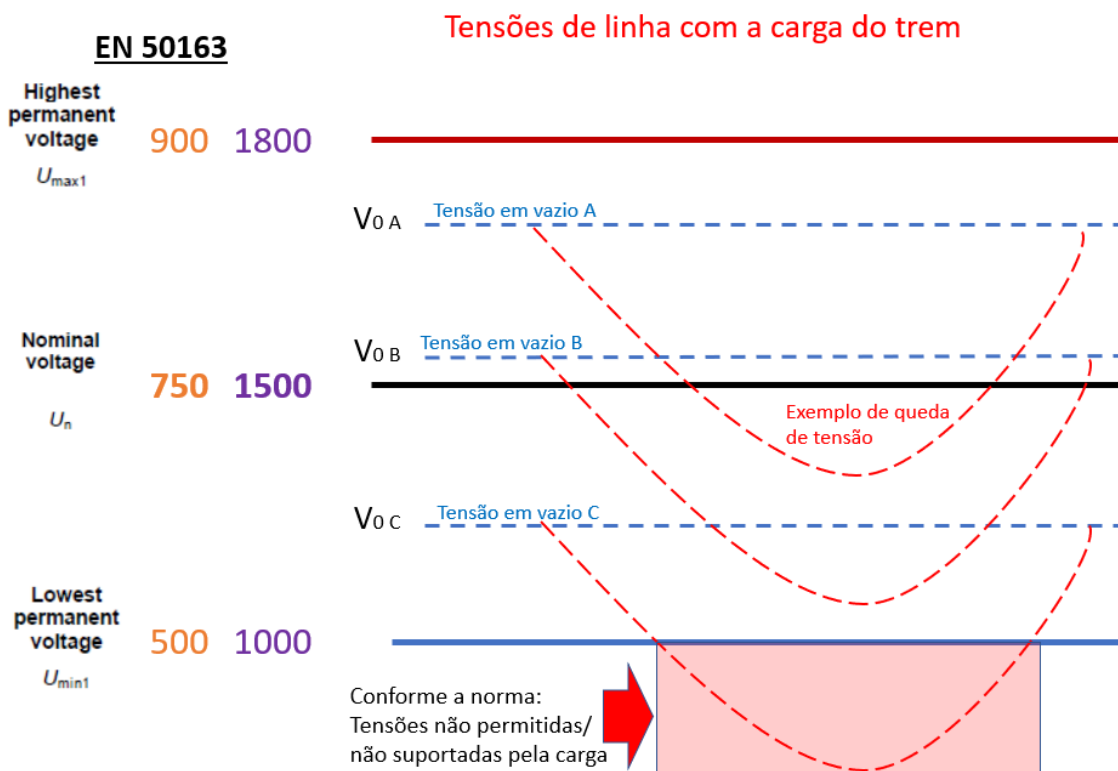


Figura 2 – Exemplo de “Tensões na linha”, com a carga do trem x EN50163

Sob o ponto de vista do trem, a tensão mais baixa, favorece a regeneração, pois amplia a faixa até a “tensão máxima” permitida. Uma “tensão em vazio” alta, restringe a tensão de regeneração dos trens.

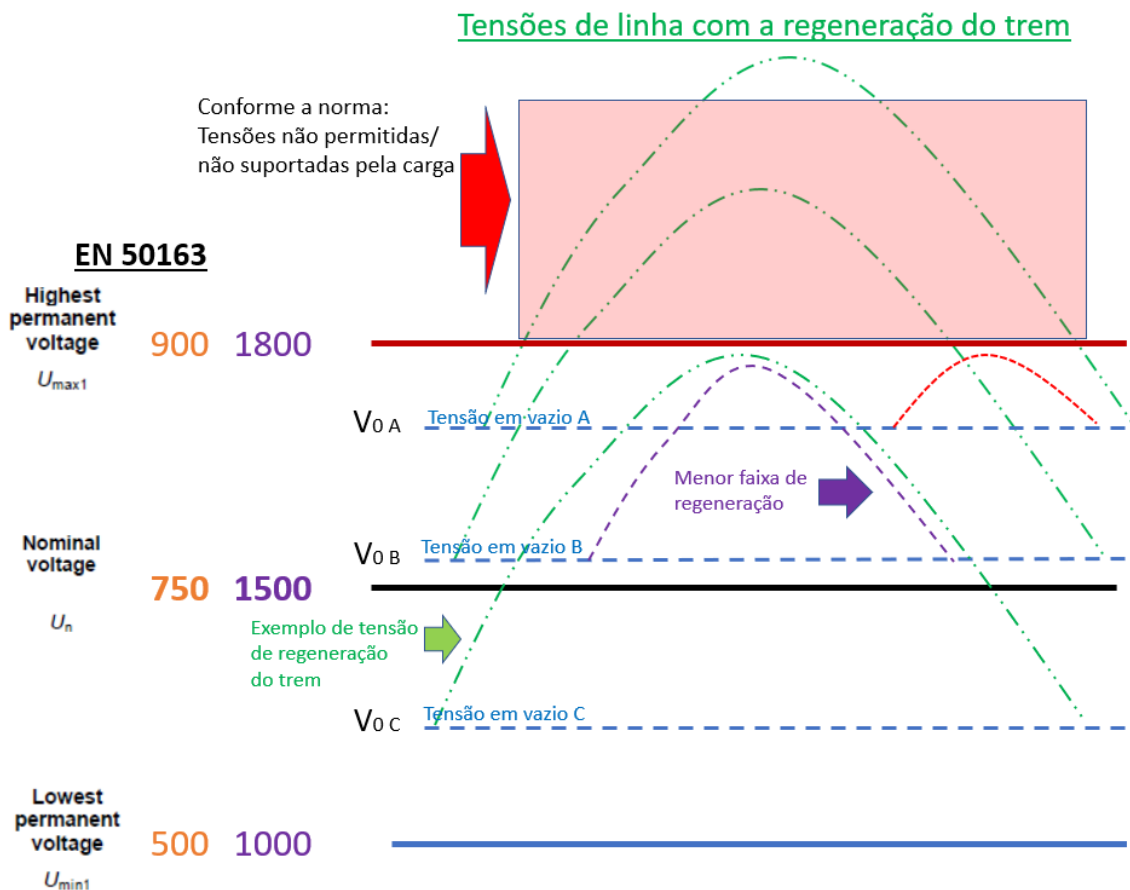


Figura 3 – Exemplo de “Tensões na linha” quando da regeneração x EN50123

Assim, os fatores limitantes serão:

- limite inferior, causado pela queda de tensão;
- limite superior, tensão máxima de regeneração.

As simulações deverão ser repetidas, com vários valores de “tensão em vazio” buscando convergir e conhecer o menor valor que ainda atenda as mínimas “tensões nas vias” para os trens, de acordo com a EN50123, em todas as situações (contingências). Assim,

se estabelece um balanço entre as tensões necessárias para a subestação retificadora suprir os trens e a maior liberdade na faixa da tensão de regeneração dos trens.

## CONCLUSÕES

Em sistemas metroviários do mundo, o nível da tensão de tração em 1500Vcc, apresenta uma maior tendência de utilização em relação ao 750Vcc.

A perda de energia (por efeito Joule) em um condutor é proporcional ao quadrado da corrente circulante, como resultado dobrar o nível de tensão, reduz as perdas de energia para um quarto. Assim, as perdas elétricas nas linhas de contato (trilho de retorno e alimentador) serão menores em sistemas 1500 Vcc.

Os custos de implantação (número de subestações) e de operação (custos de energia), podem ser menores nos sistemas 1500Vcc.

A boa escolha da “tensão em vazio” das subestações retificadoras pode favorecer a regeneração de energia dos trens.

Estudos de engenharia e reajustes e podem favorecer na economia de energia, sem a necessidade de implantação de novos equipamentos

Com uma visão sistêmica (trens e suprimento de energia) de toda uma linha metroviária, para uma eficiência energética, a regeneração de energia dos trens deve ser favorecida pelos sistemas elétricos alimentadores, melhorar a regeneração, para a troca de energia entre os trens.

O efeito operacional da aplicação dos critérios e políticas de economia de energia, são refletidos na diminuição dos custos mensais, que atualmente são buscados pela maioria dos estudos atuais, em várias publicações.

Como lições aprendidas, pudemos observar e constatar estes efeitos com as simulações elétricas e estudos internos do Metrô-SP.

Nas demais linhas de 1500 Vcc já implantadas devem ser observados e aferidos os efeitos.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. S. Açikbas, M. Turan Söylemez - Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation - Computers in Railways IX - 2004
2. Japan Subway Association, Subways of the World (Japanese), Tokyo, 2000.
3. Söylemez, M.T. & Açıkbaş, S., Multi-Train Simulation of DC Rail Traction Power Systems with Regenerative Braking, Submitted to COMPRAIL, 2004.
4. Popescu, Mihaela and Bitoleanu, Alexandru - A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems – Energies Journal – 2019 - [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies)
5. IHS Janes Urban Transport Systems Yearbook – ed. 2016/2017, Surrey, HIS Global Limited, 2016, Anual

6. EN 50163:2004+A1 2007 - Railway applications. Supply voltages of traction systems
7. IEC-60850:2014 - Railway applications - Supply voltages of traction systems