EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – ESTUDO COMPARATIVO DO CONSUMO DE ENERGIA DO MATERIAL RODANTE NAS FROTAS DA COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – METRÔ-SP

Paulo Sérgio Siqueira de Carvalho
Thiago da Silva Amate
Marçal Lopes de Paula
Fernando Gomes Clímaco

22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária

22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária 2016

AEAMESP

3º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ANPTRUHS

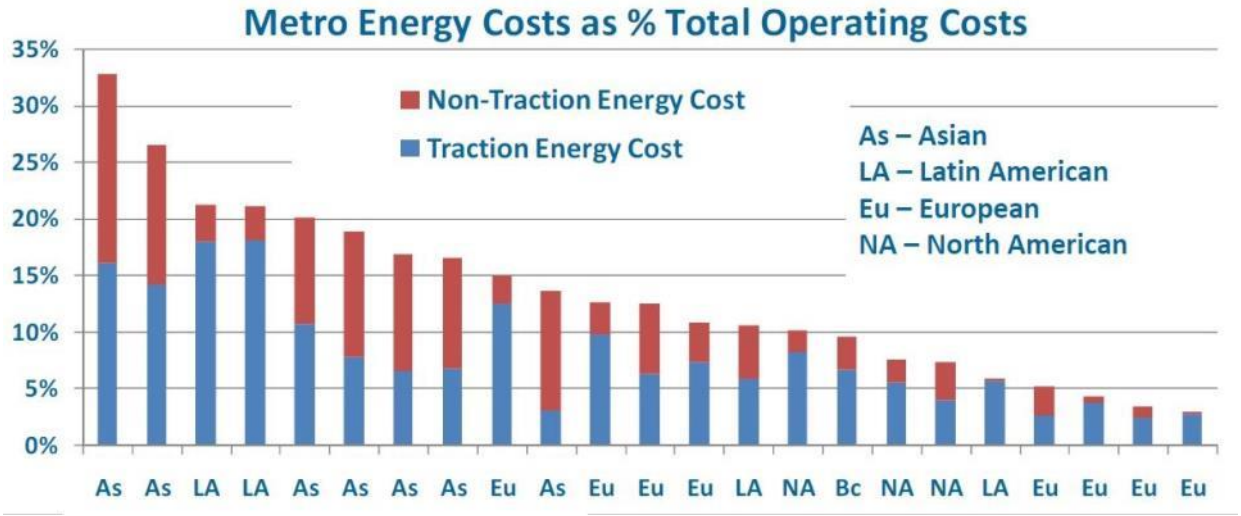
CBTU Companhia Brasileira de Trens Urbanos

CENÁRIO ATUAL – MOTIVAÇÕES PARA O ESTUDO

- O modal metroviário pertence à classe dos grandes consumidores de energia e representa uma parte significativa do consumo total de energia elétrica nos grandes centros urbanos;
- A energia elétrica é um dos principais custos operacionais de sistemas metroviários;
- O preço da energia elétrica sofreu aumentos expressivos nos últimos anos, com grande impacto nos custos operacionais dos operadores de metrôs;
- Preocupação com os impactos ambientais na operação do sistema;
- (2014) Metrô-SP estabelece: POL 10-200 – **Política de Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética**.

Continue

IMPACTO DA ENERGIA NOS CUSTOS OPERACIONAIS



FONTE: CoMet – ANOVA (2009)

CONSUMO DE ENERGIA NO METRÔ-SP

Consumo Total de Energia Metrô-SP
(2014)

550 GWh

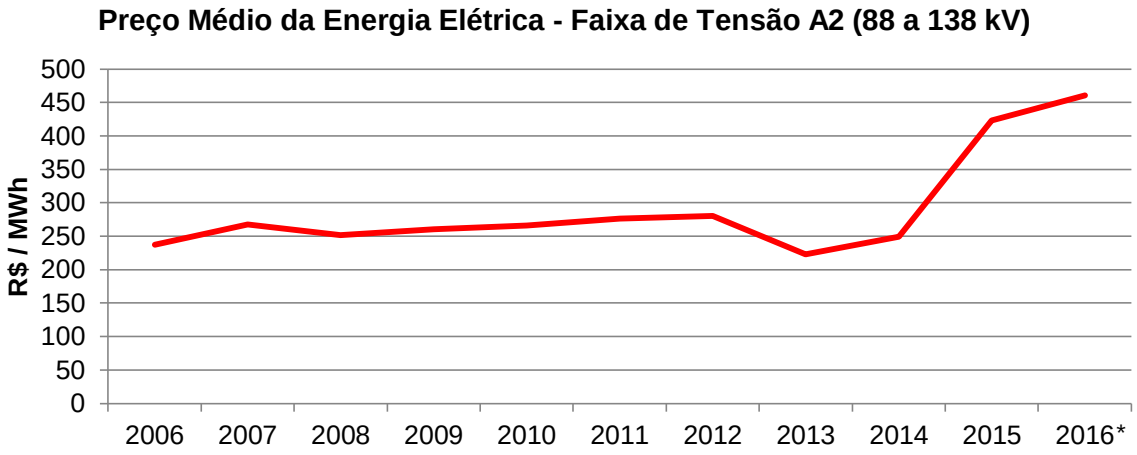
Consumo Total de Energia da Guiana
(2015)

558 GWh

(Cia. do Metropolitano de São Paulo - METRÔ-SP, 2014, p. 72)

(CIA World Factbook, 31/12/2015)

PREÇO DA ENERGIA (2006-2016)



FONTE: ANEEL - Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição * Jan - Jun

IMPACTO AMBIENTAL – METRÔ-SP

PEGADA AMBIENTAL

Emissões de CO_2e na Operação do Metrô-SP em 2014

Emissões	56 mil tCO_2e
Evitou*	-875 mil tCO2e
Balanço	-819 mil tCO2e

(Cia. do Metropolitano de São Paulo - METRÔ-SP, 2014, p. 75)

POLÍTICA AMBIENTAL

POL 10-200 – **Política de Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética**

Na concepção e desenvolvimento dos projetos de novas linhas e na atualização/modernização das linhas existentes:

a) adotar soluções que melhorem continuamente a eficiência energética;
b) incluir alternativas para geração própria de energia (solar térmica e solar fotovoltaica), em consonância com as diretrizes do PPE;
c) buscar soluções que promovam o desenvolvimento tecnológico da Companhia e a redução das despesas de custeio;

(Cia. do Metropolitano de São Paulo - METRÔ-SP, 2014, p. 75)

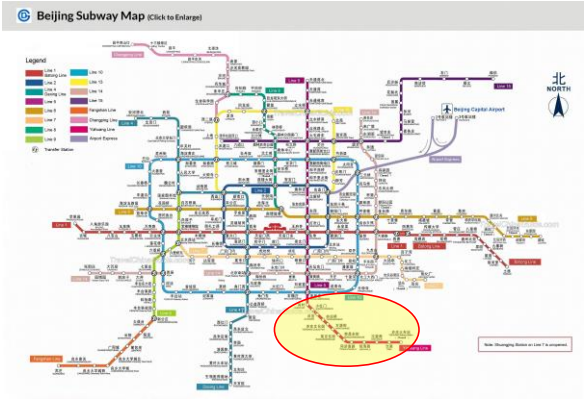
OBJETIVOS

O presente trabalho apresenta o resultado da medição do consumo de energia real do material rodante das frotas do METRÔ-SP durante um período da operação comercial.

Buscou-se realizar as medições nas mesmas condições operacionais, visando produzir resultados comparáveis entre as frotas e produzir material para propor alternativas para a operação, manutenção e aquisição de novos trens com foco na eficiência energética.

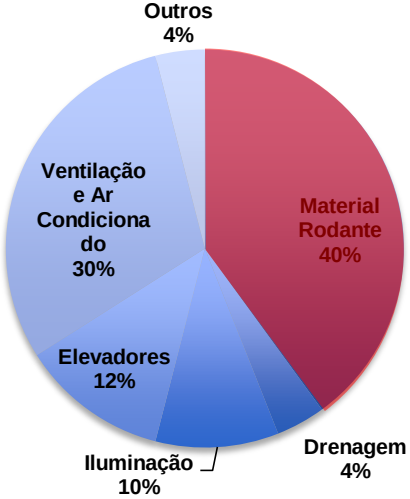
REVISÃO DA LITERATURA

Distribuição de energia consumida – Linha Yizhuang – Pequim (China)



Características da linha:

- Extensão: 23,23 km;
- 14 estações: 6 subterrâneas
  8 de superfície;
- Início da construção: 08/12/2007;
- Inauguração: 30/12/2010;
- Investimento: 1,2 Bilhão ¥

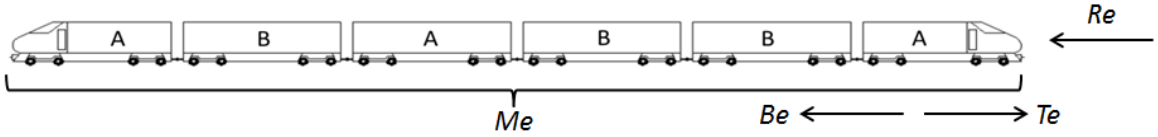


Trens são os maiores consumidores

FONTE: S. T. T. W. Y. Su, "Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro System Using an Optimal Train Control Simulation Model," 2016.

REVISÃO DA LITERATURA

J. C. C. E. JONG, "Models for Estimating Energy Comsumption of Electric Trains," Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 6, pp. 278-291, 2005.



$$\sum F = M_e \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$Te(v) - Re(v,i,\gamma) - Be(v) = Me\,\frac{dv}{dt}$$

$$Re(v,i,\gamma) = Rs(v) + Rr(v) + Rg(i) + Rc(\gamma) + R_t$$

$Te(v)$: Esforço trativo [N]
$Re(v,i,r)$: Resistência ao Movimento [N]
$Be(v)$: Esforço de Frenagem [N]
Me: Massa equivalente do trem [kg]
v: Velocidade [m/s]
i: Inclinação longitudinal da via [%]
γ: Raio da curva [m]

t: tempo [s]
$Rs(v)$: Resistência inercial [N]
$Rr(v)$: Resistência ao rolamento [N]
$Rg(i)$: Resistência de rampa [N]
$Rc(\gamma)$: Resistência de Curva [N]
R_t: Resistência de túnel

REVISÃO DA LITERATURA

J. C. C. E. JONG, "Models for Estimating Energy Comsumption of Electric Trains," Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 6, pp. 278-291, 2005.

ENERGIA DE TRAÇÃO

$$E_m = \frac{1}{3{,}6 \cdot 10^6} \cdot k \cdot V \int Im \cdot r_T \, dt$$

E_m: Energia consumida [kWh]
V: Tensão elétrica [V]
Im: Corrente no motor [A]
t: tempo [s]
k: número de motores em paralelo, $k \geq 1$
$r_T = \frac{T_{atual}}{T_{máx}}$, razão entre o esforço trativo atual e o esforço trativo máximo, $0 \leq r_T \leq 1$

ENERGIA DOS SISTEMAS AUXILIARES

$$E_a = \frac{P_a \cdot t_a}{3600} = \frac{(P_{am} \cdot n_m + P_{at} \cdot n_t) \cdot t_a}{3600}$$

E_a: Energia total consumida pelos equipamentos auxiliares [kWh]
P_a: Potência elétrica total dos equipamentos auxiliares [kW]
t_a: Tempo de operação do trem [s]
P_{am} : Potência elétrica por carro tipo locomotiva [kWh]
n_m: número de carros tipo locomotiva
t : Potência elétrica por carro tipo vagão [kWh]
n_t: número de carros tipo vagão

ENERGIA REGENERATIVA NA FRENAGEM

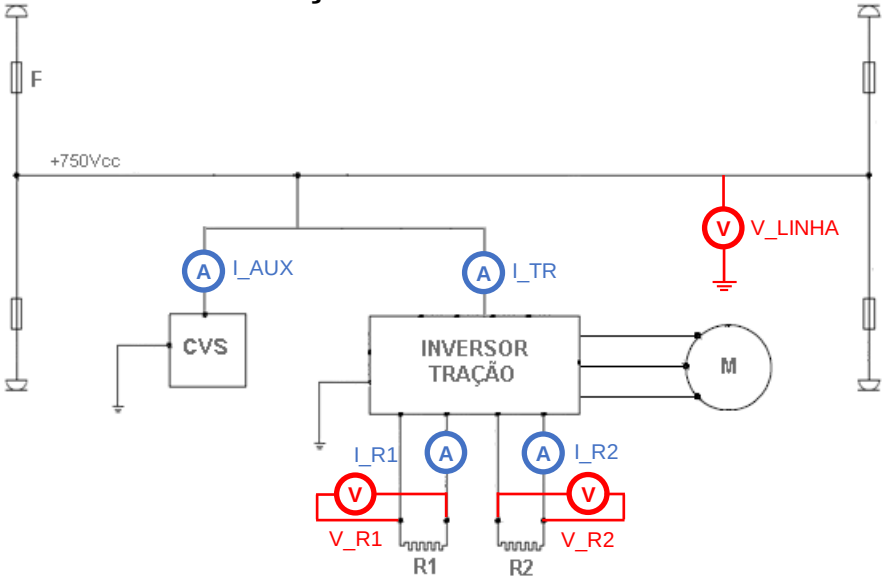
$$B_T = B_e + B_f$$

$$P_r = \frac{1}{3{,}6} \cdot B_e \cdot v \cdot \eta_B$$

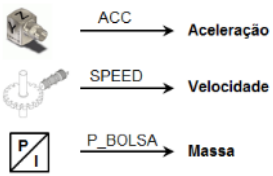
B_T: Esforço de frenagem total [kN]
B_e: Esforço de frenagem elétrico - regenerativo [kN]
B_f: Esforço de frenagem por atrito [kN]
η_B : Eficiência da sistema regenerativo
P_r: Potência elétrica do sistema regenerativo [kW]

METODOLOGIA

INSTRUMENTAÇÃO



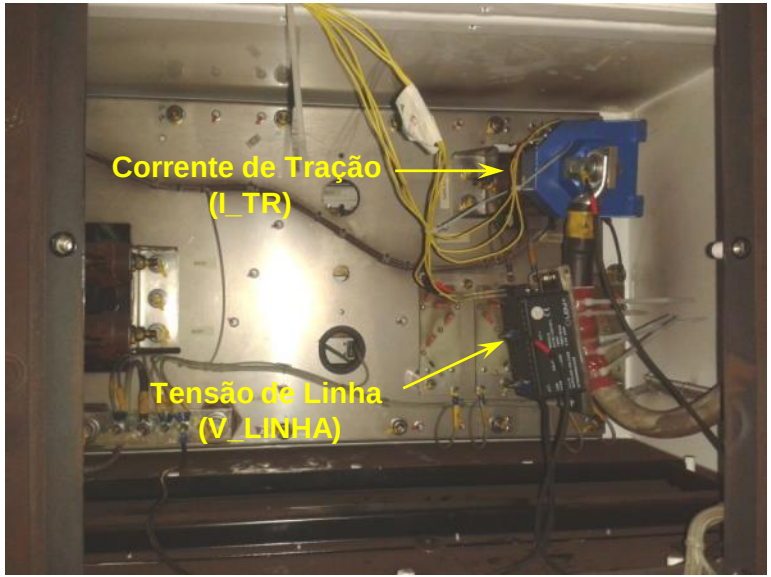
Registrador de Dados

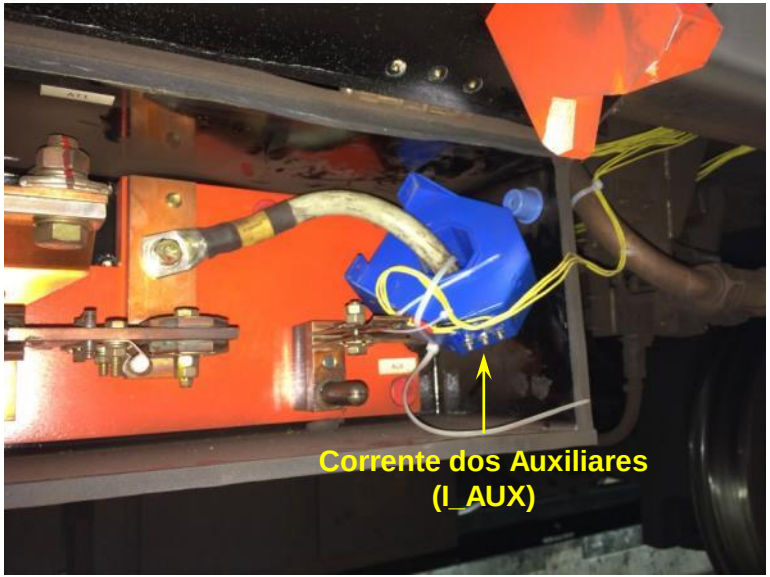


SPEED [Km/h]: Velocidade do trem
ACC [m/s²]: Aceleração do trem
V_LINHA [V]: Tensão de Entrada no Carro
I_TR [A]: Corrente de Tração do Carro
I_AUX [A]: Corrente do Sistema Auxiliar do Carro
VR1...VR4 [A]: Tensão nos Resistores de Frenagem
IR1...IR4 [A]: Corrente nos Resistores de Frenagem
P_Bolsa [PSI]: Pressão de Bolsa

METODOLOGIA

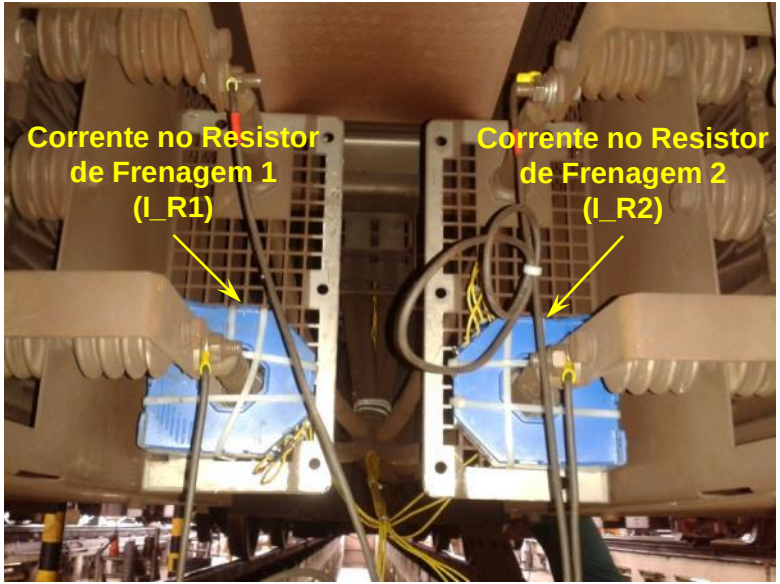
INSTRUMENTAÇÃO

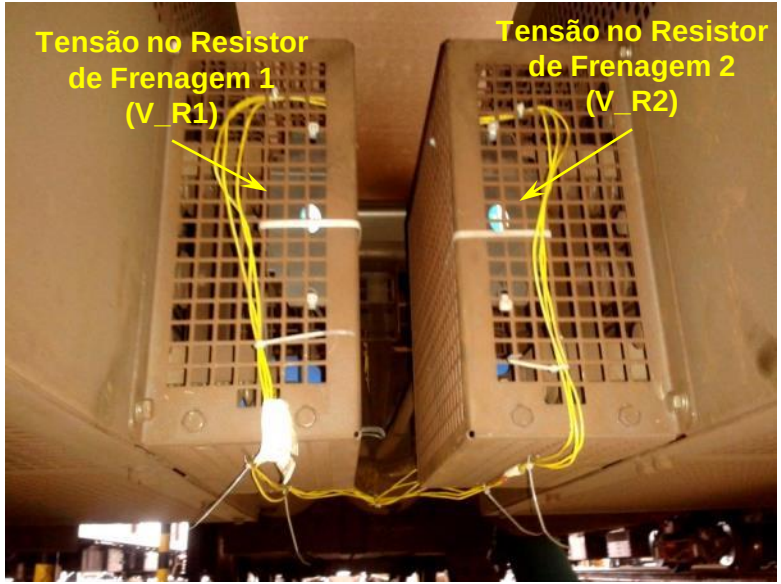




METODOLOGIA

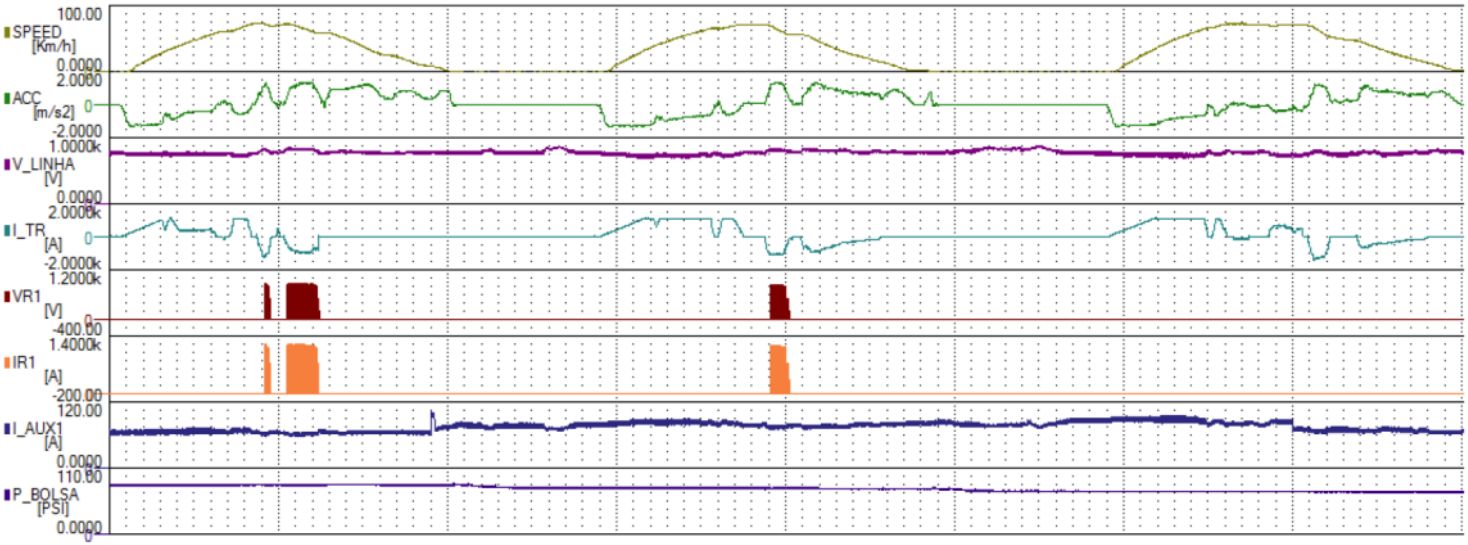
INSTRUMENTAÇÃO





METODOLOGIA

Registro dos sinais:



METODOLOGIA

Equações Utilizadas:

ENERGIA TOTAL USADA NA TRAÇÃO (+)

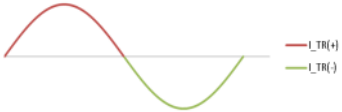
$$E_TR(+) = 6 \times \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \cdot \int V_LINHA \times I_TR(+) \times dt$$

ENERGIA DEVOLVIDA PELA TRAÇÃO (FREIO REGENERATIVO) (-)

$$E_TR(-) = 6 \times \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \cdot \int V_LINHA \times I_TR(-) \times (-1) \times dt$$

ENERGIA CONSUMIDA NA TRAÇÃO

$$E_TR = E_TR(+) - E_TR(-)$$



ENERGIA DISSIPADA NOS RESISTORES DE FRENAGEM

$$E_R = 6 \times \sum_{1}^{n} \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \cdot \int V_R_n \times I_R_n \times dt$$

ENERGIA CONSUMIDA PELOS SISTEMAS AUXILIARES

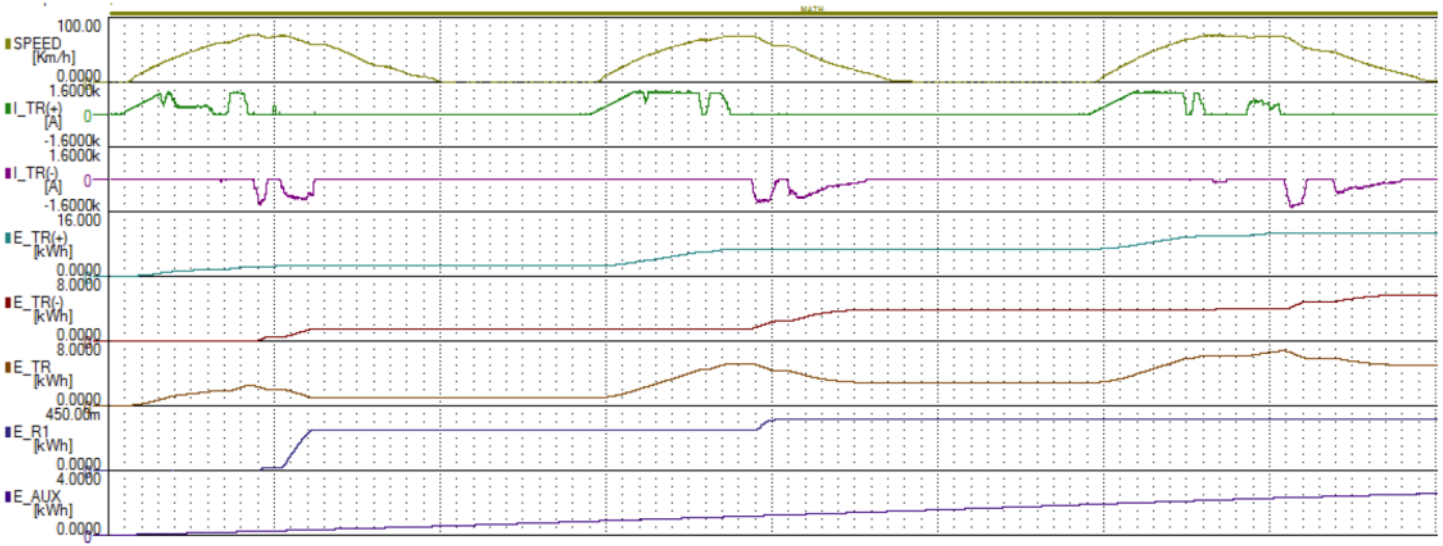
$$E_AUX = 4 \times \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \cdot \int V_LINHA \times I_AUX \times dt$$

MASSA DO CARRO

$$Massa = \frac{1}{10^3} \cdot (m \cdot P_Bolsa + b)$$

METODOLOGIA

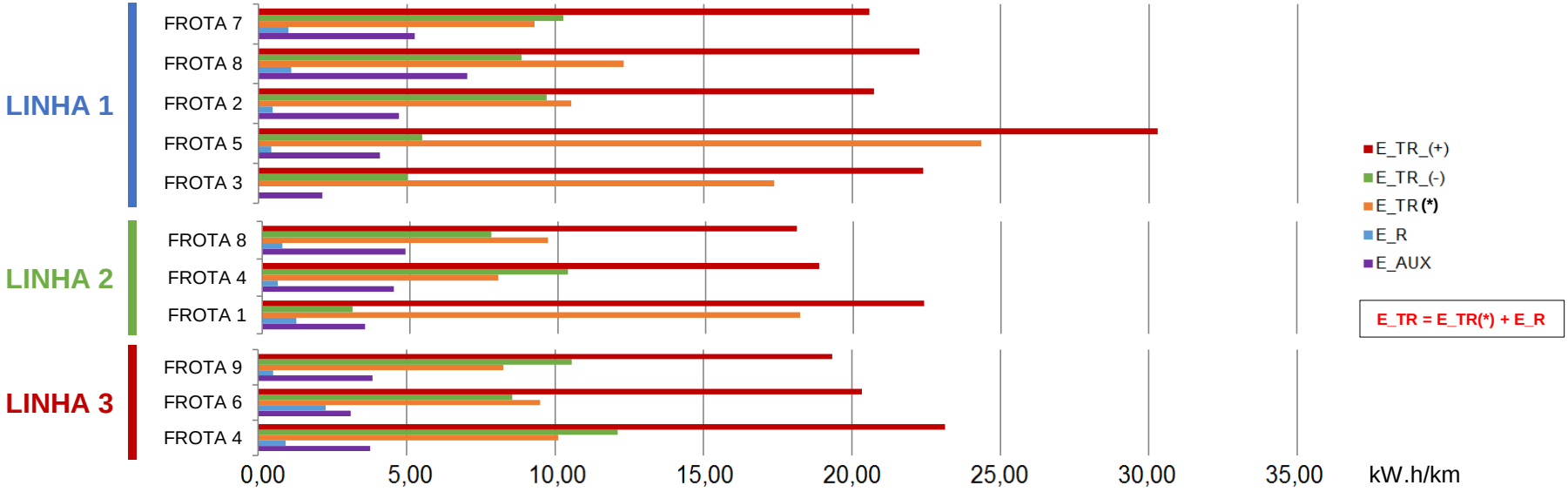
Dados calculados:



22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária 2016
DESENVOLVIMENTO INVESTIR AVANCAR

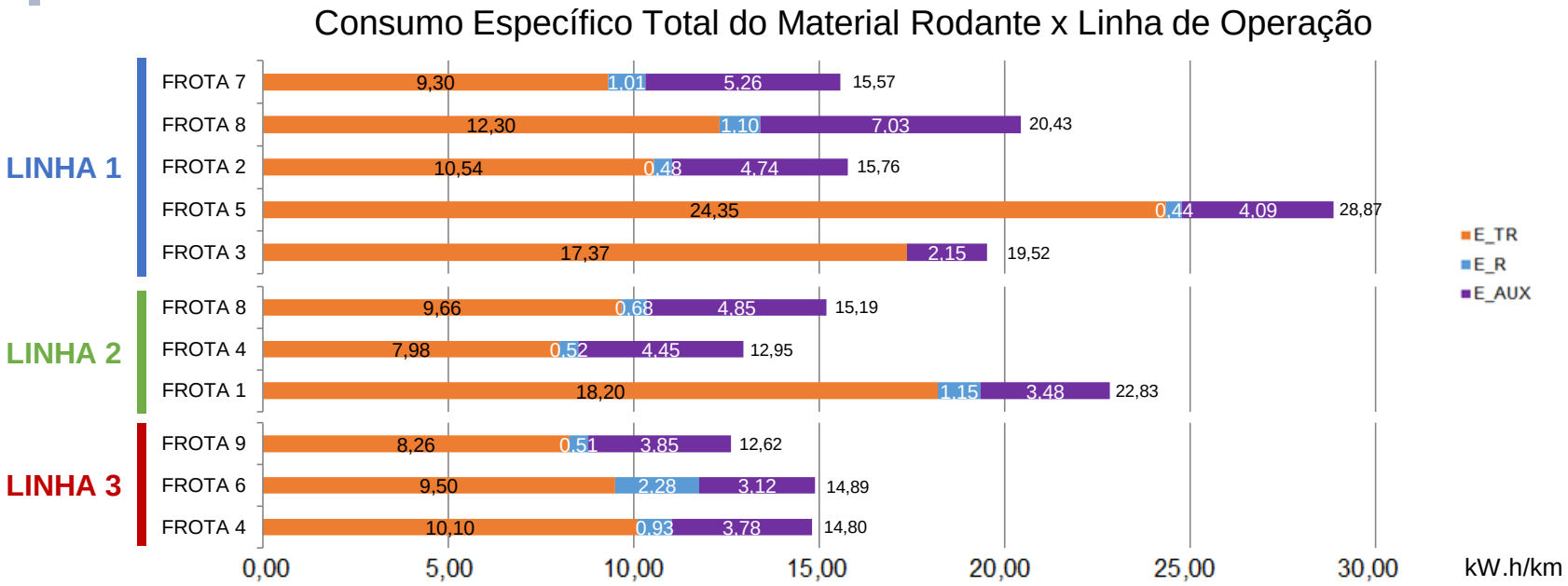
RESULTADOS

Consumo Específico Estratificado do Material Rodante x Linha de Operação



22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária 2016
DESENVOLVIMENTO INVESTIR AVANÇAR

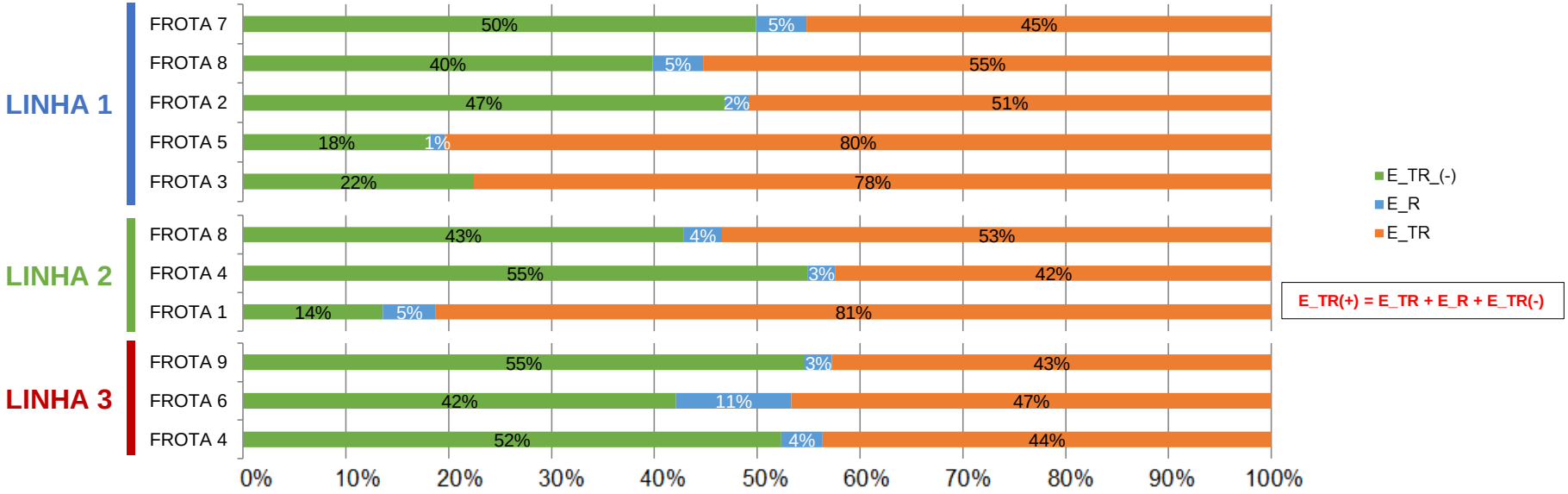
RESULTADOS



22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária 2016
DESENVOLVIMENTO INVESTIR AVANÇAR

RESULTADOS

Estratificação da Energia de Tração do Material Rodante x Linha de Operação



DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Linha 1 - Azul:

- Nota-se uma uniformidade no consumo de energia entre os trens das frotas 2 e 7;
- As frotas 3 e 8 apresentam consumos totais similares, porém com grande diferença entre a energia consumida pela tração e pelos sistemas auxiliares;
- A frota 5 apresenta o maior consumo absoluto, o que se deve em grande parte à tração.

Linha 2 - Verde:

- As frotas 4 e 8 apresentam resultados similares nos sistemas auxiliares com ligeira economia do sistema de tração na frota 4;
- A frota 1 apresenta o maior consumo absoluto, o que se deve em grande à tração.

Linha 3 - Vermelha:

- As frotas na Linha 3 apresentam consumos mais homogêneos, sendo a linha em que os trens apresentam o menos consumo especifico de energia.
- As frotas 4 e 8 apresentam todos os resultados similares, enquanto a frota 9 se mostra mais econômica de todas as analisadas.

Resistores de Frenagem:

- A energia dissipada nos resistores de frenagem, em todas as frotas e linhas, é da ordem de **5% da energia de tração ETR (+)**, com exceção da frota 6 que apresentou 11%.

OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Fatores	Estratégias	Economia de Energia [%]
Tempo de Viagem	Otimização do POT (Programa de Oferta de Trens)	3.5
Massa do trem	10% de redução	7
Inclinação da via	Otimização do perfil da via	2
Máximo Esforço Trativo	Aumento de 10%	3
Máximo Esforço Frenante	Aumento de 5%	1.5
Freio Regenerativo	Instalação de Sistemas de Armazenamento de Energia	15
Freio Regenerativo	Otimização do POT (Programa de Oferta de Trens)	11
Resistência ao Movimento	Redução de 15%	3

FONTE: S. T. T. W. Y. Su, "Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro System Using an Optimal Train Control Simulation Model," 2016.

CONCLUSÃO

O consumo especifico médio de energia de cada frota por linha está apresentado nas tabelas abaixo:

LINHA 1

Frota	3	5	2	8	7
Consumo [kW.h/km]	19,52	28,87	15,76	20,43	15,57

LINHA 2

Frota	1	4	8
Consumo [kW.h/km]	22,83	12,95	15,19

LINHA 3

Frota	4	6	9
Consumo [kW.h/km]	14,80	14,89	12,62

Os resultados do estudo reforçam a preponderância das seguintes variáveis no consumo de energia:

- Velocidade máxima atingida pelo trem;
- Altimetria da via;
- Interferências operacionais (batidas de ATP);
- Massa do trem (carregamento).

CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO

- Desenvolver uma metodologia para a medição de energia do material rodante;
- Oferecer dados para aprimorar a eficiência energética dos trens do METRÔ-SP (Ex.: Redução da energia dissipada nos resistores de frenagem);
- Subsidiar a Gerência de Operações nas estratégias operacionais (Ex.: Priorizar a utilização de frotas mais econômicas);
- Estabelecer critérios de aceitação de novos trens baseados na eficiência energética do material rodante (Ex.: Elaboração de especificações técnicas);

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem:

- **Gerência de Operações** (GOP) pela facilitação das medições durante a operação comercial;

- **Departamento de Material Rodante** (MTR) da Gerência de Manutenção, em suas Coordenações do Pátio Jabaquara (MRN), Pátio Tamanduateí (MRV) e Pátio Itaquera (MRL), pela colaboração para a realização dos testes, em especial na instrumentação e testes dos trens.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – ESTUDO COMPARATIVO DO CONSUMO DE ENERGIA DO MATERIAL RODANTE NAS FROTAS DA COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – METRÔ-SP

Paulo Sérgio Siqueira de Carvalho
psscarvalho@metrosp.com.br

22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária

22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária 2016

AEAMESP

3º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS