3º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA3

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

INTRODUÇÃO

O modal de transporte 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 Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô-SP consumiu 550.000 MWh para a operação de sua rede (Cia. do Metropolitano de São Paulo - METRÔ-SP, 2014, p. 72), representando um de seus principais custos operacionais. Esta energia equivale ao consumo de aproximadamente trezentos mil domicílios (Empresa de Pesquisa Energética, 2014, p. 85).

Do ponto de vista do impacto ambiental para a operação do sistema, em 2014, foram emitidas 56 mil toneladas de CO2 equivalente (tCO2e) em decorrência do consumo de energia elétrica para tração dos trens em 2014. Contudo, foram evitadas emissões de 875 mil toneladas em CO2e com a transferência de usuários de automóveis e ônibus para o sistema, obtendo um balanço líquido de emissões evitadas de 819 mil tCO2e (Cia. do Metropolitano de São Paulo - METRÔ-SP, 2014, p. 75).

Aumentos substanciais nos preços da energia e preocupações com a pegada ambiental representam os principais elementos motivadores para estudos objetivando maior eficiência energética nos modais de transporte.

Em face deste cenário, em 2014 o Metrô-SP estabeleceu sua Política de Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética – POL 10-200, definindo diretrizes básicas de arquitetura, sistemas e material rodante, relativas a fontes alternativas de energia e eficiência energética para as novas linhas do Metrô de São Paulo e para atualização/modernização das linhas existentes (Cia. do Metropolitano de São Paulo - METRÔ-SP, 2014, p. 73).

Figura 1: Distribuição de energia consumida em Sistemas de Metro – Fonte (Su, 2016)

Dentre as cargas de um sistema de Metrô, o sistema de tração dos trens representa a maior parcela do consumo de energia em sistemas de transporte metroviários, seguido por ventilação e ar-condicionado, elevadores, iluminação, drenagem e outros (Su, 2016, p. 2). Ainda segundo os autores, os sistemas auxiliares do trem tem preponderância no consumo, representando 20% do total, maior que perdas na frenagem (17%), resistência ao movimento (16%), motores (8%), transmissão (4%) e inversores (2%). Do total da energia

33% pode ser regenerada pelo trem durante as frenagens (freio regenerativo), podendo ser aproveitada pelos sistemas auxiliares do próprio trem ou devolvida para a linha (Railenergy, 2006) apud (Su, 2016, p. 2).

Estudos na área de eficiência energética no transporte metroviário tem elevada relevância econômica e ambiental, produzindo benefícios aos Operadores de Metrô, ao Sistema Elétrico, ao cidadão e ao meio ambiente.

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 para 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.

REFERENCIAL TEÓRICO

Modelo do Movimento do trem

O movimento no sentido longitudinal pode ser modelado pelo movimento do ponto material com um grau de liberdade (Pires, 2002, p. 22), aplicando-se a Segunda Lei de Newton.

$$\sum F = M_e \frac{d^2x}{dt^2} \tag{1}$$

Na equação (1) $\sum F$ é a resultante das forças que atuam no trem: o esforço trativo Te, resistência ao movimento Re e o esforço de frenagem Be. A massa equivalente M_e constitui-se da massa total do trem acrescida de 2% a 30%, devido ao armazenamento de energia

cinética nas massas girantes (rodas, eixos e rotores dos motores) durante o movimento (TAVARES, 2010, p. 41).

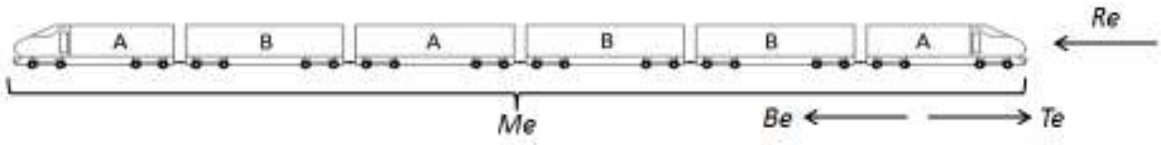


Figura 2: Diagrama de Forças do Movimento do trem

O esforço trativo ou força de tração Te, fornece a propulsão necessária para romper as resistências e acelerar o trem. As forças resistentes Re são o resultado das características do trem e da geometria da via. O esforço de frenagem Be desacelera o trem até sua parada (JONG J J, 2005, p. 357).

Da decomposição de (1) tem-se a seguinte equação (JONG J J, 2005, p. 358):

$$Te(v) - Re(v, i, \gamma) - Be(v) = Me\,\frac{dv}{dt} \tag{2}$$

$$Re(v, i, \gamma) = Rs(v) + Rr(v) + Rg(i) + Rc(\gamma) + R_t \tag{3}$$

Onde:

$Te(v)$: 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

Modelo de Energia da Tração

Wardrop (1989) (Wardrop, 1989) propôs um modelo de consumo de energia baseado na potência elétrica (4). Para o cálculo da energia E_m são necessários: a tensão de linha V, a corrente no motor Im, o número de motores em paralelo k e a razão entre o esforço de tração atual e o máximo esforço de tração r_T. Eash (1978) (R.W., 1978) e Lee (2000) (LEE, 2000) usaram este modelo em seus trabalhos, mas com diferentes abordagens para determinar a tensão e corrente nos motores (JONG, 2005, p. 280).

$$E_m = \frac{1}{3{,}6 \cdot 10^6} \cdot k \cdot V \int Im \cdot r_T \, dt \tag{4}$$

Onde:

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

Modelo de Energia dos Sistemas Auxiliares

O cálculo da energia de sistemas auxiliares do trem inclui os sistemas de controle, iluminação, ar condicionado, etc. O modelo (5) foi proposto por JONG e CHANG (2005) e assume que os sistemas funcionem de forma contínua durante todo o período analisado (JONG, 2005, p. 282).

$$E_a = \frac{P_a \cdot t_a}{3600} = \frac{(P_{am} \cdot n_m + P_{at} \cdot n_t) \cdot t_a}{3600} \tag{5}$$

Onde:

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

Modelo de Energia Regenerativa na Frenagem

Trens modernos são equipados com frenagem regenerativa. Durante a frenagem a energia cinética é convertida em elétrica. O esforço de frenagem B_Té a composição da frenagem elétrica B_e (regenerativa) e a frenagem por atrito B_f (pastilhas e discos de frenagem), conforme equação(6)(JONG, 2005, p. 283).

$$B_T = B_e + B_f \tag{6}$$

$$P_r = \frac{1}{3{,}6} \cdot B_e \cdot v \cdot \eta_B \tag{7}$$

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]

DIAGNÓSTICO

Este trabalho possui orientação experimental. Buscou-se estabelecer um padrão de comparação com base nas características específicas das frotas do Metrô-SP e sua correspondente via de operação.

Os trens instrumentados, enquanto coletavam os dados, prestaram serviço desde o inicio da comercial até o fim do horário de pico da manhã, aproximadamente das 04h30min às 10h30min.

Um trem de cada frota foi instrumentado para o registro dos seguintes sinais:

- SPEED [Km/h]: Velocidade do trem;
- A_{cc} [m/s²]: Aceleração do trem;
- P_Bolsa [PSI]: Pressão de Bolsa, sinal que representa a massa do carro;
- 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;
- V_{R1}...V_{R4} [A]: Tensão nos Resistores de Frenagem;
- I_{R1}...I_{R4} [A]: Corrente nos Resistores de Frenagem.

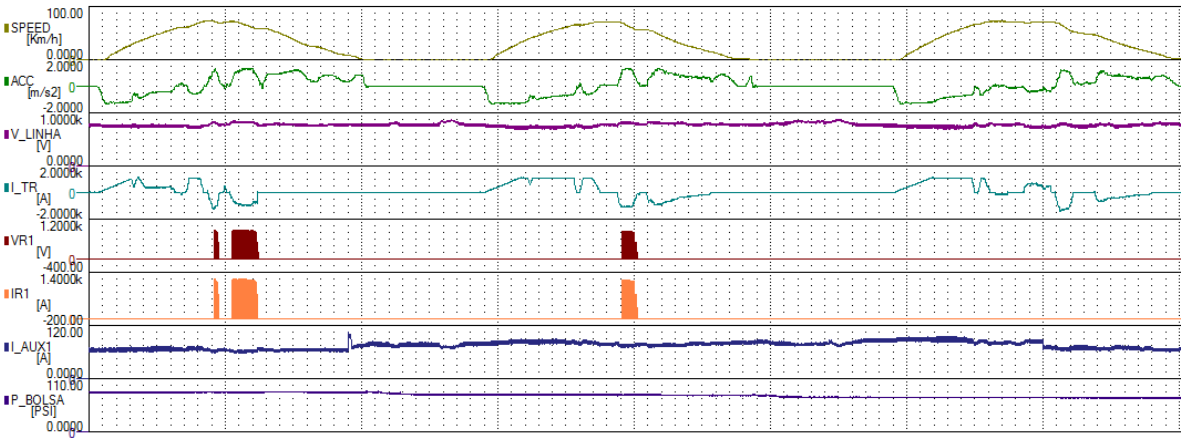


Figura 3: Registro de sinais dinâmicos do trem

Para os registros dos sinais referentes à tensão e corrente, foram utilizados transdutores especialmente para o estudo, não sendo utilizados os instrumentos de medição do próprio trem. Para cada medição os transdutores foram instalados e posteriormente retirados do

trem sob teste. Os sinais de velocidade e de aceleração foram coletados do Sistema da Controle Automático de Operação ATO e o sinal de pressão de bolsa através do Sistema de Freio. Um Oscilógrafo/ScopeCorder foi uilizado para a coleta e registro dos sinais.

No processamento dos sinais coletados e no cálculo de energia utilizou-se o software YokogawaXviewer versão 1.79 para a obtenção dos seguintes dados:

- E_TR(+) [kWh]: Energia elétrica consumida pelo Sistema de Tração;
- E_TR(-) [kWh]: Energia elétrica devolvida a linha pelo Sistema de Tração;
- E_TR [kWh]: Energia elétrica efetivamente consumida pelo Sistema de Tração;
- E_AUX [kWh]: Energia elétrica consumida pelos Sistemas Auxiliares;
- E_RE [kWh]: Energia elétrica consumida nos Resistores de Frenagem;
- Peso [T]: Peso do carro;
- I_TR(+) [A]: Corrente de tração positiva, corrente que entra na tração;
- I_TR(-) [A]: Corrente de tração negativa, corrente que sai da tração, na frenagem regenerativa.

A decomposição da corrente de tração (positiva e negativa), conforme ilustrado na Figura 4, foi necessária para calcular a energia elétrica consumida pelo trem E_TR(+)e a energia regenerativa devolvida para o terceiro trilho E_TR(-).

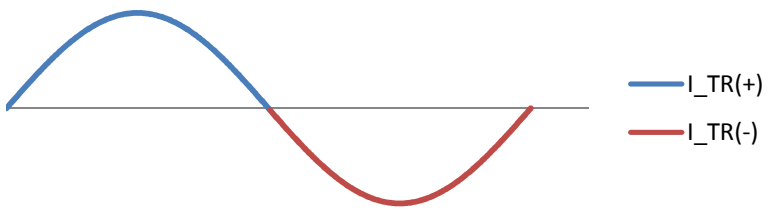


Figura 4 - Decomposição de I_TR em I_TR(+) e I_TR(-)

CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA DE TRAÇÃO

A energia elétrica consumida pelo sistema de tração de um carro é definida pela seguinte equação:

$$E_TR(+)_{CARRO} = \int U_{\text{Linha}} \times I_TR(+) \times dt \qquad \text{[W.s]} \qquad (8)$$

Para expressar o resultado em kW.h dividiu a equação (8) por 3,6 x 106:

$$E_{TR(+)_{CARRO}} = \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \cdot \int U_{\text{Linha}} \cdot I_TR(+) \; dt \qquad \text{[kW.h]} \qquad (9)$$

Cada trem possui seis carros, desta forma, para obter a energia consumida pelo sistema de tração de todo o trem, multiplicou-se a equação (9) por seis:

$$E_TR(+)_{TREM} = 6 \cdot E_TR(+)_{CARRO} \qquad \text{[kW.h]} \qquad (10)$$

CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA REGENERATIVA

A energia elétrica regenerativa, ou seja, a energia cinética que é transformada em elétrica pelo sistema de tração durante as frenagens de um carro é definida pela seguinte equação:

$$E_TR(-)_{CARRO} = \int U_{\text{Linha}} \cdot (-1) \cdot I_TR(-)\, dt \qquad \text{[W.s]} \qquad (11)$$

Para obter o resultado em kW.h dividiu a equação (11) por 3,6 x 10^6:

$$\text{E_TR}(-)_{\text{CARRO}} = \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \int \text{U}_{\text{Linha}} \cdot (-1) \cdot \text{I_TR}(-)\, \text{dt} \qquad \text{[kW.h]} \qquad (12)$$

Cada trem possui seis carros, desta forma, para obter a energia consumida pelo sistema de tração de todo o trem, multiplicou-se a equação (12) por seis:

$$E_TR(-)_{TREM} = 6 \cdot E_TR(-)_{CARRO} \qquad \text{[kW.h]} \qquad (13)$$

CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA TOTAL DO SISTEMA DE TRAÇÃO

A energia elétrica efetivamente consumida pelo sistema de tração de todo o trem pode ser expressa pela seguinte equação:

$$E_TR_{TREM} = E_TR(+)_{TREM} - E_TR(-)_{TREM} \qquad \text{[kW.h]} \qquad (14)$$

CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELOS SISTEMAS AUXILIARES

O cálculo da energia elétrica consumida pelos sistemas auxiliares varia de frota para frota. Isso ocorre devido ao fato das cargas elétricas não serem igualmente distribuídas entre os inversores auxiliares.

Nas equações abaixo estão as equações para o cálculo da energia elétrica dos sistemas auxiliares de uma das frotas.

Os carros dos trens são divididos conforme ilustrado na Figura 5, sendo que somente os carros B possuem o conversor auxiliar e alimentam as cargas elétricas tanto dos carros A como dos carros B.

Figura 5 - distribuição típica das cargas elétricas entre os carros

Desta forma, a energia elétrica consumida pelos sistemas auxiliares pode ser definida pela equação (15).

$$E_AUX_{TREM} = 4 \times E_AUX_{CARROB} \qquad \text{[kW.h]} \qquad (15)$$

Onde E_AUX é a integral da tensão de entrada do trem multiplicada pela corrente consumida pelos sistemas auxiliares do carro B no tempo:

$$E_AUX_{CARROB} = \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \int U_{\text{Linha}} \cdot I_{AUX2}\, dt \qquad \text{[kW.h]} \qquad (16)$$

CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA DESTINADA AOS RESISTORES DE FRENAGEM

A energia elétrica destinada aos resistores de frenagem em um carro é definida pela seguinte equação:

$$E_R_{CARRO} = \sum_{1}^{n} E_R1 + E_R2 + \ldots + E_Rn \qquad \text{[kW.h]} \qquad (17)$$

Onde n é igual ao número de resistores de frenagem por carro, que varia para cada frota.

A energia consumida em cada resistor de frenagem é expressa pela equação (18).

$$E_Rn = \frac{1}{3{,}6 \times 10^6} \int U_{\mathrm{Rn}} \cdot I_{Rn}\, dt \qquad \text{[kW.h]} \qquad (18)$$

Cada trem possui seis carros, desta forma, para obter a energia destinada aos resistores de frenagem de todo o trem, multiplicou-se a equação (19) por seis:

$$E_R_{TREM} = 6 \cdot E_R_{CARRO} \qquad \text{[kW.h]} \qquad (19)$$

CÁLCULO DO PESO DE UM CARRO

Durante os testes, foram coletados os valores de pressão de bolsa dos trens. Sabendo-se que a pressão de bolsa possui um comportamento linear, foi possível utilizar a equação da reta:

$$y = mx + b \qquad (20)$$

Conhecendo-se os valores máximos e mínimos da relação Pressão de Bolsa x Peso do carro, determinou-se o coeficiente angular (m) da reta:

$$m = \frac{y_{Pressão\ Máxima} - y_{Pressão\ Mínima}}{x_{Pressão\ Máxima} - x_{Pressão\ Mínima}} \qquad (21)$$

Posteriormente determinou-se o valor do coeficiente linear (b):

$$y_{Pressão\ Máxima} = m(x_{Pressão\ Máxima}) + b \qquad (22)$$

Com os valores dos coeficientes angular e linear conhecidos, aplicou-se a equação (20), onde x representa a pressão de bolsa e o y o valor do peso do carro. Por fim dividiu-se a equação por 1000 para obter o resultado em toneladas:

$$Peso_{CARRO} = \frac{(m \cdot Pressão\ de\ Bolsa + b)}{10^3} \qquad [T] \qquad (23)$$

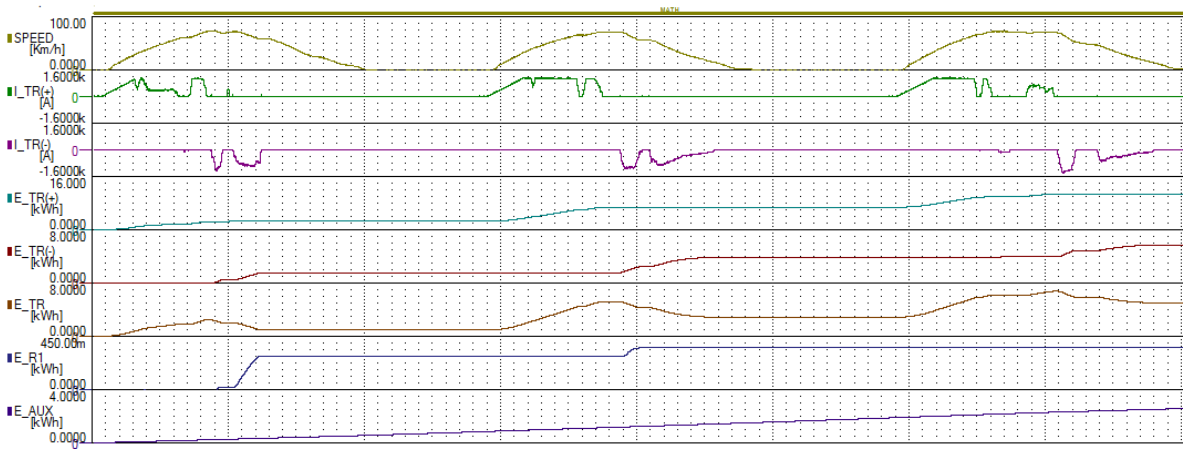


Figura 6: Registros da velocidade, Corrente de tração decomposta (posit. e negativ.), e energias de tração e auxiliares

CÁLCULO PERCENTUAL DA RAZÃO ENTRE A ENERGIA DOS RESISTORES DE FRENAGEM E A ENERGIA TOTAL DO TREM

Para determinar a representatividade da energia consumida nos resistores de frenagem durante a frenagem em relação ao consumo total de energia elétrica do trem, utilizou-se a seguinte equação:

$$\%E_TR = \frac{E_R_{TREM}}{(E_TR_{TREM} + E_AUX_{TREM})} \qquad [\%] \qquad (24)$$

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE ENERGIA x LINHA OPERACIONAL

Os dados coletados nos testes foram processados e as energias calculadas conforme metodologia descrita na seção anterior do presente trabalho. Uma síntese dos resultados

está apresentada abaixo, sendo classificados em função das linhas em que a frota opera: 1 - Azul, 2 - Verde e 3 - Vermelha.

LINHA 1 - AZUL

Tabela 1: Consumo de Energia do trem da Frota 3 nas vias 1 e 2

Trem da Frota 3	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Total
Desloc [m]	39,198.22	39,198.22	39,198.22	117,594.66
Média Peso[T]	38.71	42.09	39.90	40.23
E_TR[kw.h]	636.22	738.11	668.06	2,042.39
E_AUX[kw.h]	87.64	86.08	79.28	253.00
E_Total [kW.h]	723.85	824.19	747.34	2,295.39
Consumo [kw.h/km]	18.47	21.03	19.07	**19.52**

Tabela 2: Consumo de Energia do trem da Frota 5 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 5	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Total
Desloc [m]	20,187.97	40,381.89	29,389.81	40,381.89	130,341.56
Média Peso[T]	41.11	41.76	42.38	42.74	42.00
E_TR[kw.h]	446.75	901.44	779.15	1,102.97	3,230.32
E_AUX[kw.h]	26.68	49.76	36.99	58.57	172.00
E_Total [kW.h]	531.56	1,061.98	893.21	1,276.04	3,762.80
Consumo [kw.h/km]	26.33	26.30	30.39	31.60	**28.87**

Tabela 3: Consumo de Energia do trem da Frota 2 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 2	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Total
Desloc [m]	38,014.58	38,206.75	32,762.42	38,207.93	147,191.68
Média Peso[T]	40.03	42.71	48.15	42.72	43.40
E_TR[kw.h]	394.56	415.87	422.34	389.81	1,622.59
E_AUX[kw.h]	135.17	151.67	196.40	214.31	697.56
E_Total [kW.h]	529.73	567.55	618.74	604.12	2,320.14
Consumo [kw.h/km]	13.93	14.85	18.89	15.81	**15.76**

Tabela 4: Consumo de Energia do trem da Frota 8 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 8	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Total
Desloc [m]	37,024.29	32,587.89	39,198.22	38,101.35	146,911.76
Média Peso[T]	40.64	45.69	44.99	41.13	43.11
E_TR[kw.h]	499.76	410.80	559.18	499.31	1,969.05
E_AUX[kw.h]	192.30	211.19	276.05	352.63	1,032.17
E_Total [kW.h]	692.06	621.99	835.23	851.93	3,001.22
Consumo [kw.h/km]	18.69	19.09	21.31	22.36	**20.43**

Tabela 5: Consumo de Energia do trem da Frota 7 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 7	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Total
Desloc [m]	36,158.35	34,146.78	34,937.27	37,216.43	142,458.83
Média Peso[T]	42.19	47.38	48.08	44.77	45.60
E_TR[kw.h]	351.20	377.45	363.78	376.87	1,469.31
E_AUX[kw.h]	155.26	207.44	188.07	198.10	748.87
E_Total [kW.h]	506.47	584.89	551.85	574.97	2,218.18
Consumo [kw.h/km]	14.01	17.13	15.80	15.45	**15.57**

LINHA 2 - VERDE

Tabela 6: Consumo de Energia do trem da Frota 1 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 1	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Totais
Desloc [m]	26,481.32	29,400.17	29,400.17	23,123.77	108,405.43
Média Peso[T]	39.23	42.18	45.56	51.16	44.53
E_TR[kw.h]	466.86	493.73	567.64	569.01	2,097.25
E_AUX[kw.h]	86.77	95.66	90.42	104.49	377.34
E_Total [kW.h]	553.63	589.40	658.06	673.50	2,474.58
Consumo [kw.h/km]	20.91	20.05	22.38	29.13	**22.83**

Tabela 7: Consumo de Energia do trem da Frota 4 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 4	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Total
Desloc [m]	29,400.17	29,400.17	29,400.17	29,400.17	117,600.69
Média Peso[T]	43.63	45.38	47.03	45.16	45.30
E_TR[kw.h]	231.30	259.23	281.12	228.34	999.99
E_AUX[kw.h]	116.91	129.95	133.71	142.64	523.21
E_Total [kW.h]	348.21	389.18	414.84	370.97	1,523.20
Consumo [kw.h/km]	11.84	13.24	14.11	12.62	**12.95**

Tabela 8: Consumo de Energia do trem da Frota 8 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 8	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Total
Desloc [m]	24,992.72	23,652.65	26,693.98	25,357.40	100,696.74
Média Peso[T]	37.77	40.68	43.09	43.22	41.19
E_TR[kw.h]	244.63	217.11	306.54	273.33	1,041.60
E_AUX[kw.h]	95.91	101.00	156.03	135.44	488.38
E_Total [kW.h]	340.54	318.11	462.57	408.77	1,529.98
Consumo [kw.h/km]	13.63	13.45	17.33	16.12	**15.19**

LINHA 3 - VERMELHA

Tabela 9: Consumo de Energia do trem da Frota 4 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 4	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Total
Desloc [m]	44,092.55	44,092.55	36,087.92	124,273.02
Média Peso[T]	45.67	50.84	45.35	47.29
E_TR[kw.h]	453.60	509.14	407.51	1,370.25
E_AUX[kw.h]	154.50	186.59	128.23	469.33
E_Total [kW.h]	608.10	695.74	535.74	1,839.58
Consumo [kw.h/km]	13.79	15.78	14.85	14.80

Tabela 10: Consumo de Energia do trem da Frota 6 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 6	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Totais
Desloc [m]	41,095.80	44,092.55	44,092.55	44,092.55	173,373.44
Média Peso[T]	44.25	52.04	49.54	50.28	49.03
E_TR[kw.h]	407.04	506.44	585.95	541.19	2,040.62
E_AUX[kw.h]	88.37	103.50	168.10	180.13	540.09
E_Total [kW.h]	495.41	609.93	754.06	721.32	2,580.71
Consumo [kw.h/km]	12.05	13.83	17.10	16.36	14.89

Tabela 11: Consumo de Energia do trem da Frota 9 nas Vias 1 e 2

Trem da Frota 9	Volta#1	Volta#2	Volta#3	Volta#4	Total
Desloc [m]	44,092.55	44,092.55	44,092.55	44,092.55	176,370.19
Média Peso[T]	41.25	45.29	-	-	43.27
E_TR[kw.h]	386.93	407.19	392.15	360.93	1,547.20
E_AUX[kw.h]	134.43	158.90	226.51	158.62	678.46
E_Total [kW.h]	521.36	566.09	618.65	519.55	2,225.65
Consumo [kw.h/km]	11.82	12.84	14.03	11.78	12.62

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram realizadas medições de consumo de energia nas nove frotas de trens que operam nas linhas 1 - Azul, 2 - Verde e 3 - Vermelha da Cia. Do Metropolitano de São Paulo.

Limitações de equipamentos e de recursos humanos restringiram o período analisado entre o vale da manhã e o pico da manhã, aproximadamente entre 04h30min e 10h30min, durante dias úteis. Este período permitiu que fossem coletadas, em média, quatro viagens completas (ida e volta) de cada frota, que foi nosso tamanho da amostra.

Alguns efeitos devem ser considerados para a análise dos resultados em função da limitação do período:

- Buscou-se uma amostra representativa da condição operacional real dos trens para a avaliação de consumo de energia. Por esta razão foram realizadas as medições com carregamento máximo (pico) e mínimo (vale) de um dia útil típico. Não foram realizadas medições aos finais de semana onde o carregamento é menor (menor consumo de energia), porém como o número de trens na via também é reduzido, a tensão de linha tende a ser maior desfavorecendo a regeneração de energia do trem durante as frenagens (mais freio reostático) e consequentemente aumentando o consumo. Em termos práticos existe um aumento do consumo de energia específico (por km rodado) aos fins de semana e feriados em função da redução do Programa de Oferta de Trens POT.

- Deve-se considerar o efeito do carregamento e sentido do fluxo de usuários (centro bairro ou bairro centro) e a geometria da via (principalmente a inclinação). Por exemplo, na Linha 1 - Azul, entre Jabaquara e Tucuruvi (via 1), sentido majoritário de fluxo de usuários nas manhãs, a via possui uma variação de altitude de -39,0 metros, o que reduz o consumo de energia em relação ao seu retorno na via 2.
- As interferências operacionais podem influenciar fortemente o consumo de energia. Por exemplo, quando há retenção de um trem por mais tempo que o programado em uma estação devido a uma obstrução de portas. Neste caso não só naquele trem, mas também em outros que estejam próximos há influência na velocidade média, taxa de aceleração e consumo dos trens.

COMPARAÇÃO ENTRE FROTAS DA LINHA 1 - AZUL

Na linha 1 - Azul operam os trens das frotas 2, 3, 5, 7 e 8. Sendo o trem da frota 7 o mais econômico, com 15,57 kWh/km, em oposição ao trem da frota 5 que consumiu 28,87 kWh/km. Na **Tabela 12** estão o consumo específico de cada frota e uma comparação percentual entre elas.

Tabela 12: Comparativo do consumo médio de energia das frotas da Linha 1 – Azul [kWh/km]

[kW.h/km]		Frota 3	Frota 5	Frota 2	Frota 8	Frota 7
19.52	Frota 3	-	-32.39%	23.83%	-4.45%	25.36%
28.87	Frota 5	47.90%	-	83.15%	41.31%	85.40%
15.76	Frota 2	-19.25%	-45.40%	-	-22.84%	1.23%
20.43	Frota 8	4.66%	-29.24%	29.60%	-	31.20%
15.57	Frota 7	-20.23%	-46.06%	-1.22%	-23.78%	-
	[kW.h/km]	19.52	28.87	15.76	20.43	15.57

COMPARAÇÃO ENTRE FROTAS DA LINHA 2 - VERDE

Na linha 2 - Verde operam os trens das frotas 1, 4 e 8. Sendo o trem da frota 4 o mais econômico, com 12,95 kWh/km, em oposição ao trem da frota 5 que consumiu 22,83 kWh/km. Na **Tabela 13** está apresentado o consumo específico de cada frota e uma comparação percentual entre elas.

Tabela 13: Comparativo do consumo médio de energia das frotas da Linha 2 – Verde [kWh/km]

[kW.h/km]		Frota 1	Frota 4	Frota 8
22.83	Frota 1	-	76.24%	50.24%
12.95	Frota 4	-43.26%	-	-14.75%
15.19	Frota 8	-33.44%	17.31%	-
	[kW.h/km]	22.83	12.95	15.19

COMPARAÇÃO ENTRE FROTAS DA LINHA 3 - VERMELHA

Na linha 3 - Vermelha operam os trens das frotas 4, 6 e 9. Sendo o trem da frota 9 o mais econômico, com 12,62 kWh/km, em oposição ao trem da frota 5 que consumiu 14,89 kWh/km. Na **Tabela 14** está apresentado o consumo específico de cada frota e uma comparação percentual entre elas.

Tabela 14: Comparativo do consumo médio de energia das frotas da Linha 3 - Vermelha [kWh/km]

[kW.h/km]		Frota 4	Frota 6	Frota 9
14.80	Frota 4	-	-0.55%	17.30%
14.89	Frota 6	0.56%	-	17.96%
12.62	Frota 9	-14.75%	-15.22%	-
	[kW.h/km]	14.80	14.89	12.62

CONCLUSÕES

A principal contribuição deste estudo foi apresentar uma metodologia para a medição do consumo de energia do material rodante dos trens do METRÔ-SP em condições reais de operação comercial e estabelecer um padrão de comparação da eficiência energética entre as frotas.

São muitos os campos que podem fazer uso dos resultados qualitativos de presente trabalho. A estratégia operacional poderá se beneficiar dos resultados para propor alterações na composição de trens de forma a priorizar a operação dos trens mais econômicos. Na aquisição de novos trens, a especificação técnica poderá contemplar

parâmetros de eficiência energética, para uma operação mais barata e com menor impacto ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Material Rodante da Gerência de Manutenção, em suas Coordenações do Pátio Jabaquara, Pátio Tamanduateí e Pátio Itaquera, pela colaboração para a realização dos testes, em especial na instrumentação e testes dos trens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Cia. do Metropolitano de São Paulo - METRÔ-SP, “Relatório de Sustentabilidade,” São Paulo, 2014.

[2] Empresa de Pesquisa Energética, “Consumo de Energia no Brasil,” Rio de Janeiro, 2014.

[3] Railenergy, “Innovative Integrated Energy Efficiency Solutions for Railway Rolling Stock.,” 2006.

[4] S. T. T. W. Y. Su, “Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Comsumption of Metro System Using an Optimal Train Control Simulation Model,” 2016.

[5] C. L. Pires, “Simulação de Marcha de Composição Ferroviária Acionada por Motores de Indução e PWM,” Dissertação - USP, São Paulo, 2002.

[6] A. D. F. A. F. O. J. O. M. B. Y. B. TAVARES, “Um Estudo sobre a Frenagem Regenerativa de Trens Utilizando Gerador Linear de Indução,” em Automática, Bonito - MS, 2010.

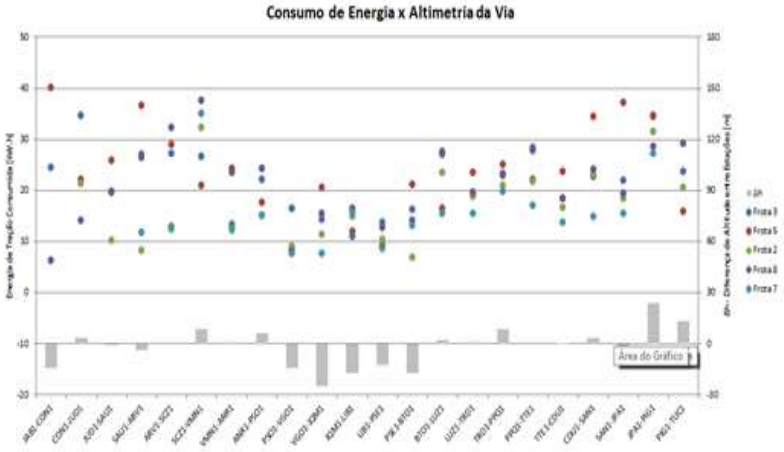
[7] C. S. JONG J J, “Algorithms for Generating Train Speed Profiles,” Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 6, pp. 356-371, 2005.

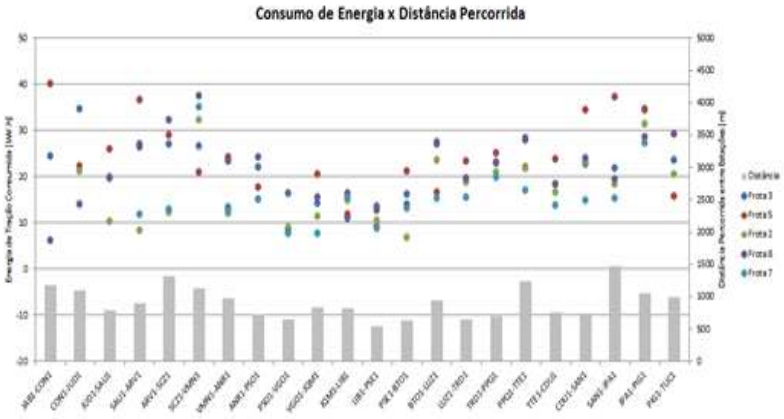
[8] J. C. C. E. JONG, “Models for Estimating Energy Comsumption of Electric Trains,” Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 6, pp. 278-291, 2005.

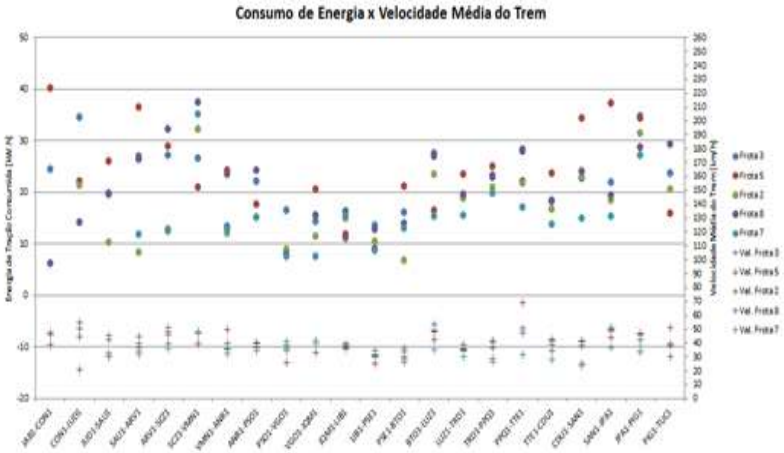
ANEXOS

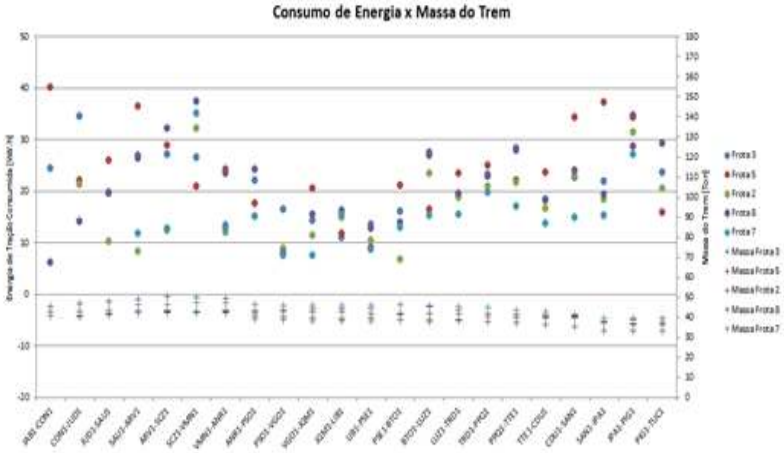
Energia de Tração E_TR[kWh]

Linha 1 – Azul (via 1)



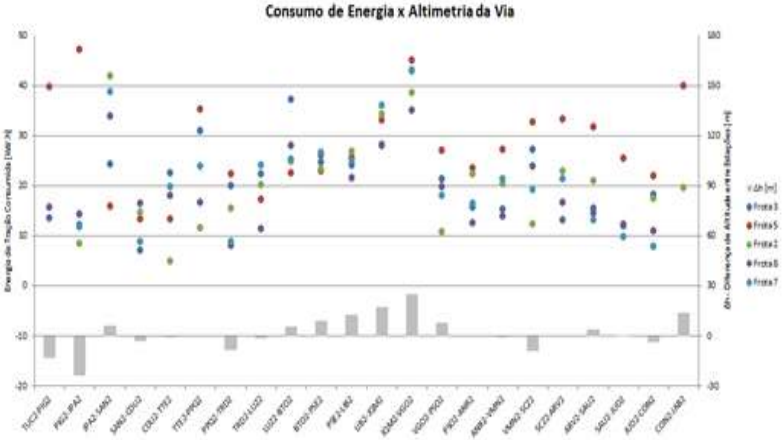


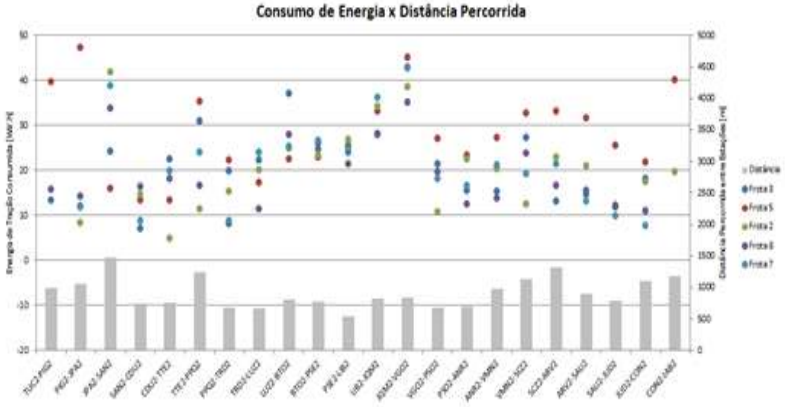


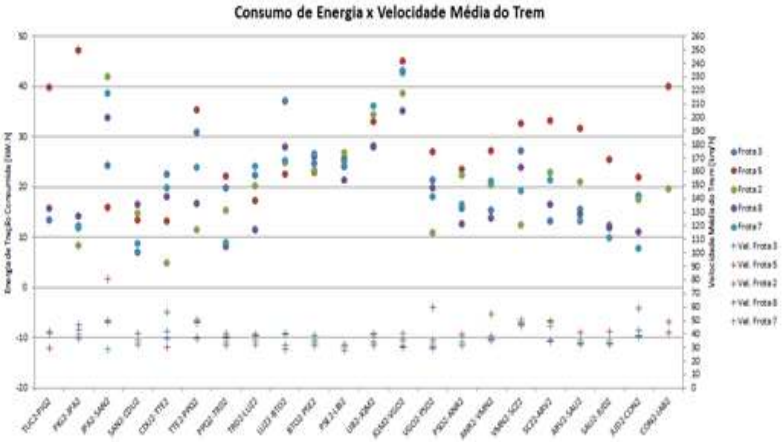


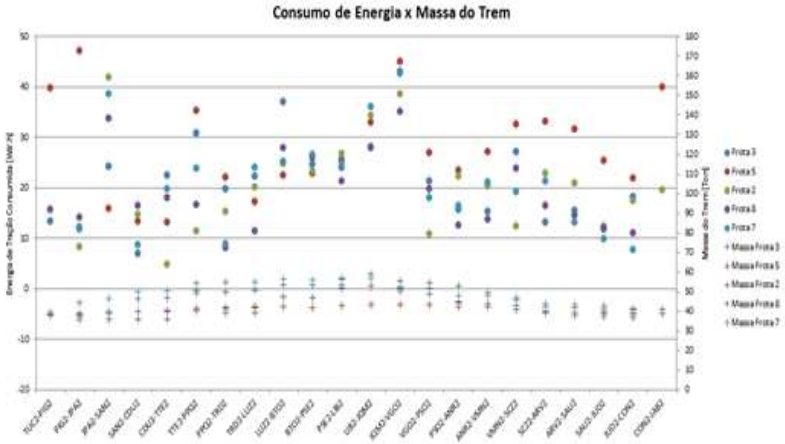
Energia de Tração E_TR[kWh]

Linha 1 – Azul (via 2)



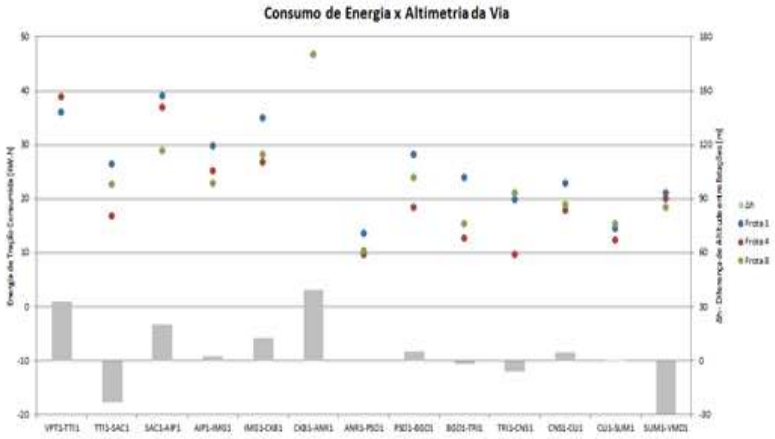


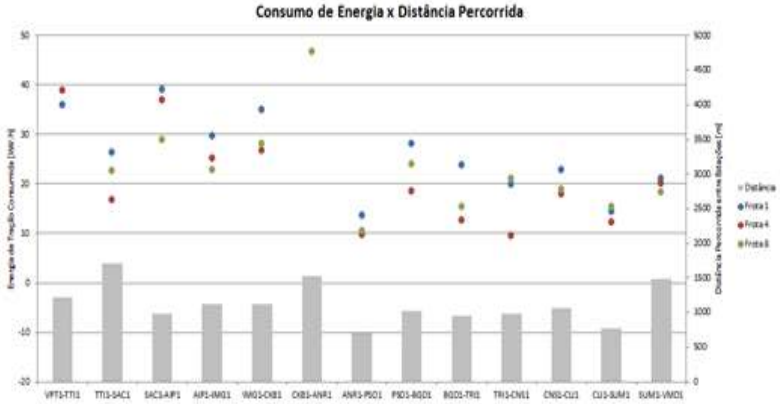


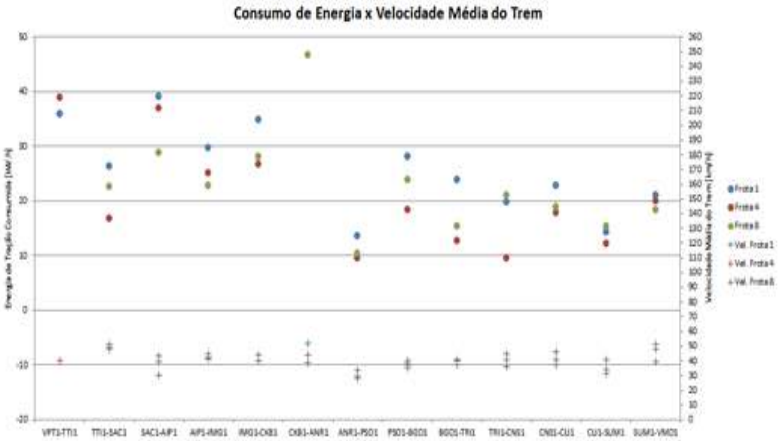


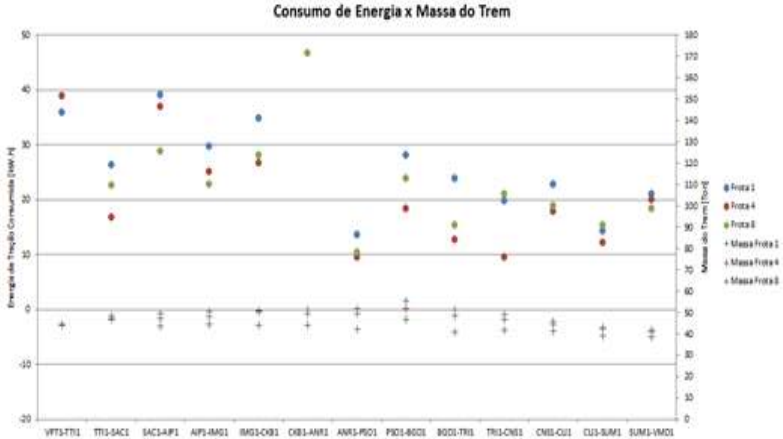
Energia de Tração E_TR[kWh]

Linha 2 – Verde (via 1)



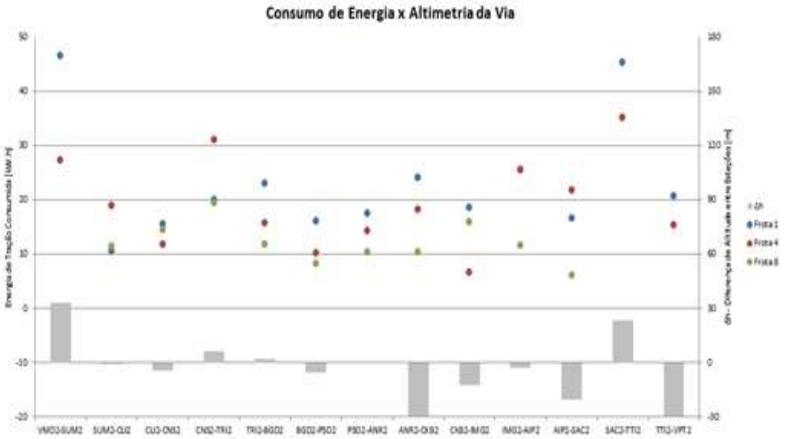


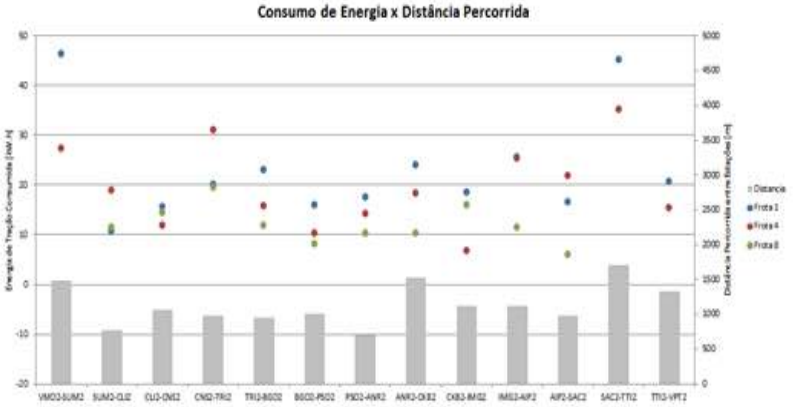


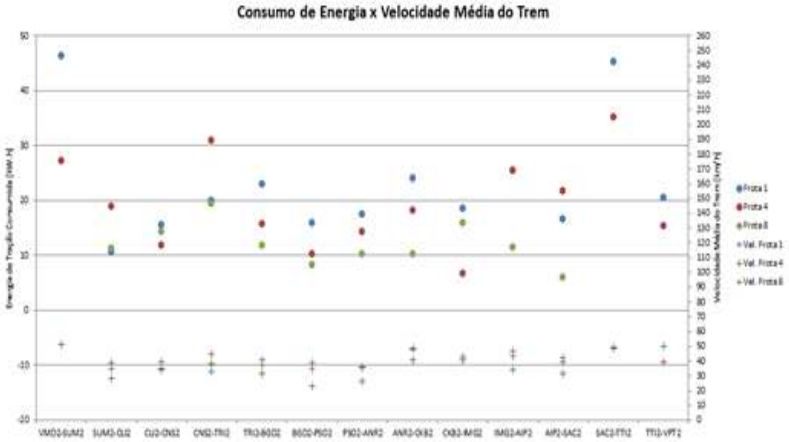


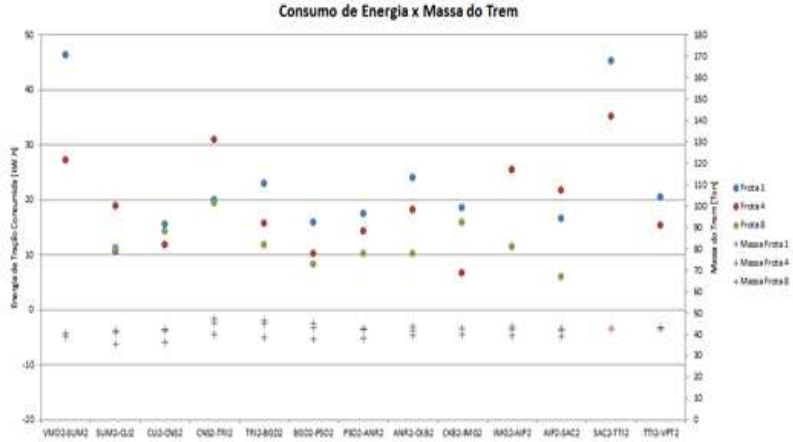
Energia de Tração E_TR[kWh]

Linha 2 – Verde (via 2)



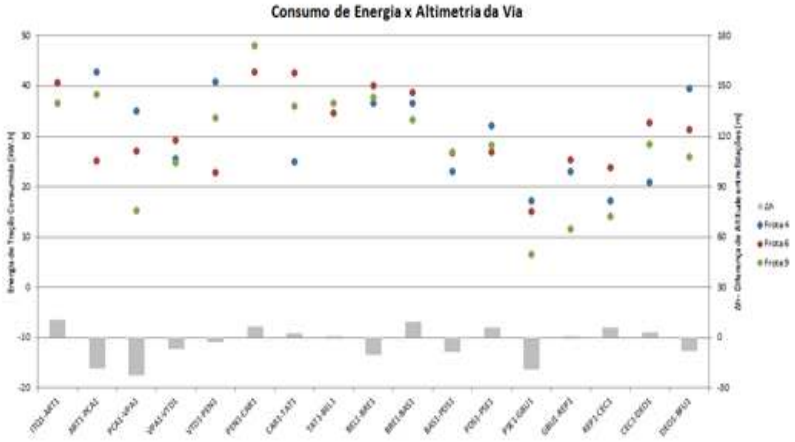


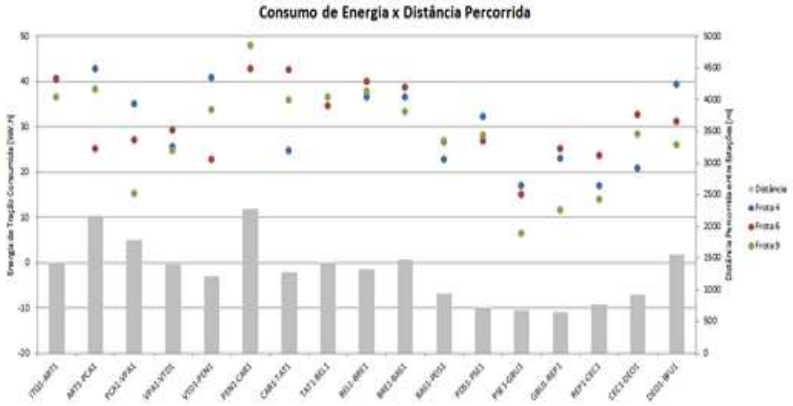


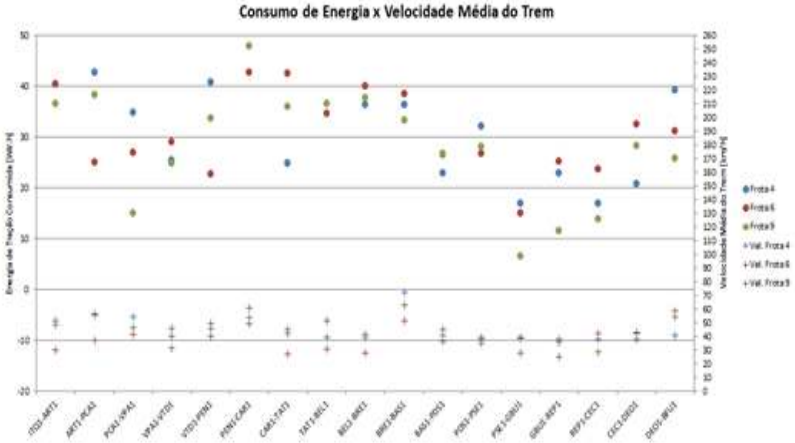


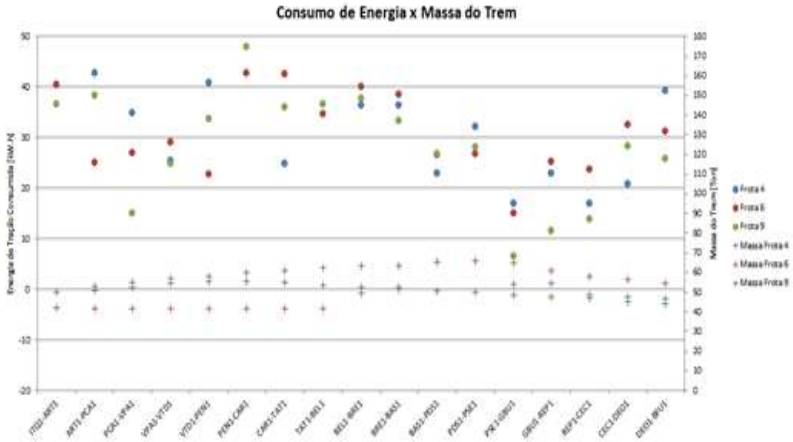
Energia de Tração E_TR[kWh]

Linha 3 – Vermelha (via 1)



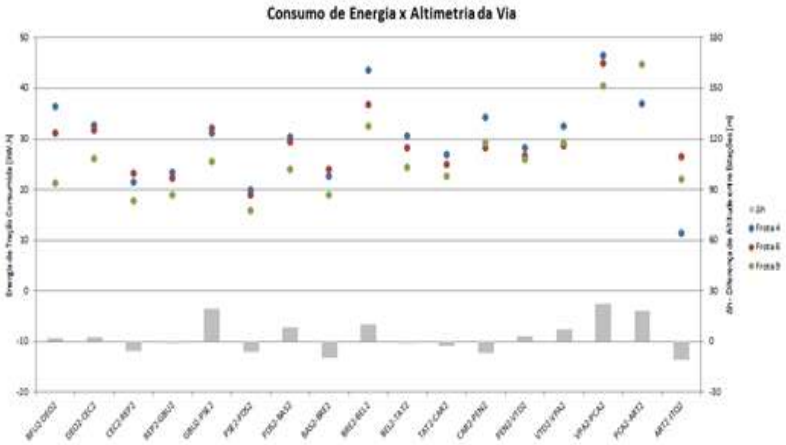


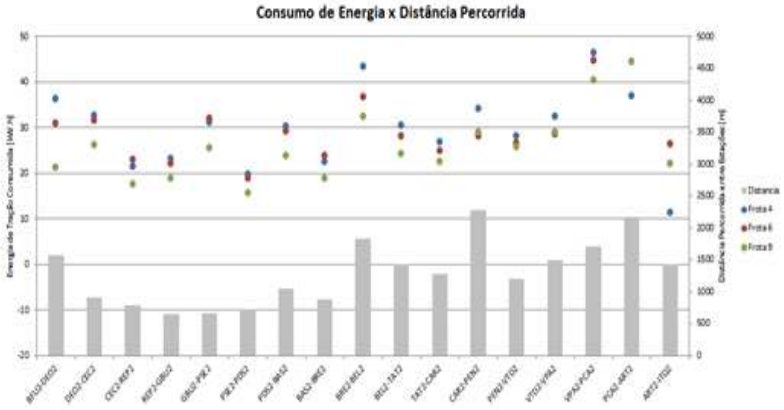


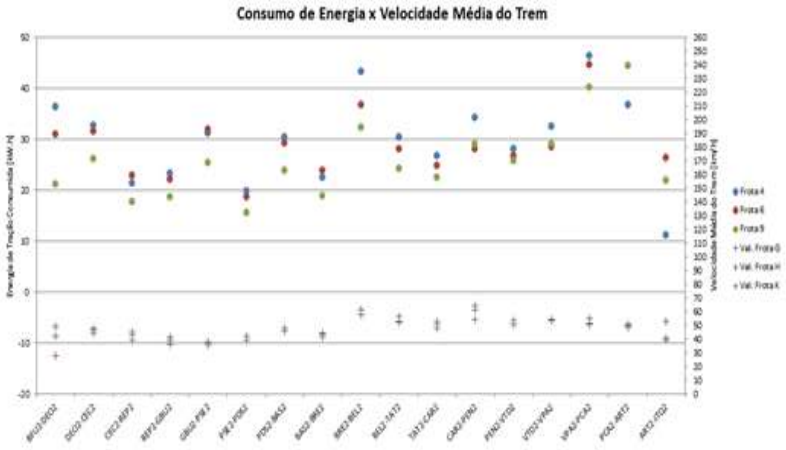


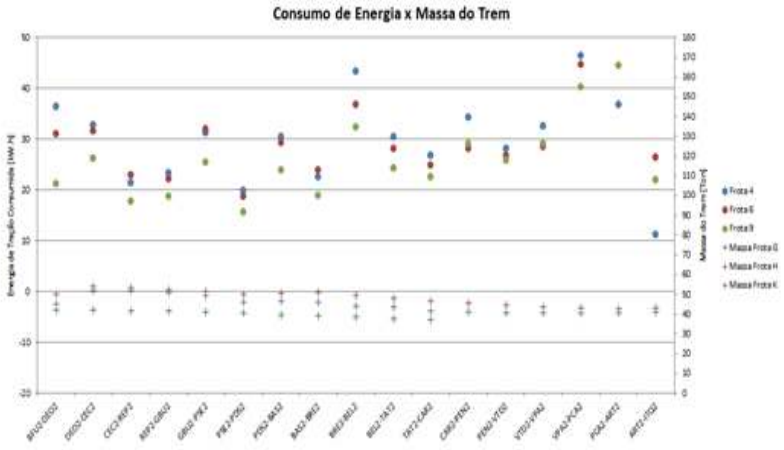
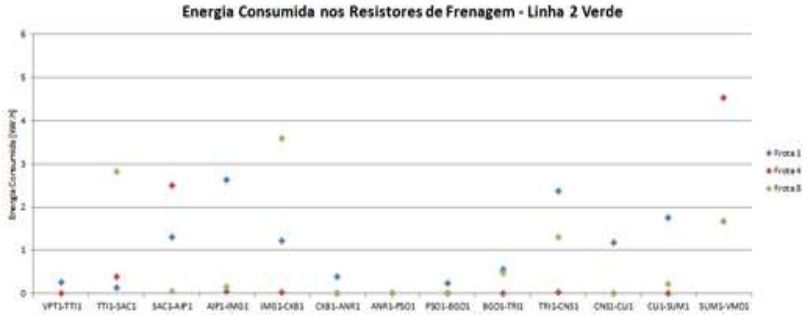
Energia de Tração E_TR[kWh]

Linha 3 – Vermelha (via 2)









Energia Resistores de Frenagem E_R[kWh]