

Análise estatística do perfil de consumo energético de um trem metropolitano

Davi Martins Lamas Vital

Geomar Machado Martins

Tiago Augusto Furlan

José Henrique Hinkel

21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

AEAMESP



TRABALHO FINALISTA



PRÊMIO
TECNOLOGIA &
DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS
2015



ESTE TRABALHO FOI SELECIONADO COMO FINALISTA NA EDIÇÃO DE 2015



Sumário

- Introdução
- Justificativa
- Objetivos
- Metodologia Proposta
- Resultados
- Conclusões
- Bibliografia



Introdução

- A sustentabilidade da mobilidade em áreas urbanas e os sistemas de transporte eficientes

(EE pelo PNEF: ações de diversas naturezas que culminam na redução [...] atender as demandas da sociedade por serviços de energia sob a forma de luz, calor/frio, acionamento, transporte e uso em processos. Objetiva [...] atender às necessidades da economia com menor uso de energia primária e, portanto, menor impacto na natureza. [...]. As ações [...] compreendem modificações ou aperfeiçoamentos tecnológicos ao longo da cadeia, mas podem também resultar de uma melhor organização, conservação e gestão energética por parte das entidades que a compõem. Devem ser privilegiadas todas as ações que, na margem, tenham um custo inferior ao necessário para suprir a energia economizada.)

- Energia gasta com transportes corresponde a 33% de toda a energia gerada no mundo, sendo que 85% desta energia é de origem fóssil
- Modal ferroviário possui custo por passageiro.km muito inferior a sistemas rodoviários => solução interessante

(Martinis e Gallo, 2013)



Introdução

- Brasil possui frota muito diversificada - Frota de 70 e 80 consome mais energia (tecnologia de tração: motores CC e frenagem reostática)
- Atualmente há motores CA, frenagem regenerativa e regulação da operação
- Há potencial de economias pelo uso de tecnologias atualizadas



Justificativa

- Sistemas ferroviários urbanos representam cerca de 0,5% do consumo de energia elétrica do Brasil
- A maioria dos trens urbanos brasileiros é antiga, e consome cerca de 30% mais energia que trens fabricados atualmente
- A conta de energia elétrica é um custo operacional significativo para as empresas operadoras (no RJ, vale 25,5%) (AMORA, 2014)



Justificativa

- O tema tem sido tratado muitas vezes objetivando uso de novos equipamentos. No entanto, a perícia dos operadores também é fator importante. Leite (2009)
- Estudos na forma de condução já foram feitos com sucesso em trens de carga Barbosa (1993), Pereira (2009), Leite (2009) e de passageiros Bocharnikov et al (2007), Ramos et al (2004), Domínguez et al (2012), Martinis e Gallo (2013), Ríos e Garcia (2010)
- MME deseja reduzir em 10% a demanda de energia elétrica entre 2010 e 2030. Leonelli (2010)



Objetivos

Objetivo geral

Analisar de perfil de consumo de energia elétrica de tração em uma frota de trens metropolitanos de passageiros em uma empresa brasileira

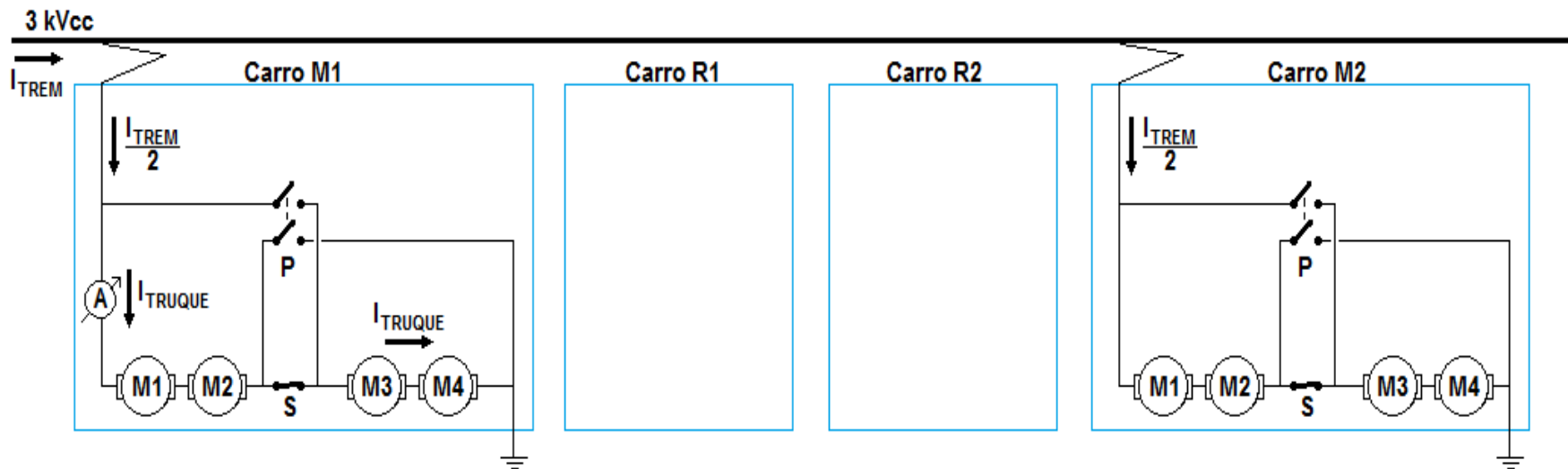
Objetivo específico

- Avaliar o consumo energético de uma viagem entre um terminal e o outro;
- Avaliar o consumo energético de uma viagem entre cada duas estações;
- Comparar o consumo energético de uma viagem no horário de pico com uma viagem no horário de vale;
- Quantificar a energia gasta com tração e a energia que poderia ser recuperada na frenagem se o trem tivesse frenagem regenerativa.



Metodologia

Um trem típico do estilo construído nas décadas de 70 e 80 é instrumentado



$$I_{TREM} = 2 \cdot I_{TRUQUE} \cdot (P + 1)$$

$$E [kWh] = \frac{\bar{V}}{3600 \cdot 1000} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{TREM} (t) \cdot dt$$

$$E_{TRACÃO} [kWh] = \frac{\bar{V}}{3600 \cdot 1000} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{TRACÃO} (t) \cdot dt$$

$$E_{FRENAGEM} [kWh] = \frac{\bar{V}}{3600 \cdot 1000} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{FRENAGEM} (t) \cdot dt$$

Metodologia

Será analisado como se repetem estes consumos por trecho nas diversas viagens realizadas e então será calculado:

- O consumo energético médio por trecho e o desvio padrão;
- O consumo energético máximo e mínimo por trecho;
- O consumo energético máximo calculado pela soma das amostragens com maior valor de cada trecho;
- O consumo energético mínimo calculado pela soma das amostragens com maior valor de cada trecho;
- A correlação entre tempo de percurso e energia consumida para percorrer cada trecho.



Metodologia

Dois registradores foram utilizados:

R1:

Horário [hh:mm:ss,sss] (analógica)

Distância (analógica)

Velocidade (analógica)

Abertura de portas (digital)

Solicitação de freio (digital)

R2:

Horário [hh:mm:ss,sss] (analógica)

Distância (analógica)

Velocidade (analógica)

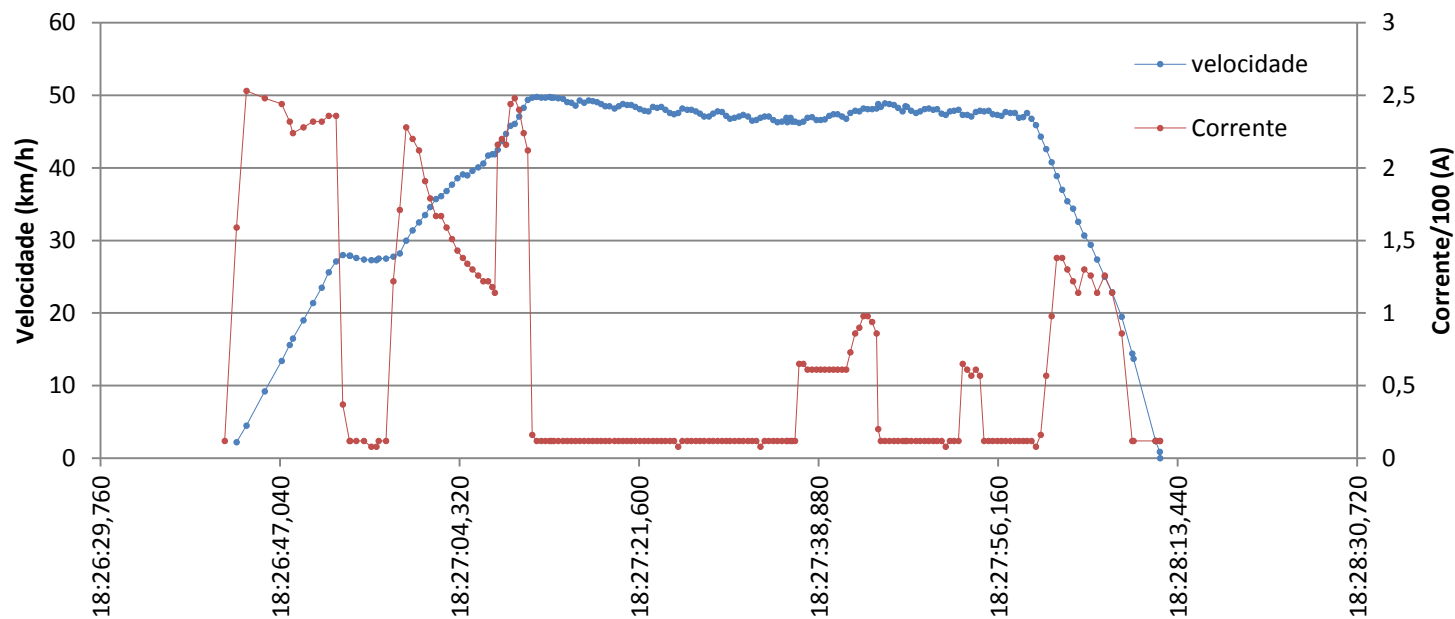
Corrente em um motor (analógica)

Chave P (digital)



Resultados

Exemplo de sinal antes do tratamento:



Resultado

Viagens realizadas

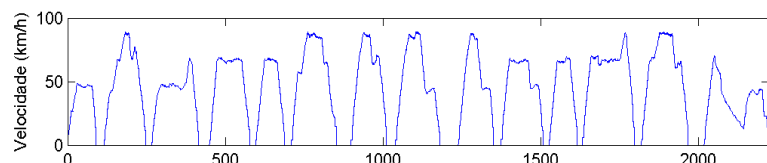
Viagem	Origem		Destino		Período
	Estação	Hora	Estação	Hora	
1	A	18:25	O	19:03	Pico
2	O	07:08	A	07:48	Pico
3	A	07:50	O	08:25	Pico
4	O	08:38	A	17:04	Vale
5	A	17:11	O	17:50	Pico
6	O	17:55	A	18:34	Pico
7	A	18:37	O	19:19	Pico
8	D	05:07	A	05:15	Vale
9	A	05:20	V	06:15	Vale
10	V	06:20	A	07:17	Pico
11	A	07:20	V	08:13	Pico
12	V	08:15	A	09:11	Pico



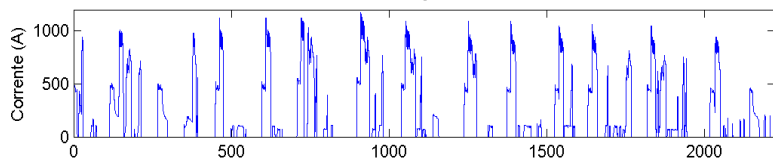
Resultados

Viagem 1

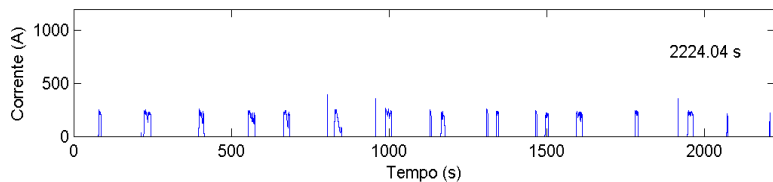
Viagem 1 Trecho AO às 18:26



Corrente de Tração => 365 kWh



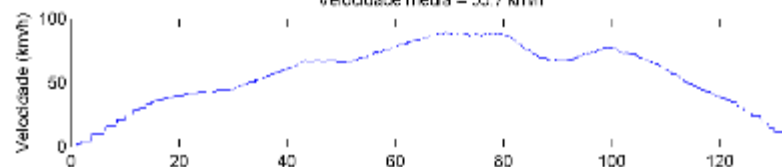
Corrente de Frenagem => 40.5 kWh



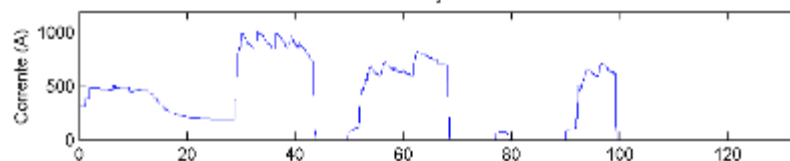
Trecho BC da viagem 1

Viagem 1 Trecho BC às 16:28

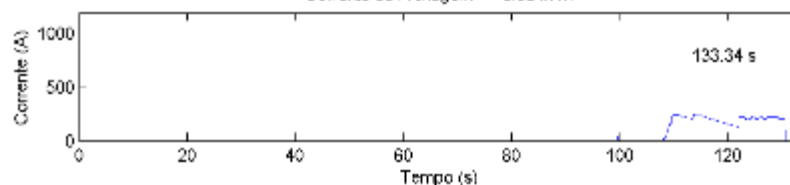
Velocidade média = 55.7 km/h



Corrente de Tração => 34.4 kWh



Corrente de Frenagem => 3.98 kWh



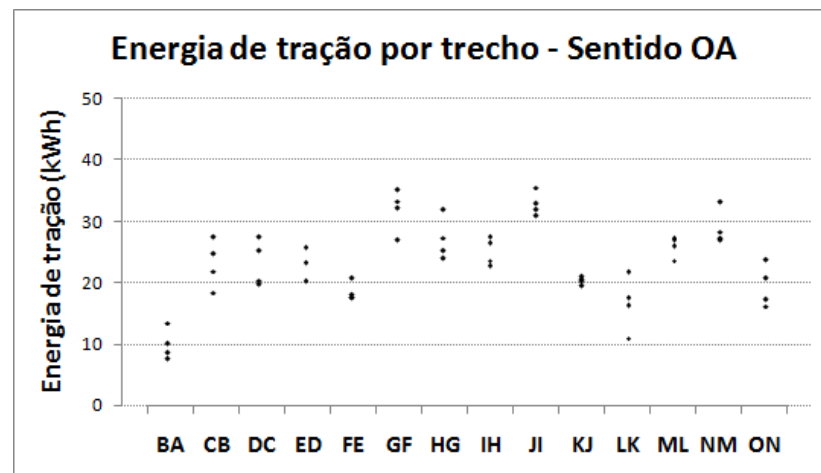
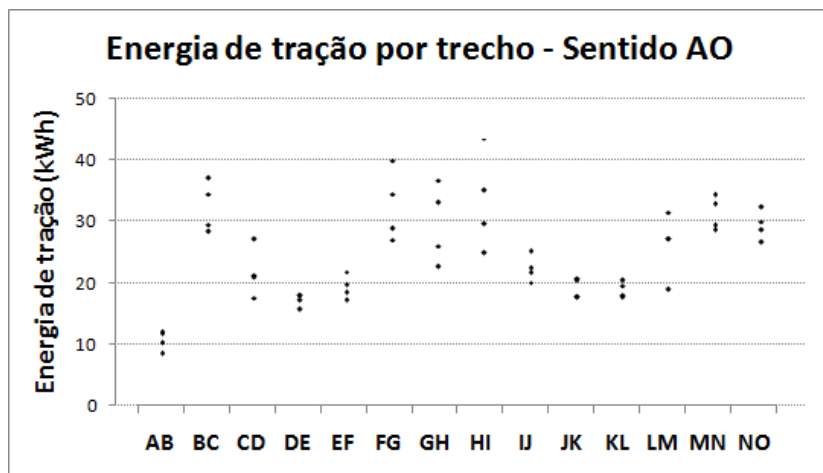
Matlab => energia de tração, energia de frenagem, tempo, velocidade média

Resultados

Comparação entre pico e vale

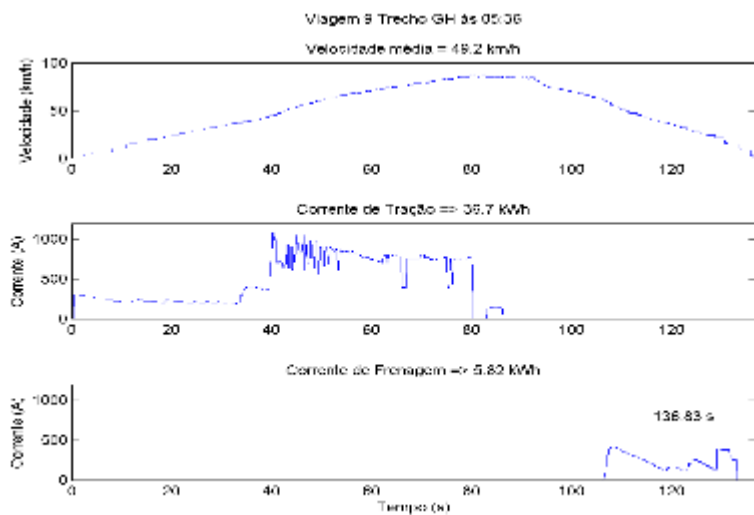
Período	N	Energia de tração (kWh)			Energia de frenagem (kWh)			Tempo (s)	Velocidade (km/h)
		Média ± DP	Máxima	Mínima	Média ± DP	Máxima	Mínima	Média ± DP	Média ± DP
Pico	104	24,5 ± 0,3	7,67	57,07	3,0 ± 0,4	0,10	5,42	141,3 ± 34,5	49,7 ± 8,5
Vale	34	25,7 ± 0,3	10,12	48,20	4,1 ± 0,4	0,50	7,00	142,0 ± 32,0	49,3 ± 9,8

Energia de tração por trecho

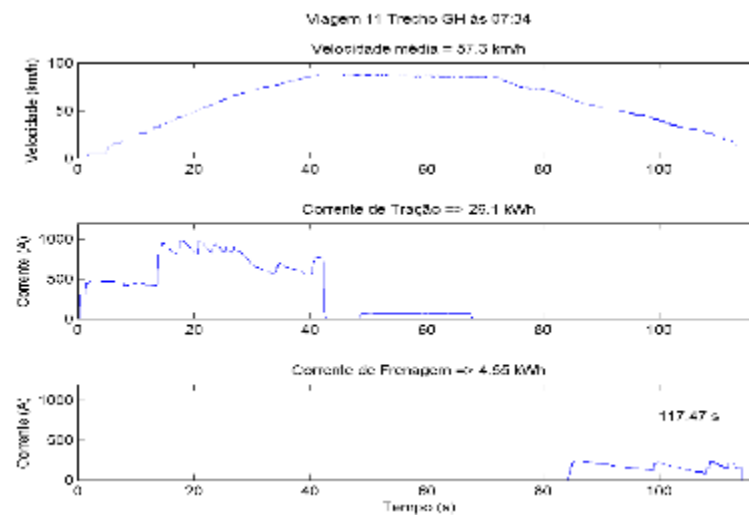


Resultados

aceleração mais amena



aceleração mais brusca

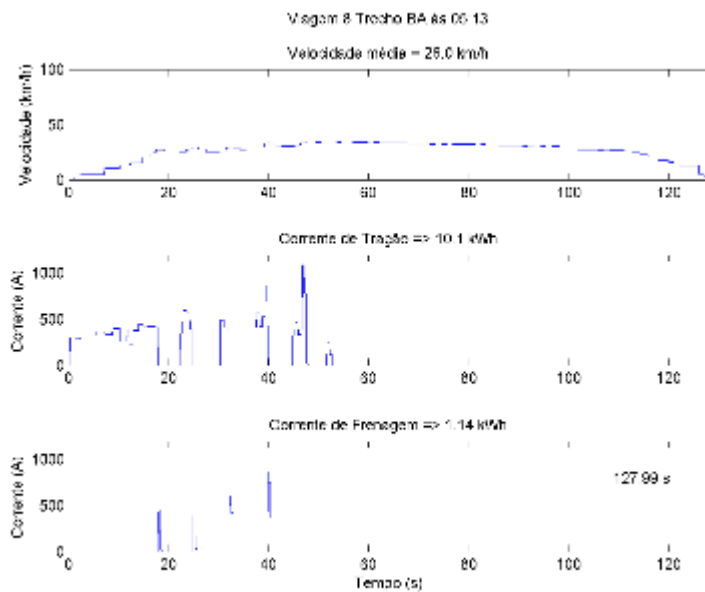


29% menos energia e

14% menos tempo

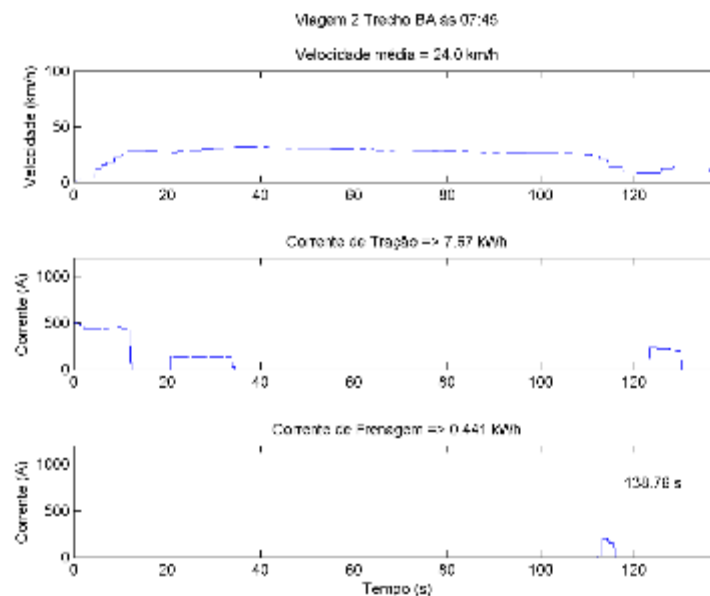
Resultados

Recebeu penalização



10,1 kWh em 128 s

Não foi penalizado



7,67 kW em 138,8 s

(24% menos energia e 8,4% mais tempo)

Conclusões

Consumo energético de viagens entre A e O

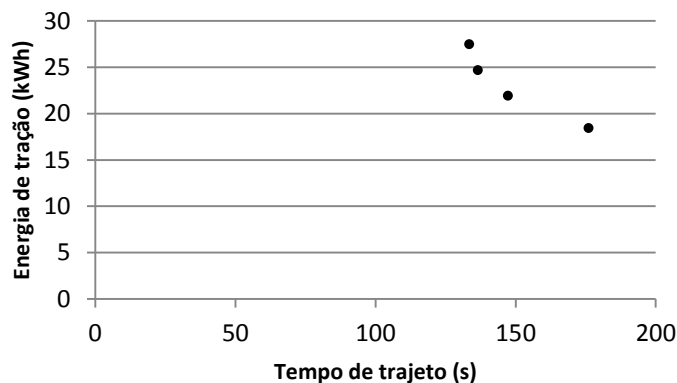
Estação Origem	Estação Destino	Viagem	Energia de tração (kWh)	Energia de frenagem (kWh)
A	O	1	364,6	40,5
		3	304,6	33,3
		9	372,7	63,0
		11	334,4	46,8
O	A	2	314,4	42,4
		10	357,7	59,4
		12	307,0	36,0

Estatística de consumo por trecho

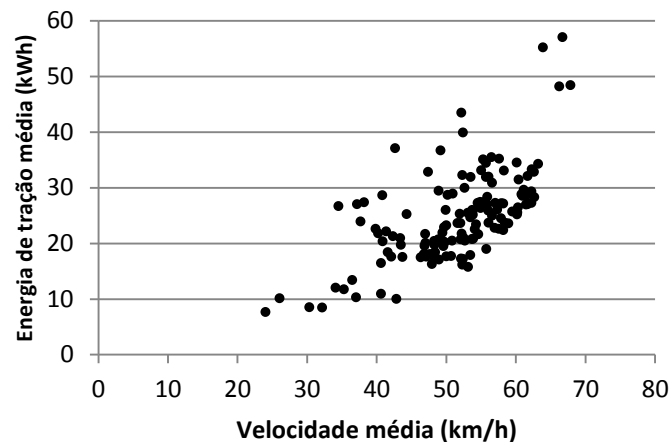
Trecho	Dist. (km)	N	Energia de tração (kWh)			Energia de frenagem (kWh)		
			Média ± DP	Mínima	Máxima	Média ± DP	Mínima	Máxima
AB	0,9	4	10,7 ± 1,6	8,5	12,0	2,0 ± 1,4	0,89	3,97
BC	2	4	32,3 ± 4,1	28,4	37,1	4,1 ± 1,5	2,52	6,03
CD	1,8	4	21,7 ± 3,9	17,6	27,1	2,6 ± 1,0	1,76	3,88
DE	1,9	4	17,2 ± 1,1	15,8	18,1	4,4 ± 1,6	3,01	6,73
EF	1,2	4	19,3 ± 2,0	17,1	21,8	4,2 ± 1,9	3,08	7,00
FG	2,4	4	32,6 ± 5,9	27,0	39,9	4,2 ± 1,4	3,13	6,20
GH	2	4	29,6 ± 6,4	22,6	36,7	4,5 ± 0,9	3,68	5,82
HI	2,2	4	33,3 ± 7,9	25,0	43,5	3,5 ± 2,0	2,07	6,48
IJ	1,7	4	22,3 ± 2,1	20,1	25,1	2,7 ± 0,6	2,31	3,53
JK	1,9	4	19,2 ± 1,7	17,7	20,9	2,9 ± 0,7	2,17	3,91
KL	1,2	4	18,9 ± 1,3	17,6	20,4	2,4 ± 0,8	1,70	3,49
LM	2,8	4	26,2 ± 5,2	19,0	31,5	2,9 ± 0,8	1,88	3,65
MN	2,6	4	31,3 ± 2,7	28,7	34,3	3,0 ± 0,9	1,74	3,70
NO	1,9	4	29,4 ± 2,4	26,7	32,3	2,5 ± 1,6	1,00	4,36
Total	26,5	56	344,1	291,7	400,7	45,9	30,93	68,74

Resultados

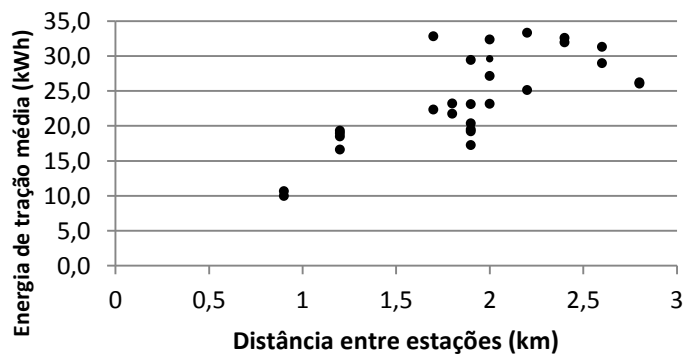
Energia de tração x Tempo de trajeto
Trecho CB



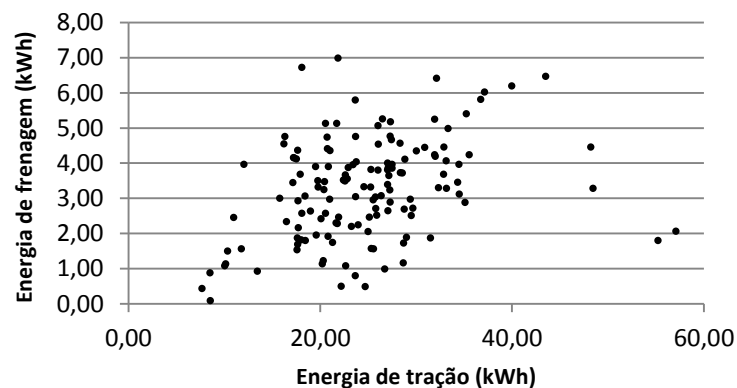
Energia de tração x Velocidade média



Energia de tração x Distância entre estações
Por trecho



Energia frenagem x Energia de tração



Conclusões

- Os trechos AO e AO, respectivamente, numa situação ótima, poderiam consumir 15% e 12% menos energia do que a média.
- Assumindo as premissas de custo de energia elétrica e similaridade de média da operação mensal e dos trechos AO e AO, conclui-se que as operações otimizando a economia deixariam de consumir cerca de 600.000 kWh por mês, representando uma economia de R\$ 204 mil no período.
- Por outro lado, as viagens realizadas de forma ineficiente podem consumir até 16% mais energia do que a média, representando 800.000 kWh por mês, ou R\$ 272 mil por mês.
- Se a energia reostática fosse totalmente reaproveitada, haveria economia de R\$ 750 mil por mês
- Necessário refazer o estudo com mais amostras (20) e mais variáveis



Bibliografia

AMORA, D. **Velhos, trens urbanos desperdiçam energia**. In Folha de São Paulo. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2014/03/1422789-velhos-trens-urbanos-desperdicam-energia.shtm>>. Acesso em: 09 out. 2014.

Barbosa, R. S. **Estudo da Dinâmica Longitudinal do Trem**. 1993. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

BOCHARNIKOV, Y. V.; TOBIAS A. M.; HILLMANSEN, S.; GOODMAN, C. J. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways, IET Electr. Power Appl., Vol. 1, No. 5, September 2007

DOMÍNGUEZ et al., 2012 M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, R.R. Pecharrómán Energy Savings in Metropolitan Railway Substations Through Regenerative Energy Recovery and Optimal Design of ATO Speed Profiles IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 9 (2012), pp. 496–504

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, **BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2014**, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2014.

FARIA, G. E. G. de., Economia de energia elétrica em sistemas metroviários CTBC, 13ª Semana de Tecnologia Metroviária, AEAMESP, São Paulo, 2007.

SILVA, A. M. B.; LEAL, M. V. R. Estudo sobre a influência do nível de tensão de alimentação sobre o consumo de energia elétrica do material rodante do Metrô-SP, 2007 64 f. Monografia (Especialização em Tecnologia Metro-Ferroviária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEITE, A. R. Um esquema para redução do consumo de combustível em sistemas de condução férrea baseado em otimização distribuída de restrição. 2009. 79 f. Dissertação (Mestrado em Informática)–Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2009.

LEONELLI, P. A. Eficiência Energética no Brasil - etiquetas e selos de eficiência energética, Congresso Internacional sobre Contratações Públicas Sustentáveis, Ministério de Minas e Energia, 2010. 1 diapositivo, color.

MARTINS, V. De.; GALLO, M. Models and methods to optimise train speed profiles with and without energy recovery systems: a suburban test case. SIDT Scientific Seminar 2012. Elsevier. 2013.

MARTINS, S. R. **Simulação da Frenagem de Trem Unitário de Carga**. 1999 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
MME – Ministério de Minas e Energia, PNEF - Plano Nacional de Eficiência Energética, Premissas e Diretrizes Básicas, 2011

OLIVEIRA, L. H. S; LARocca, A. P. C., Controle da demanda de energia para melhor aproveitamento da frenagem regenerativa dos trens, 2013.

PEREIRA, O. C. **Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga: o caso da Estrada de Ferro Carajás – EFC**. 2009 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RAMOS, A. de. P.; MARTINS, E. W.; IGARASHI, M. Y., Estudo para a racionalização da energia elétrica consumida nos trens do metrô de São Paulo, 10ª Semana de Tecnologia Metroviária, AEAMESP, São Paulo, 2004. diapositivo, color.

RÍOS, M. A.; GARCIA, G., Modelo de cálculo de demanda de potencia eléctrica em sistemas de tracción tipo metro, tren y tranvia. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá. 2010, pp. 7-15.

TAVARES, A. M.; FILHO, A. F. F.; OSÓRIO J. O. M.; BLAETH, Y. B.; Um estudo sobre a frenagem regenerativa de trens utilizando gerador linear de indução. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito – MS, 2010. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense.

Análise estatística do perfil de consumo energético de um trem metropolitano

Davi Vital - davi.vital@gmail.com

Geomar Machado Martins – geomarmm@gmail.com

Tiago Augusto Furlan – tiago.furlan@trensurb.gov.br

José Henrique Hinkel – jose.hinkel@gmail.com

Obrigado



TRABALHO FINALISTA