



AEAMESP



Artigo: Análise estatística do perfil de consumo energético de um trem metropolitano

AUTORIA:

Davi Martins Lamas Vital
Geomar Machado Martins
Tiago Augusto Furlan
José Henrique Hinkel



AEAMESP



21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

Categoria 3: Tecnologias de implantação, operação e manutenção de sistemas de transporte.

Análise estatística do perfil de consumo energético de um trem metropolitano

ARTIGO TÉCNICO

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo estatístico do consumo energético de tração e de frenagem elétrica em trens metropolitanos de uma operadora brasileira. São analisados os consumos em cada trecho entre estações através de comparações e correlações. Mostra-se quanto do consumo energético varia em função da marcha impressa pelo condutor e quanta energia é perdida em frenagem reostática.

Palavras-chave: eficiência energética, trem urbano, tração elétrica, quantificação energética estatística

INTRODUÇÃO

Para melhorar a sustentabilidade da mobilidade em áreas urbanas, é imperativo que a sociedade desenvolva sistemas de transporte eficientes energeticamente. A energia gasta com transportes corresponde a 33% de toda a energia gerada no mundo, sendo que

85% desta energia é de origem fóssil. Sendo assim, visto que o modal ferroviário possui custo por passageiro.km muito inferior a sistemas rodoviários, este representa uma das mais interessantes soluções para demandas de alto tráfego demandando pouca energia (Martinis e Gallo, 2013).

Atualmente, no Brasil, é possível encontrar diversas gerações de trens urbanos de passageiros operando nas metrópoles. Em função da tecnologia de cada época, estas frotas possuem muitas diferenças. Uma das diferenças significativas é consumo de energia de tração. O principal motivo para a frota brasileira de trens construída nas décadas de 70 e 80 consumirem mais energia que os atuais é a tecnologia empregada no sistema de tração. Naquela época, era comum utilizar motores de corrente contínua e sistema de frenagem reostática, no qual a energia cinética do movimento é convertida em calor dissipado em resistores. Além disso, a tecnologia de sinalização atual permite uso mais inteligente da demanda contratada através da sincronização de partidas e chegadas de trens nas estações. Esta regulação permite maximizar aproveitamento das energias de frenagem regeneradas e minimizar picos de corrente nas subestações de tração.

Motores de corrente contínua (CC) foram amplamente utilizados no passado pela indústria da celulose, na siderurgia e na tração ferroviária em função de possuírem alto torque de partida e facilidade de controle de velocidade. Atualmente, a tecnologia dos semicondutores permitiu que estas aplicações, antes típicas dos motores CC, migrassem para motores de corrente alternada (CA), devido ao menor custo de operação e manutenção. No entanto, por se tratar de equipamentos cuja substituição de tecnologia é bastante onerosa, motores CC ainda são muito encontrados.

Este trabalho trata da análise estatística do consumo energético de tração elétrica de uma linha de trem urbano equipado com motores CC. É mostrado que há grande variabilidade do consumo energético de cada trecho em função da forma de operação adotada.

REFERENCIAL TEÓRICO

De 2012 para 2013, o consumo de energia elétrica total no Brasil cresceu de 498,4 para 516,3 TWh, representando aumento de 3,6%, enquanto a geração deste insumo passou de 552,2 para 570,0 TWh, representando aumento de 3,2% (BEN 2014).

Os sistemas ferroviários urbanos impactam significativamente no sistema elétrico nacional, representam cerca de 0,5% do consumo de energia elétrica do país. Um problema do setor é que a maioria dos trens urbanos e metrô brasileiros foram adquiridos na décadas de 70 e 80. Estes veículos consomem 30% mais energia do que veículos atuais. O percentual do custo de energia elétrica sobre o custo operacional total das empresas operadoras é significativo, chegando a 25,5% no sistema de trens urbanos do Rio de Janeiro. Existe, desde 2008, uma proposta de lei para reduzir entre 5% e 10% a tarifa de energia elétrica para empresas de transporte de passageiros. Para isto, o governo deveria compensar as empresas de energia com valores entre R\$ 300 milhões e 400 milhões. Uma alternativa já foi proposta para usar estes recursos na reforma do sistema de tração e sinalização dos trens, tornando-os mais eficientes energeticamente (AMORA, 2014).

De acordo com o PNEF (2011, p.1):

Eficiência energética refere-se a ações de diversas naturezas que

culminam na redução da energia necessária para atender as demandas da sociedade por serviços de energia sob a forma de luz, calor/frio, acionamento, transporte e uso em processos. Objetiva, em síntese, atender às necessidades da economia com menor uso de energia primária e, portanto, menor impacto na natureza. [...] As ações de eficiência energética 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.

Segundo Leite (2009), o tema da eficiência energética nos transportes tem sido tratado em grande parte por pesquisas objetivando novos equipamentos, mais eficientes. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, a eficiência do sistema de transporte está relacionada com a perícia dos operadores que conduzem os veículos.

Mover um trem de uma origem a um destino requer diversas operações por parte do operador, destacando-se acelerações, frenagens e paradas, praticadas em diferentes tipos de topografia e condições climáticas (Barbosa, 1993). Pereira (2009) analisa em sua pesquisa os fatores que impactam no consumo de óleo diesel em trens de carga, que passam por ações no âmbito operacional, tecnológico, de manutenção, de recebimento, controle de abastecimento e gerencia. Com as ações que propôs, obteve economia de combustível nos anos de 2007 e 2008. Leite (2009) propõe a concepção de um sistema de condução ótima de locomotivas diesel-elétricas visando aumentar a eficiência energética

pela redução do consumo de combustível. O método proposto foi avaliado através da comparação de dados de viagens reais com simulação do módulo de controle proposto, considerando mesmo perfil de ferrovia e características dos veículos.

Como demonstração de que o governo brasileiro tem interesse na busca pela eficiência energética, Leonelli (2010) cita que o Ministério de Minas e Energia tem como meta reduzir cerca de 10% na demanda de energia no país entre 2010 e 2030 e que o poder público tem dado o exemplo na busca de certificação de edificações sustentáveis. No entanto, para veículos ferroviários, ainda não existe nenhuma certificação no Brasil.

Uma grande quantidade de veículos utiliza frenagem por atrito. Neste caso, a energia cinética do movimento longitudinal é convertida em calor gerado pelo atrito entre os elementos de frenagem. Por outro lado, há pelo menos duas formas de frenagem elétrica comumente usadas, a reostática e a regenerativa. Em ambos os casos os motores, solidários aos eixos, atuam como geradores e a energia cinética do trem é convertida em energia elétrica. No sistema reostático, esta energia é direcionada a resistores, e, no regenerativo, é devolvida à rede elétrica que alimenta o trem (Barbosa, 1993).

Segundo Bocharnikov et al (2007), a economia de energia em sistemas de trens elétricos tem sido estudada por muitos anos, e as soluções são, normalmente, uma combinação de estratégia de condução, frenagem regenerativa e sistemas de armazenamento de energia. O autor propõe o uso de algoritmos genéticos para otimizar o compromisso entre redução do consumo energético e aumento do tempo de percurso.

Em sistemas regenerativos mais usuais, a energia de frenagem regenerada deve ser absorvida por algum trem que esteja em aceleração no mesmo intervalo de tempo e nas

imediações do trem que está freando. Martinis e Gallo (2013) citam que uma forma mais recente de utilizar a energia regenerada é através de supercapacitores que armazenam esta energia e reutilizam da forma mais apropriada. Estes supercapacitores podem estar fixos, junto das subestações, ou embarcados nos veículos. A transmissão da energia para ser armazenada nas subestações gera mais perdas do que manter os supercapacitores no trem, embora isso aumente sua massa. Tavares et al. (2010) apresentam um estudo de frenagem regenerativa em trens utilizando gerador linear de indução, onde o primário do motor (equivalente ao estator) é fixo entre os trilhos, e o secundário (equivalente ao rotor) é fixado no trem. Simulações de aplicação indicam recuperação de cerca de 20% da energia cinética do trem.

Domínguez et al (2012) consideram uma linha urbana equipada com Operação Automática de Trens (ATO) para propor perfis de velocidade ótimos. Os autores analisam cenários e calculam as economias que seriam geradas por investimentos tais como instalação de inversores de frequência em subestações ou dispositivos de armazenamento de energia embarcados. Oliveira e Larocca (2013) ressaltam que o sistema de sinalização CTBC (*Communication Based Train Control*), que permite regulação da movimentação dos trens, e assim, sincronismo de movimentos, e o sistema de frenagem regenerativa são duas tecnologias empregadas no meio ferroviário que aumentam a eficiência energética do sistema. Faria (2007) descreve três estratégias para economia de energia elétrica através das possibilidades que a tecnologia de sinalização CTBC traz: otimização da ordem de regulação dos trens, uso de *coasting* pelo máximo tempo possível nos trechos inter-estações, uso de adormecimento, despertar e *stand-by* em trens parados no pátio.

Martinis e Gallo (2013) propõem modelos e métodos de otimização do perfil de

velocidade de trens metropolitanos visando minimizar o consumo energético total. Para isso, desenvolveram uma plataforma de trabalho para elaborar estratégias de condução que requerem a modelagem da via como base, podendo-se usar trens com ou sem freio regenerativo. São propostas as estratégias: tempo ótimo, regeneração de energia, economia de energia, e regeneração + economia. Foram feitas simulações para uma via simplificada com apenas três estações, onde os dois primeiros métodos apresentaram redução de 48,47%, 47,75%, respectivamente, enquanto o quarto apresentou redução de 37,46%.

Na linha 3 do metrô de São Paulo, se propôs economizar energia consumida por trens enquanto estacionados nos pátios (economia estática) e em operação (economia dinâmica). No viés da economia dinâmica, se propôs duas linhas: alterar os níveis de desempenho dos trens quando carregados e reduzir a velocidade de trens vazios, compensando o atraso no tempo de abertura de portas. Foi desenvolvido um módulo eletrônico para manter desligados subsistemas desnecessários para um trem em stand-by. A economia estática prevista foi de 200.000 kWh/mês. O centro de controle realiza a regulagem dos trens alterando os tempos de percurso e de parada. Para alterar os tempos de percurso, o centro de controle transmite os chamados Níveis de Desempenho (ND) para os trens. As performances de diversos níveis de desempenho foram medidas em campo e comparadas. Foram amostrados valores de corrente, tensão e velocidade. Se verificou que um perfil com maior aceleração inicial e com menor velocidade final consome menos energia do que o perfil original. A economia dinâmica prevista foi de 200.000 kWh/mês. As previsão de redução no consumo pela adoção das duas economias combinadas foi de 4.800.000 kWh/ano, representando 3% do consumo da linha (Ramos et al, 2004).

Silva e Leal (2007) realizaram estudo sobre a influência do nível de tensão das

subestações de tração sobre o consumo do material rodante, visto que a quantidade de energia devolvida pelo freio regenerativo depende da tensão de linha no momento da frenagem (condição de receptividade). Os autores mencionam que o sistema de freio regenerativo, além de trazer economia de energia, pode trazer, também, os seguintes benefícios indiretos: melhoria do conforto térmico dos usuários pela eliminação de resistores dissipadores sobre o teto do veículo, economia de energia pela diminuição da massa do veículo pela retirada de resistores dissipadores, melhoria no desempenho do sistema de ventilação em túneis.

Ríos e Garcia (2010) ressaltam que a potência demandada por um metrô ou VLT dependem da velocidade e da aceleração do veículo em cada instante de tempo. Os autores propõem uma forma simplificada para simular a demanda de energia de uma rede elétrica de alimentação de trens que se divide em três rotinas: cálculo de consumo de energia por tempo de viagem para um trem entre cada duas estações considerando veículos com e sem freio regenerativo; algoritmo probabilístico para cálculo de passageiros por carro para cada viagem, tempos de parada em cada estação, velocidade de entrada e de saída de passageiros nas estações, quantidade de passageiros em cada estação e cálculo do consumo total instantâneo em cada estação considerando uma grade horário definida. No entanto, o modelo proposto não considera as inclinações ao longo da via.

OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

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

1.2 Objetivo específico

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

METODOLOGIA

Este trabalho trata de um estudo de caso. Quanto à sua natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada onde é feita uma abordagem quantitativa de dados levantados em campo.

Um trem típico do estilo construído nas décadas de 70 e 80 é instrumentado de modo que se possa obter as variáveis de interesse.

A figura 1 apresenta um esquema elétrico simplificado do circuito de tração do trem. Os motores são ligados em pares permanentemente em série, configurando um truque. Os truques, em cada carro motor (carros M1 e M2) são ligados ora em série, ora em paralelo, em função das chaves S e P. As chaves S e P são fechadas sempre de modo alternado. Quando S está fechada, P está aberta, e vice-versa. O circuito de controle de tração garante que as correntes nos quatro grupos de motores sejam praticamente iguais a cada instante e que as chaves S e P de cada carro comutem simultaneamente. Desta forma, o registro de corrente de apenas um truque é suficiente para calcular a corrente de tração

demanda pelo trem todo.

O que se deseja conhecer é a corrente total consumida pelos oito motores do trem. Nesta análise, não se deu atenção ao consumo de outras cargas, tais como compressor de ar, iluminação e ar condicionado. Por falta de transdutores que pudessem medir as correntes de um pantógrafo, e também porque se desejou medir exclusivamente o consumo da energia de tração, optou-se por medir as correntes de cada dupla de motores, e um sinal digital informando se as duplas estão em série ou em paralelo entre si. Idealmente, os valores de corrente nos oito motores do trem devem ser iguais, de forma que medir apenas um deles já seria suficiente para se conhecer a corrente total de tração. Na prática, eles realmente são muito parecidos, e a aproximação poderia ser feita sem perda de fidelidade dos resultados. No entanto, optou-se por registrar o sinal de duas duplas para que se tivesse uma leitura mais robusta, do ponto de vista de que algum dos transdutores poderia falhar.

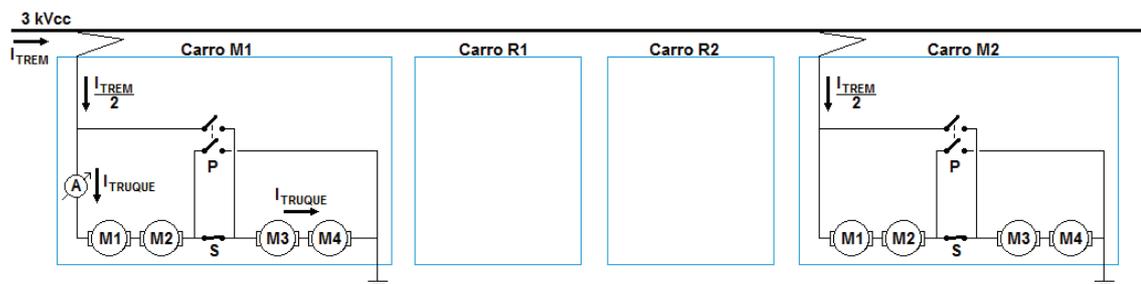


Figura 1 – Esquema simplificado do circuito de tração

A corrente total demandada da rede aérea pelo trem será calculada, portanto, da seguinte forma:

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

Onde:

I_{TREM} é corrente total demandada da rede aérea pelo trem

I_{TRUQUE} é a corrente em um truque qualquer

P vale 1 quando está fechada e S aberta, e 0 no caso inverso

Será feita a aquisição de dados em um trem, das variáveis:

- i. Horário [hh:mm:ss,sss] (analógica)
- ii. Distância (analógica)
- iii. Velocidade (analógica)
- iv. Abertura de portas (digital)
- v. Solicitação de freio (digital)
- vi. Corrente em um motor (analógica)
- vii. Chave P (digital)

Estas variáveis serão armazenadas durante o tempo que a memória do registrador permitir. Espera-se obter dados de um ciclo de 5 dias.

Os dados serão então tratados para que se possa analisar, separadamente, cada trecho entre duas estações, sempre usando a variável “Horário” como referência. Será necessário processar estes dados para que se possa:

- a) Identificar as estações a partir dos registros ii, iii, iv e v;
- b) Calcular a corrente de tração total do trem a partir das variáveis vi e vii;
- c) Separar, a partir das variáveis v e vi, a corrente de tração da corrente de frenagem reostática;
- d) Identificar o carregamento do trem a partir do horário da viagem;

Após o tratamento inicial, será calculada a energia consumida com a tração em cada trecho e a energia cinética dissipada nos resistores na frenagem reostática. Este cálculo será feito integrando-se o valor de corrente no tempo e multiplicando pela tensão média da linha, visto que o sinal de tensão não será lido e registrado por motivo de limitação técnica.

A equação 2 apresenta este cálculo:

$$E[kWh] = \frac{\bar{V}}{3600 \cdot 1000} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{TREM}(t) \cdot dt \quad (2)$$

Onde:

\bar{V} é a tensão média presente na rede aérea.

t_0 e t_1 são os tempos de partida e chegada de uma estação à outra

A equação 2 não poderá ser aplicada diretamente visto que é preciso primeiro separar os dois tipos de correntes que ocorrem no motor: a corrente de tração e a corrente de frenagem.

$$I_{FRENAGEM}(t) = I_{TREM}(t) \cdot SOLF \quad (3)$$

$$I_{TRACÇÃO}(t) = I_{TREM}(t) - I_{FRENAGEM}(t) \quad (4)$$

Onde:

SOLF é o sinal digital que indica solicitação de freio quando vale 1.

$$E_{TRACÇÃO} [kWh] = \frac{\bar{v}}{3600 \cdot 1000} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{TRACÇÃO}(t) \cdot dt \quad (5)$$

$$E_{FRENAGEM} [kWh] = \frac{\bar{v}}{3600 \cdot 1000} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{FRENAGEM}(t) \cdot dt \quad (6)$$

Como não se pretende quantificar com exatidão a energia envolvida na frenagem reostática, mas apenas conhecer sua ordem de grandeza, as equações 2 e 6 assumem que a tensão gerada pelo motor durante a frenagem possui um valor constante igual ao valor médio da rede de alimentação.

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.

DIAGNÓSTICO

Por limitação de quantidade de entradas do equipamento, foi necessário utilizar dois registradores para armazenar os dados. Cada um deles armazenou as seguintes informações:

Registrador 1 (R1):

- Horário [hh:mm:ss,sss] (analógica)
- Distância (analógica)
- Velocidade (analógica)
- Abertura de portas (digital)
- Solicitação de freio (digital)

Registrador 2 (R2):

- Horário [hh:mm:ss,sss] (analógica)
- Distância (analógica)
- Velocidade (analógica)
- Corrente em um motor (analógica)
- Chave P (digital)

ANÁLISE DE DADOS

Foram analisados os dados e verificou-se que há registros de 12 viagens:

Tabela 1 – Viagens registradas

| 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 |

Para minimizar o consumo de memória, os registradores utilizados registram os dados apenas quando algum deles sofre variação. Ou seja, a taxa de amostragem dos registradores não é fixa: os dados são amostrados a cada 1 m de distância percorrida ou menos, e o período de amostragem varia de um centésimo de segundo até cerca de 90 segundos. O arquivo do registrador R1 possui cerca de 40.000 linhas, enquanto o do registrador R2 possui cerca de 90.000 linhas, já que o sinal de corrente varia a taxas mais altas.

A figura 2 apresenta o sinal na forma como é disponibilizado pelos registradores. É possível constatar a taxa variável de amostragem observando os pontos nas curvas.

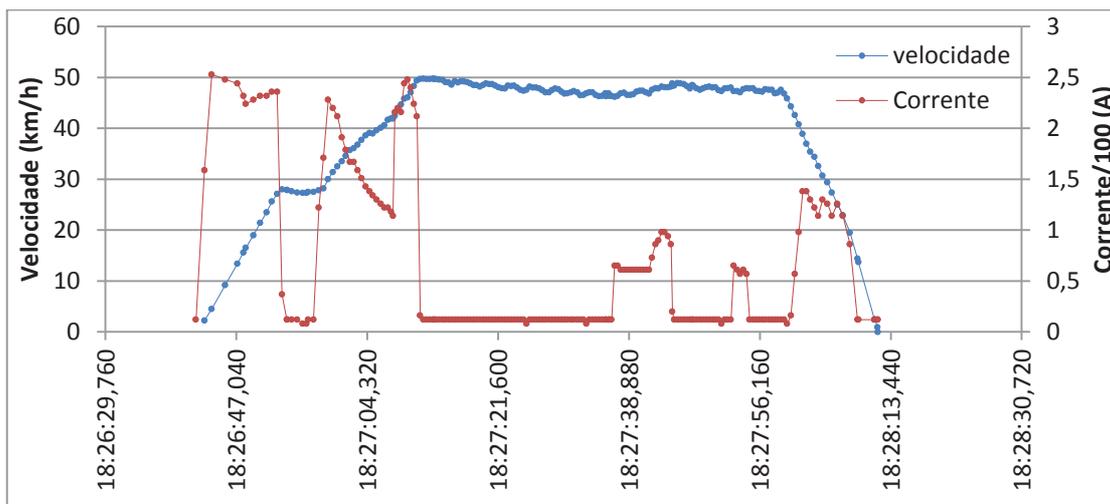


Figura 2 – Exemplo de um trecho antes do tratamento

Após a correção do erro de *off-set*, ajuste da escala e eliminação de dados espúrios, os dados ficaram conforme mostram os gráficos da figura 3, que apresenta a viagem 1 através dos sinais de velocidade, corrente de tração e corrente de frenagem contra o eixo do tempo. Neste caso, o trem parte da estação A no instante zero e chega na estação O no instante 2.224 s. Os momentos em que o sinal de velocidade vai a zero representam as estações. Os trens costumam ficar de 20 a 25 s parados nas estações para os embarques e desembarques de passageiros. A figura 4 apresenta o trecho BC ampliado, onde pode ser ver três momentos ocorrendo tração, e um momento ocorrendo frenagem reostática.

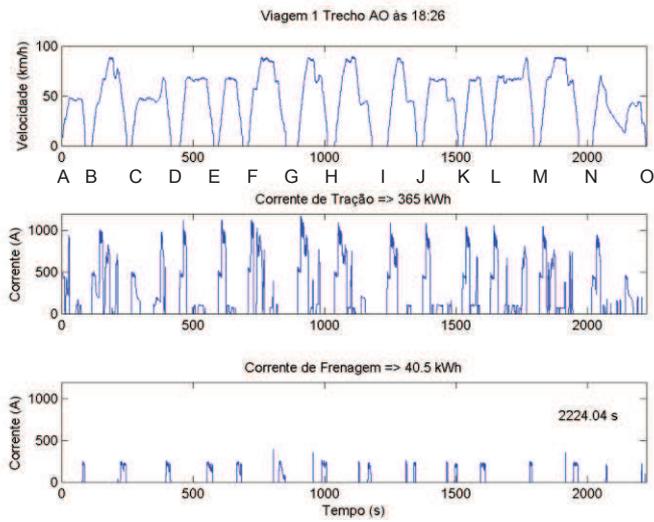


Figura 3 – Sinais da Viagem 1 (sentido AO)

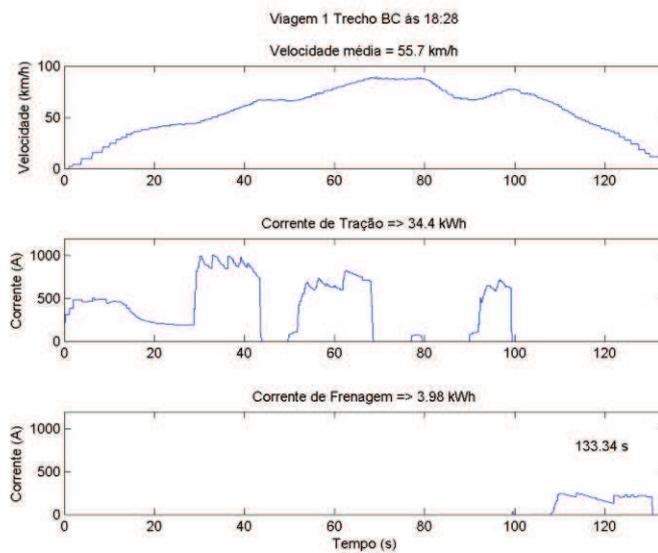


Figura 4 – Trecho BC da viagem 1

A tabela 2 apresenta o resultado dos cálculos das equações 1, 3, 4, 5 e 6 para a massa de dados disponíveis.

Tabela 2 – Informações calculadas para cada trecho de cada viagem

| Viagem | Trecho | Energia de tração (kWh) | Energia de frenagem (kWh) | Tempo (s) | Velocidade Média (km/h) |
|--------|--------|-------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------|
| 1 | AB | 10,31 | 1,51 | 90,52 | 37,03 |
| 1 | BC | 34,44 | 3,98 | 133,34 | 55,71 |
| 1 | CD | 20,97 | 2,99 | 148,82 | 43,40 |
| 1 | DE | 17,91 | 3,69 | 130,13 | 53,45 |
| 1 | EF | 19,76 | 3,33 | 92,54 | 48,30 |
| 1 | FG | 34,50 | 3,13 | 144,81 | 60,13 |
| 1 | GH | 33,11 | 4,08 | 115,21 | 58,26 |
| 1 | HI | 35,07 | 2,89 | 142,86 | 55,27 |
| 1 | IJ | 25,12 | 2,48 | 113,02 | 53,80 |
| 1 | JK | 20,52 | 2,58 | 134,76 | 50,84 |
| 1 | KL | 20,44 | 3,49 | 91,22 | 48,24 |
| 1 | LM | 31,47 | 1,88 | 165,87 | 60,38 |
| 1 | MN | 34,30 | 3,47 | 148,61 | 63,19 |
| 1 | NO | 26,71 | 1,00 | 206,73 | 34,49 |
| 2 | BA | 7,67 | 0,44 | 138,76 | 24,03 |
| 2 | CB | 18,42 | 1,81 | 176,07 | 41,61 |
| 2 | DC | 19,73 | 3,51 | 151,76 | 43,48 |
| 2 | ED | 23,25 | 2,21 | 136,03 | 50,00 |
| 2 | FE | 18,00 | 1,83 | 96,44 | 47,96 |
| 2 | GF | 35,23 | 5,42 | 145,36 | 57,60 |
| 2 | HG | 23,92 | 2,25 | 187,62 | 37,69 |
| 2 | IH | 27,46 | 3,97 | 143,18 | 55,49 |
| 2 | JI | 32,87 | 4,47 | 128,05 | 47,39 |
| 2 | KJ | 19,51 | 3,91 | 136,53 | 49,59 |
| 2 | LK | 10,96 | 2,47 | 108,75 | 40,63 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 12 | RQ | 28,73 | 2,70 | 169,58 | 50,17 |
| 12 | SR | 23,69 | 3,05 | 133,84 | 58,40 |
| 12 | TS | 23,72 | 4,04 | 104,63 | 56,06 |
| 12 | UT | 21,77 | 2,29 | 114,69 | 52,19 |
| 12 | VU | 16,47 | 2,34 | 141,25 | 40,64 |

A análise dos dados revelou que, por uma falha do equipamento de medição de corrente, não foram registrados dados que permitissem o cálculo do consumo energético para todos os trechos das viagens 5, 6 e 7 e para os trechos ED, DC, CB e BA da viagem 4. O trecho QP da viagem 12 também apresentou erro na medição e seu consumo de energia foi desconsiderado nas análises que seguem. Estes trechos sem informação de consumo energético foram considerados apenas nas estatísticas de velocidade e duração média do trajeto.

A operadora em questão possuía 22 estações (estação A até estação V) em funcionamento na ocasião do teste, em maio de 2014. No entanto, nem todas as viagens iam até a estação V. Cerca de metade das viagens partiam da estação A indo em direção à estação O e retornando. Isto faz com que a viagem AO represente cerca de 67% dos trechos percorridos ao longo do mês.

As viagens realizadas no período da aquisição de dados ocorreram majoritariamente entre as estações A e O, de modo que, se obteve 4 amostras por sentido para os trechos no intervalo AO e apenas 2 amostras por sentido de cada trecho no intervalo OV. Desta forma, se decidiu, neste trabalho, realizar a análise apenas para o intervalo AO.

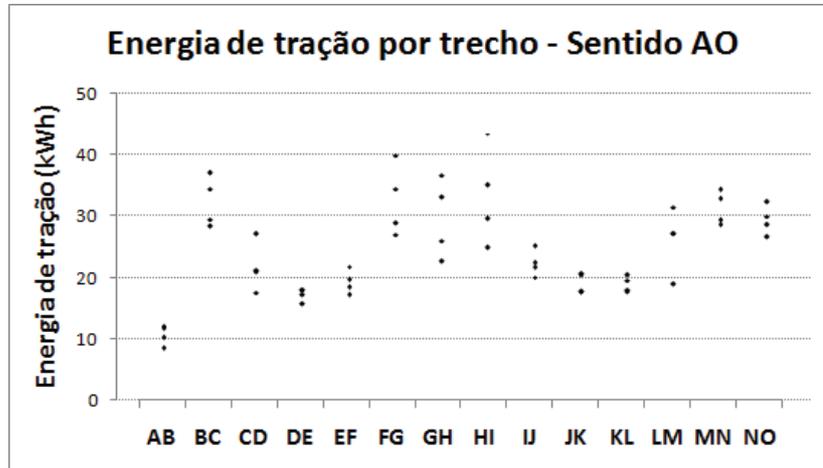
A tabela 3 mostra que não há diferença significativa em relação ao consumo de energia por trem em função do horário da viagem. O tempo de viagem e a velocidade média também estão muito próximas uma da outra. Acredita-se que isto se deva ao fato de os trens estarem com alta taxa de ocupação em todos os momentos do dia. A partir desta constatação, os dados de pico e de vale foram unificados para gerar as demais estatísticas.

Tabela 3 – Comparação entre trechos de pico e de vale

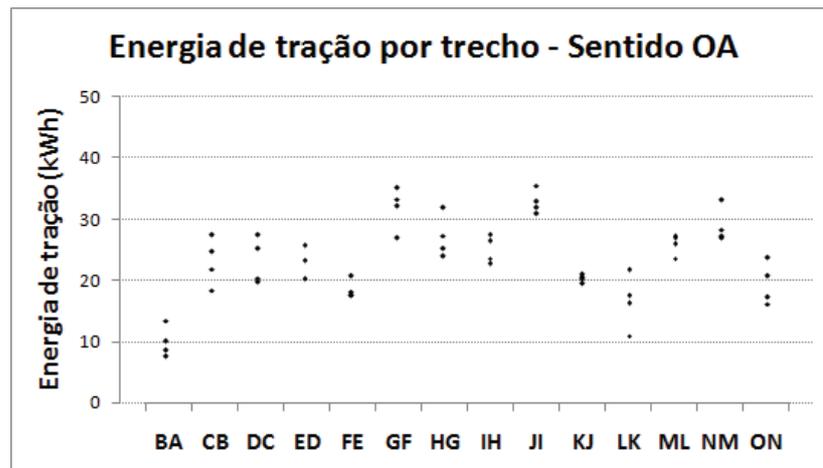
| Período | N | Energia de tração (kWh) | | | Energia de frenagem (kWh) | | | Tempo (s) | Velocidade (km/h) |
|---------|-----|-------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|--------------|-------------------|
| | | Média ± DP | Máxima | Mínima | Média ± DP | 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 |

As figuras 5 (a) e (b) apresentam a distribuição do consumo de energia de tração por trecho. Nelas, se observa que alguns trechos possuem consumo mais uniforme entre as viagens, tal como o trecho DE no sentido AO e o trecho KJ no sentido OA, que apresentam desvio padrão de 6% e de 3%, respectivamente, do seu valor médio. Já os trechos como o

FG, GH e HI no sentido AO, apresentam desvios padrão maiores, valendo, respectivamente 18%, 22% e 24% do valor médio.



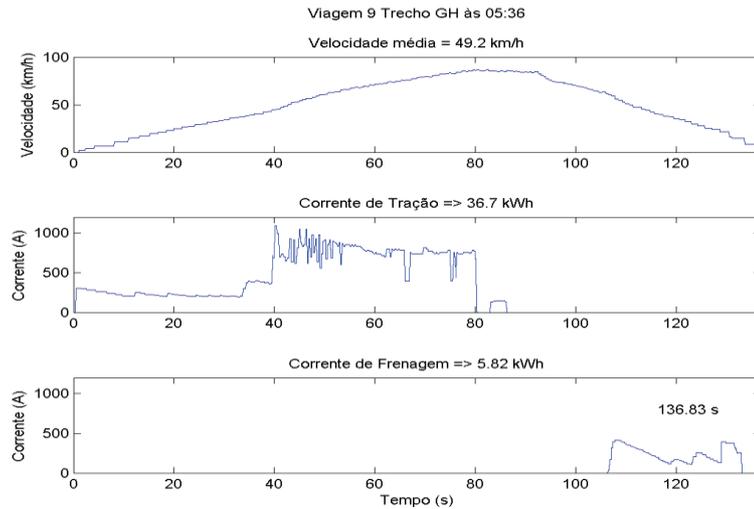
(a)



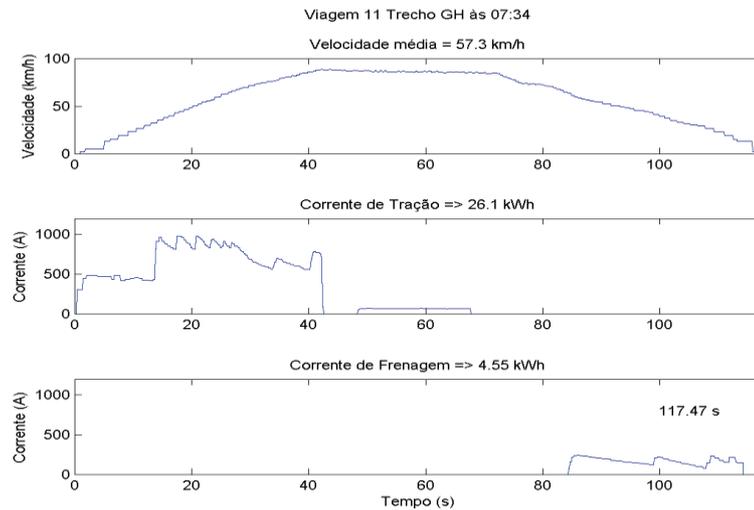
(b)

Figura 5 – Distribuição da energia de tração por trecho

O consumo de energia em cada trecho é muito influenciado pela forma que o operador conduz o trem. As figuras 6 (a) e (b) apresentam um mesmo trecho (GH) sendo conduzido por diferentes condutores nas viagens 9 e 11. Nota-se que o condutor da viagem 9 acelerou de forma mais amena que o da viagem 11. No entanto, a aceleração rápida ocorrida na viagem 11 consumiu 10,6 kWh (29%) menos energia que o primeiro, e ainda chegou 19 s (14%) antes.



(a)

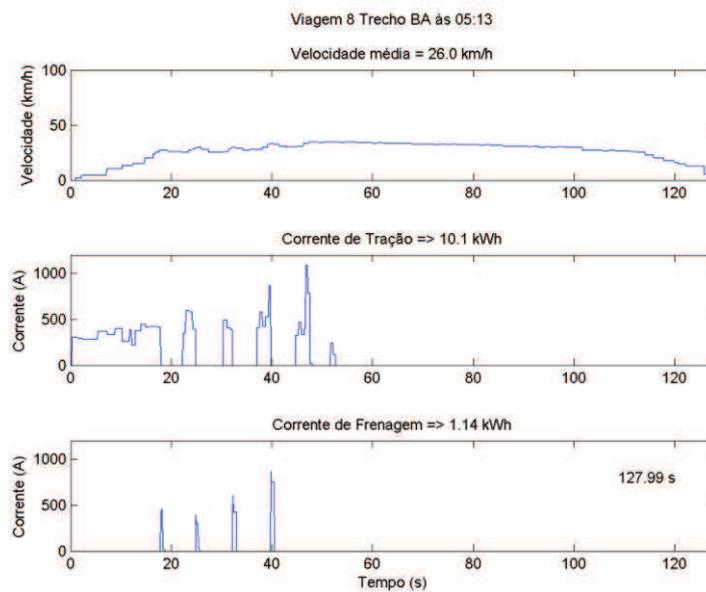


(b)

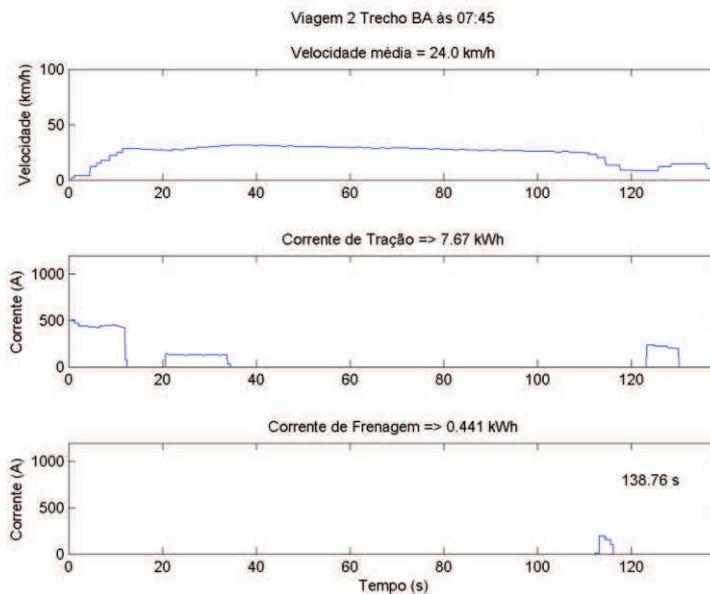
Figura 6 – Trecho GH

A via onde foi feito o estudo é equipada com sistema de sinalização conhecido por blocos fixos. Neste sistema, em função das limitações civis de segurança para a velocidade do trem, cada segmento da via permite uma velocidade máxima. Esta velocidade máxima é informada ao trem através de ondas eletromagnéticas emitidas pelo trilho. Se o trem ultrapassa a velocidade permitida em algum momento, acontece a chamada “penalização”, quando circuito de controle do trem detecta ultrapassagem da velocidade máxima e aplica freio automaticamente.

As figuras 7 (a) e (b) mostram um mesmo trecho sendo percorrido por dois operadores distintos. No trecho da figura 7 (a), o operador recebe 4 penalizações em sequência. Isto pode ser constatado nos picos das correntes de frenagem e de tração. A viagem neste trecho recebendo penalizações resultou num consumo de 10,1 kWh e duração de 128 s. A figura 7 (b) apresenta o mesmo trecho sendo percorrido por um operador que não recebeu penalizações. Nesta viagem, o consumo foi de 7,67 kWh e a duração foi de 138,8 s, ou seja, houve um consumo de energia 24% menor e tempo de trajeto 8,4% maior.



(a)



(b)

Figura 7 – Trecho BA

As tabelas 4 e 5 apresentam dados cinemáticos médios dos trechos, onde se observa que o tempo de trajeto entre estações desvia de sua média de 6,7 a 62,4 s.

Tabela 4 – Dados estatísticos cinemáticos por trecho – sentido AO

| Trecho | Dist. (km) | N | Tempo (s) | Velocidade (km/h) |
|--------------|-------------|-----------|--------------|-------------------|
| | | | Média ± DP | Média ± DP |
| AB | 0,9 | 6 | 99,6 ± 6,7 | 33,7 ± 2,3 |
| BC | 2 | 6 | 148,9 ± 15,3 | 50,2 ± 5,1 |
| CD | 1,8 | 6 | 159,5 ± 9,8 | 40,8 ± 2,4 |
| DE | 1,9 | 6 | 138,1 ± 7,6 | 50,5 ± 2,7 |
| EF | 1,2 | 6 | 100,9 ± 9,4 | 44,8 ± 4,2 |
| FG | 2,4 | 6 | 155,0 ± 9,4 | 56,2 ± 3,5 |
| GH | 2 | 6 | 126,2 ± 10,6 | 53,7 ± 4,5 |
| HI | 2,2 | 6 | 148,2 ± 14,7 | 53,8 ± 5,2 |
| IJ | 1,7 | 6 | 123,4 ± 19,6 | 50,2 ± 7,1 |
| JK | 1,9 | 6 | 139,9 ± 10,9 | 49,2 ± 3,7 |
| KL | 1,2 | 6 | 99,1 ± 9,8 | 44,8 ± 4,3 |
| LM | 2,8 | 6 | 179,3 ± 10,7 | 56,2 ± 3,3 |
| MN | 2,6 | 6 | 165,9 ± 27,2 | 57,6 ± 8,0 |
| NO | 1,9 | 6 | 188,4 ± 62,4 | 40,9 ± 11,0 |
| Total | 26,5 | 84 | | |

Tabela 5 – Dados estatísticos cinemáticos por trecho – sentido OA

| Trecho | Dist. (km) | N | Tempo (s) | Velocidade (km/h) |
|--------------|-------------|-----------|--------------|-------------------|
| | | | Média ± DP | Média ± DP |
| ON | 1,9 | 5 | 139,3 ± 9,7 | 50,7 ± 3,2 |
| NM | 2,6 | 5 | 159,5 ± 11,1 | 59,3 ± 4,0 |
| ML | 2,8 | 5 | 184,5 ± 6,5 | 54,1 ± 2,0 |
| LK | 1,2 | 5 | 100,0 ± 8,6 | 44,3 ± 3,8 |
| KJ | 1,9 | 5 | 135,4 ± 7,1 | 50,1 ± 2,6 |
| JI | 1,7 | 5 | 116,9 ± 12,5 | 52,3 ± 5,4 |
| IH | 2,2 | 5 | 141,4 ± 9,4 | 56,5 ± 3,7 |
| HG | 2 | 5 | 148,0 ± 24,5 | 48,6 ± 7,1 |
| GF | 2,4 | 5 | 142,2 ± 10,5 | 59,1 ± 4,1 |
| FE | 1,2 | 5 | 101,0 ± 7,0 | 45,9 ± 3,0 |
| ED | 1,9 | 5 | 134,0 ± 7,1 | 50,9 ± 2,7 |
| DC | 1,8 | 6 | 163,5 ± 11,4 | 40,5 ± 2,9 |
| CB | 2 | 6 | 159,4 ± 23,6 | 46,7 ± 6,9 |
| BA | 0,9 | 6 | 120,1 ± 18,7 | 28,4 ± 4,8 |
| Total | 26,5 | 73 | | |

Apesar de alguns trechos permitirem inferir que percorrer o trajeto num tempo maior ocasiona menor consumo de energia, tal como o trecho CB mostrado na figura 8, a grande maioria dos trechos não apresentou nenhuma correlação entre estas duas grandezas.

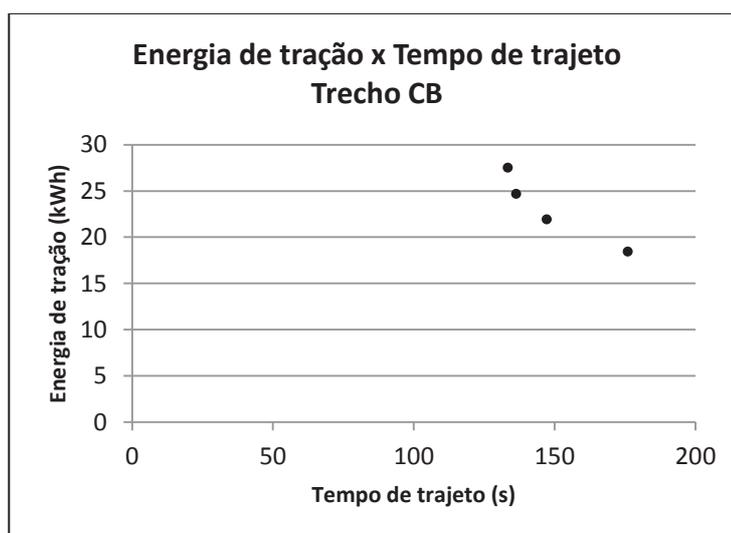


Figura 8 – Distribuição da energia de tração em função do tempo de trajeto

A figura 9 mostra que, de uma forma geral, trechos percorridos com velocidades

maiores consomem mais energia. No entanto, percebe-se, também, que um trecho percorrido a uma velocidade média de 60 km/h pode consumir menos energia do que um trecho percorrido a 40 km/h. Isto se deve às diversas outras variáveis do sistema. Já para os trechos percorridos com velocidades médias mais extremas (cerca de 25 km/h e 70 km/h), o consumo energético se mostra proporcional. Foi aplicado o teste produto-momento de Pearson, que indicou haver correlação por trecho entre a energia de tração média e a velocidade média ($r = 0,64$; $p < 0,001$).

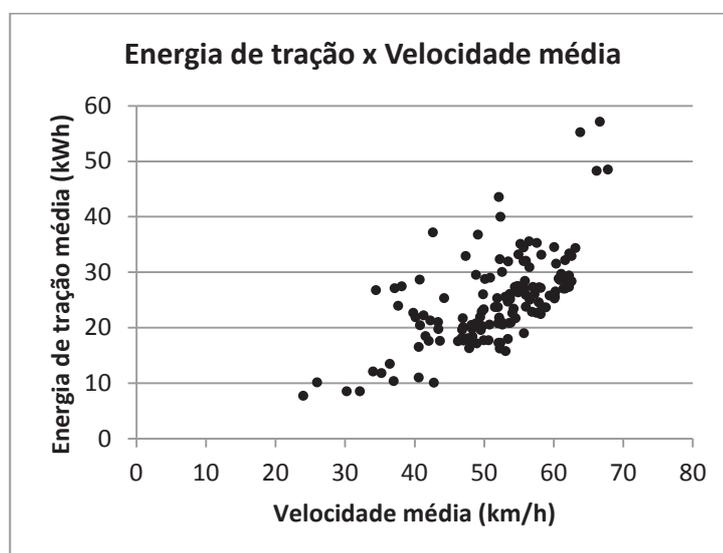


Figura 9 – Distribuição da energia de tração em função da velocidade média

A figura 10 apresenta a distribuição das médias de consumo por trecho em função das distâncias de trecho. Foi aplicado o teste produto-momento de Pearson, que mostrou existência de correlação entre as grandezas ($r = 0,78$; $p < 0,001$), conforme esperado.

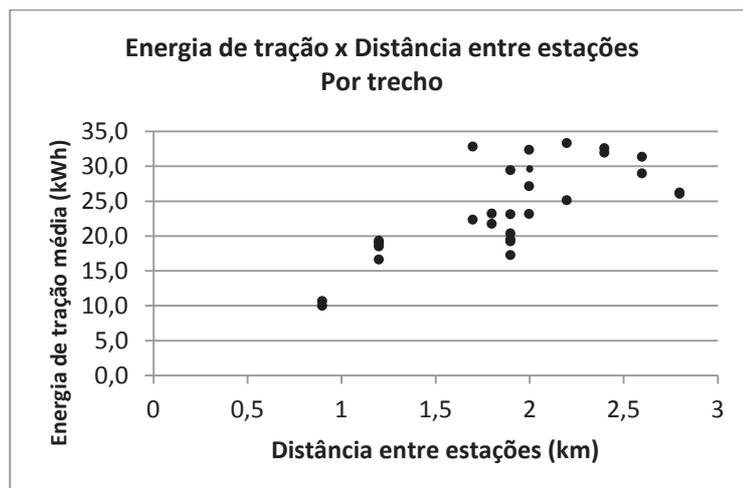


Figura 10 – Distribuição de energia de tração x distância entre estações

O princípio da conservação de energia permite supor que a energia elétrica gasta para acelerar o trem é armazenada em forma cinética e depois convertida em calor na frenagem. O teste produto-momento de Pearson para os dados da figura 11 mostrou que não há correlação ($r = 0,33$) entre a energia gasta na tração com a dissipada na frenagem reostática. Isto significa que grande parte da energia gasta na tração se perde de diversas formas ao longo do percurso. A energia dissipada pelo freio reostático é apenas uma fração de valor aleatório da energia de tração. Vale lembrar que o freio reostático funciona apenas na faixa de 15 a 70 km/h. Nos demais momentos em que o freio é solicitado, o freio de atrito é que entra em ação. Se os trechos fossem curtos e em linha reta e plana, e o freio de atrito fosse pouco utilizado, talvez houvesse alguma correlação entre aquelas grandezas, baseada na teoria da conservação da energia.

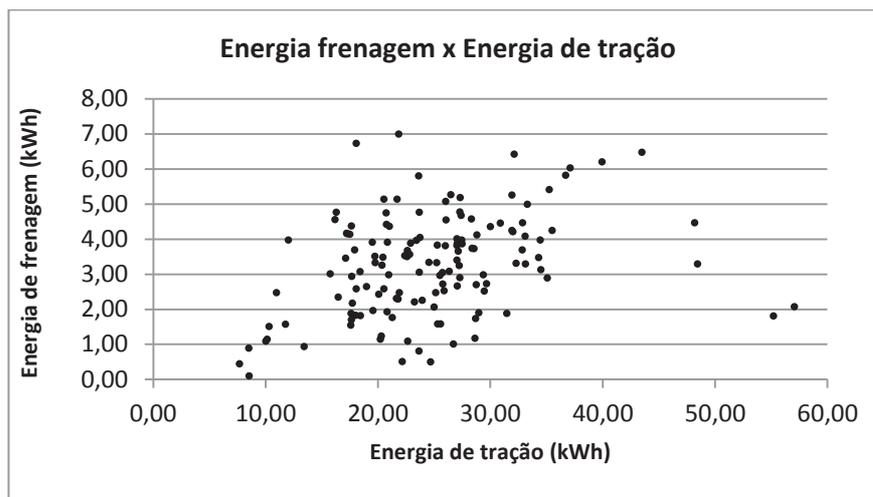


Figura 11 – Distribuição de energia de frenagem x energia de tração

A tabela 6 apresenta o consumo de energia entre as estações A e O, nos dois sentidos, para diversas viagens.

Tabela 6 – 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 |

Observa-se que, para o trajeto AO, a viagem mais dispendiosa consumiu 22% mais energia que a mais econômica. Para o trajeto OA, esta diferença foi de 16%.

Na conta de energia elétrica de tração constava o custo médio de R\$ 0,34/kWh no mês em que foram feitas as aquisições. Com este valor, e considerando-se que 67% da operação comercial normal ao longo do mês é constituída por viagens entre as estações AO e OA, pode-se estimar, supondo que o consumo nos demais trechos segue a mesma média

dos trechos AO e OA, e que a média de consumo de energia de tração pela operadora é de 5 milhões de kWh por mês, que a diferença de 22% entre a viagem mais dispendiosa e a mais econômica representa 1.100.000 kWh por mês, ou R\$ 374 mil por mês.

A tabela 7 apresenta, além da média e desvio padrão, os consumos mínimos e máximos encontrados para cada trecho, o que permite inferir a economia gerada por uma viagem totalmente conduzida de forma econômica e o gasto extra gerado por uma condução que depende de mais energia.

Tabela 7 – Dados estatísticos de energia por trecho – sentido AO

| 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 |

Tabela 8 – Dados estatísticos de energia por trecho – sentido OA

| Trecho | Dist. (km) | N | Energia de tração (kWh) | | | Energia de frenagem (kWh) | | |
|--------------|-------------|-----------|-------------------------|--------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------|
| | | | Média ± DP | Mínima | Máxima | Média ± DP | Mínima | Máxima |
| ON | 1,9 | 4 | 19,5 ± 3,4 | 16,2 | 23,7 | 4,5 ± 0,3 | 4,16 | 4,77 |
| NM | 2,6 | 4 | 28,9 ± 2,9 | 27,0 | 33,1 | 3,6 ± 0,7 | 2,91 | 4,57 |
| ML | 2,8 | 4 | 26,0 ± 1,7 | 23,6 | 27,3 | 3,3 ± 2,0 | 0,81 | 5,08 |
| LK | 1,2 | 4 | 16,6 ± 4,4 | 11,0 | 21,7 | 4,1 ± 1,2 | 2,47 | 5,14 |
| KJ | 1,9 | 4 | 20,3 ± 0,6 | 19,5 | 21,0 | 3,7 ± 1,7 | 1,23 | 5,14 |
| JI | 1,7 | 4 | 32,8 ± 2,0 | 30,9 | 35,5 | 4,4 ± 0,1 | 4,25 | 4,47 |
| IH | 2,2 | 4 | 25,1 ± 2,2 | 22,8 | 27,5 | 4,7 ± 1,1 | 3,57 | 5,80 |
| HG | 2 | 4 | 27,1 ± 3,5 | 23,9 | 31,9 | 3,6 ± 1,9 | 1,58 | 5,26 |
| GF | 2,4 | 4 | 31,9 ± 3,5 | 27,0 | 35,2 | 5,2 ± 1,0 | 4,01 | 6,42 |
| FE | 1,2 | 4 | 18,5 ± 1,5 | 17,6 | 20,7 | 3,1 ± 1,7 | 1,55 | 4,75 |
| ED | 1,9 | 3 | 23,1 ± 2,8 | 20,2 | 25,8 | 2,0 ± 0,8 | 1,14 | 2,72 |
| DC | 1,8 | 4 | 23,2 ± 3,7 | 19,7 | 27,4 | 3,8 ± 0,6 | 3,26 | 4,67 |
| CB | 2 | 4 | 23,1 ± 3,9 | 18,4 | 27,5 | 2,2 ± 1,4 | 0,50 | 3,87 |
| BA | 0,9 | 4 | 9,9 ± 2,5 | 7,7 | 13,4 | 0,7 ± 0,5 | 0,10 | 1,14 |
| Total | 26,5 | 55 | 326,1 | 285,6 | 371,7 | 48,8 | 31,54 | 63,80 |

As tabelas 7 e 8 permitem inferir que o trecho AO e AO, respectivamente, numa situação ótima, poderia ser percorrido consumindo 291,7 kWh e 285,6 kWh, o que representa 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 tabelas também permitem inferir que 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.

Quanto à tecnologia de frenagem, as tabelas 7 e 8 permitem inferir que se a energia de frenagem reostática fosse regenerada e utilizada, a economia seria de cerca de 15%, considerando que todas as frenagens fossem 100% regeneradas. Isto representaria uma economia de R\$ 750 mil por mês.

CONCLUSÕES

Este estudo tratou de uma análise inicial do tema, usando de simplificações para que se tivesse ideia da ordem de grandeza da energia que se pode economizar. A maior parte dos trabalhos no tema da eficiência energética em transporte sobre trilhos trata do assunto com uma abordagem onde os sistemas são modelados na forma clássica através de equações. Para que traga resultados fidedignos, essas técnicas exigem profundo conhecimento das leis físicas que regem os movimentos. A abordagem estatística adotada neste trabalho produziu resultados obtidos de forma mais simplificada, mas que já permite quantificar potenciais de ganho e decidir que caminho seguir para a otimização do sistema, mesmo que posteriormente se opte pela modelagem dos sistemas dinâmicos envolvidos no processo.

Para que se possa tomar decisões e estabelecer formas de condução padronizadas visando a racionalização do consumo de energia elétrica, sugere-se que sejam feitas novas aquisições considerando as seguintes recomendações:

- Registrar dados em mais de um trem;
- Registrar os níveis de tensão da rede aérea e dos motores;
- Registrar, no mínimo, 20 amostras para cada trecho;
- Expandir a análise para todas as estações;
- Medir os consumos das injeções de trens;
- Registrar o carregamento do trem;
- Registrar o operador de cada viagem;
- Utilizar um único registrador por trem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.shtml>>. 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. Pecharromán 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.

MARTINIS, 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.; BLAUTH, 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.