

4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

PROPOSTA PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DE TRACÇÃO EM HORÁRIOS DE VALE COM A UTILIZAÇÃO DO RECURSO DE RESTRIÇÃO DE VELOCIDADE DO SISTEMA DE SINALIZAÇÃO CBTC EM TRECHOS ESPECÍFICOS DA VIA E RECUPERAÇÃO DE HEADWAY COM A REDUÇÃO DO TEMPO DE PERMANÊNCIA EM ZONA DE MANOBRA

INTRODUÇÃO

Em se tratando de um sistema Metroviário, um dos grandes responsáveis pelo custo fixo de operação é o consumo de energia demandada para a tração elétrica dos trens, sendo o tema modelagem do consumo de energia elétrica tema de diversos trabalhos encontrados na literatura [1][2][3][4]. No caso de novas linhas de Metrô em implantação esse aumento de consumo de energia elétrica ocorre gradualmente, considerando a inauguração de estações

e entrega de novos trens para operação ao longo do tempo com o aumento progressivo da demanda de passageiros no sistema.

Alguns Metrô que apresentam estrutura em elevado tem alta variação de gradiente e curvatura em determinados trechos de via para acompanhar a geografia de avenidas e vencer interferências existentes (viadutos, passarelas, etc.) nas grandes cidades. Essa variação de gradiente e curvatura acarreta em variações do perfil máximo de velocidade civil que é parametrizado no sistema de sinalização para delimitar/controlar a velocidade máxima dos trens em cada trecho da via.

No sistema de sinalização CBTC (Controle de Trens Baseado em Comunicação) [5] com a opção de condução automática (ATO – Operação Automática do Trem) habilitada, o trem persegue o máximo perfil de velocidade operacional possível respeitando os limites de restrição civil da via sem nenhuma intervenção do operador de trem, tentando obter assim o melhor desempenho possível do sistema em termos de intervalo entre trens (headway). A base de dados do sistema de sinalização embarcado contém as máximas velocidades que podem ser atingidas por um trem em cada trecho de via, de forma que após um trem receber uma autorização de movimento do sistema de sinalização central (sala técnica), o computador embarcado calcula o perfil de velocidade que determinado trem irá seguir no percurso entre duas estações até a próxima parada para prestação de serviço. A Figura 1 a seguir ilustra de forma esquemática a curva de velocidade de um percurso entre estações de um trem circulando em ATO, respeitando os limites de velocidade civil e a curva de aplicação de emergência.

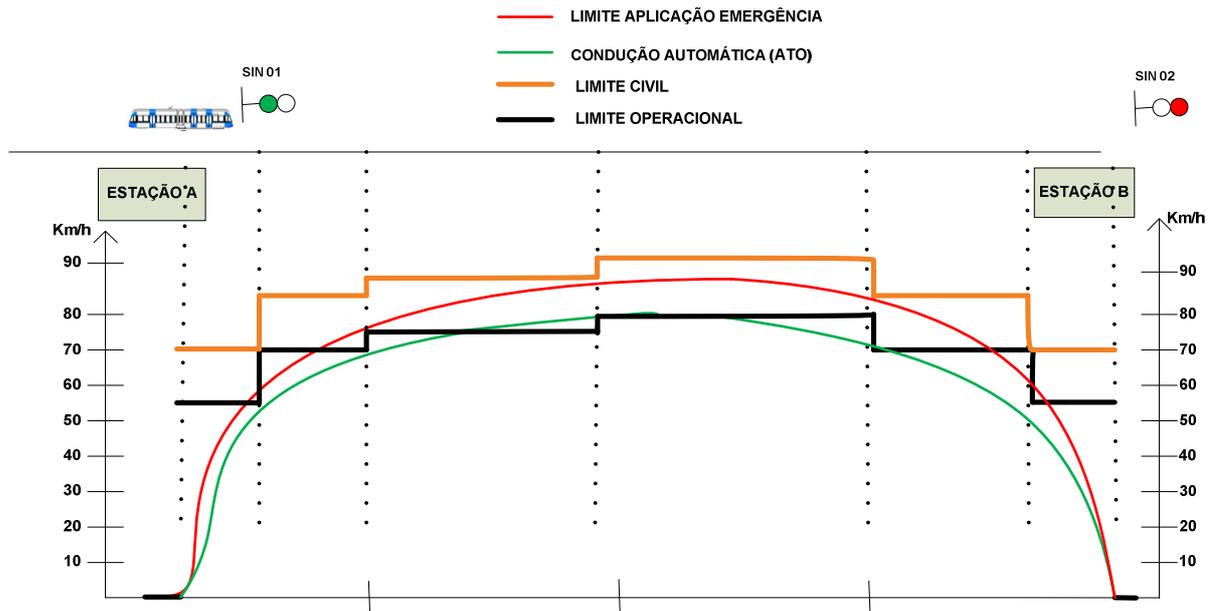


Figura 1 – Limites de Velocidade Civil, Operacional e Curva Condução Automática do Trem (ATO)

Nos horários de vale ocorre uma redução do número de trens em circulação pelas operadoras, justificada pela tolerância maior no intervalo entre trens devido a redução do número de passageiros. No caso de concessionárias em regime de PPP (Parceria Público Privada) normalmente essa “autorização” para a circulação com um intervalo entre trens maior em horários de vale está prevista e especificada no sistema de avaliação de desempenho dos contratos de concessão.

Os sistemas de sinalização que tem a funcionalidade de restrição temporária de velocidade (TSR – Restrição Temporária de Velocidade) permitem a aplicação da mesma em trechos ou seções de via específicas, normalmente quando existe uma restrição civil e/ou falha na via permanente (Exemplos: Trilho partido com talas ou invenção civil), de forma que seja possível o sistema limitar a velocidade em determinado trecho ou seção. Com o advento da

comunicação contínua promovida pelo sistema CBTC, a restrição temporária de via (TSR) em determinado trecho ou seção é transmitida através de comunicação via rádio desde o controle central localizado nas salas técnicas para o computador embarcado dos trens, de forma que seja possível o sistema embarcado dos trens recalcularem dinamicamente o perfil de velocidade considerando a TSR que foi aplicada.

A utilização do recurso da Tabela Horária em um sistema de sinalização Metroviário permite que os trens diariamente ao longo do horário de operação tenham sua partida em cada estação precisamente agendada para um determinada hora, minuto e segundo (HH:MM:SS) após o tempo de prestação de serviço ao usuário. O tempo de permanência de um trem na zona de manobra do final de linha é calculado pela Tabela Horária com base nos parâmetros definidos para a criação da mesma (quantidade de trens, máximo perfil de velocidade da via, parâmetros do trem), de forma a permitir a regulação do tráfego conforme os horários de pico e vale ao longo do dia de operação.

Esse trabalho apresenta uma proposta para a redução do consumo de energia de tração em horários de vale em um sistema Metroviário que opera com o sistema CBTC e condução automática (ATO) de trens, utilizando para tal a funcionalidade de restrição temporária de velocidade (TSR) constante em um trecho entre estações e recuperando o headway reduzindo o tempo de permanência em zonas de manobras. São objetivos do trabalho:

- Criar uma modelagem matemática para o cálculo da energia consumida em função da velocidade dinâmica percorrida pelo trem no trecho de estudo. Realizar a comparação da energia consumida com o “trem circulando em ATO SEM restrição de velocidade X trem circulando em ATO COM restrição de velocidade”;

- Medir o consumo da energia através da extração de Logs do comportamento dinâmico da corrente e tensão do trem no trecho de estudo. Realizar a comparação da energia consumida com o “trem circulando em ATO SEM restrição de velocidade X trem circulando em ATO COM restrição de velocidade”;

- Calcular uma estimativa do quanto de energia de tração (KWh) e valores (R\$) que seriam economizados com a metodologia sendo aplicada durante um ano de operação.

O resultado esperado é a demonstração de que com a aplicação da proposta é possível operar dentro do intervalo entre trens especificado para um horário vale obtendo uma economia de energia elétrica. O trabalho utilizará como estudo de caso dados de características da via e dos trens que operam atualmente no Metrô Bahia.

DIAGNÓSTICO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram consideradas algumas premissas, descritas a seguir.

Escolha específica de faixas de horário vale ao longo do dia para aplicação da metodologia, conforme Tabela 1 a seguir. Preferencialmente utilizando os horários de vale após as 20:00 onde o movimento representa proporcionalmente 5,76% do movimento diário do fluxo de passageiros nos dias úteis, ou nos Sábados e Domingo quando a porcentagem de usuários do sistema é reduzida e medição do intervalo entre trens para horário de pico ocorre em apenas um dos turnos - Sábado (Manhã) e Domingo (Tarde).

Tabela 1: Faixa de Horários de Operação do Metrô Bahia x Fluxo Passageiros Nos Dias Úteis

no Metrô Bahia

Faixa de Horário	DIAS ÚTEIS	Entradas Passageiros por Minuto	Porcentagem de Entradas	
5 às 6	VALE	13	1,59%	
6 às 7	VALE	68	5,17%	
7 às 8	PICO	149	8,90%	
8 às 9	VALE	161	8,49%	
9 às 10	VALE	96	4,86%	
10 às 11	VALE	78	4,29%	
11 às 12	VALE	74	4,59%	
12 às 13	VALE	100	5,89%	
13 às 14	VALE	101	5,80%	
14 às 15	VALE	94	5,02%	
15 às 16	VALE	95	5,63%	
16 às 17	VALE	128	7,88%	
17 às 18	VALE ATÉ 17:30 / PICO APÓS 17:30	197	11,52%	
18 às 19	PICO ATÉ 18:30 / VALE APÓS 18:30	197	10,14%	
19 às 20	VALE	197	4,47%	
20 às 21	VALE	52	2,36%	5,76%
21 às 22	VALE	37	1,96%	
22 às 23	VALE	29	1,17%	
23 às 0	VALE	9	0,27%	

Escolha de um trecho da linha que tenha a maior quantidade de variações de velocidades máxima (limites operacionais) entre estações. A Figura 2 a seguir ilustra o somatório das variações das velocidades máximas operacionais por trecho entre estações para a Linha 1 do Metrô Bahia.

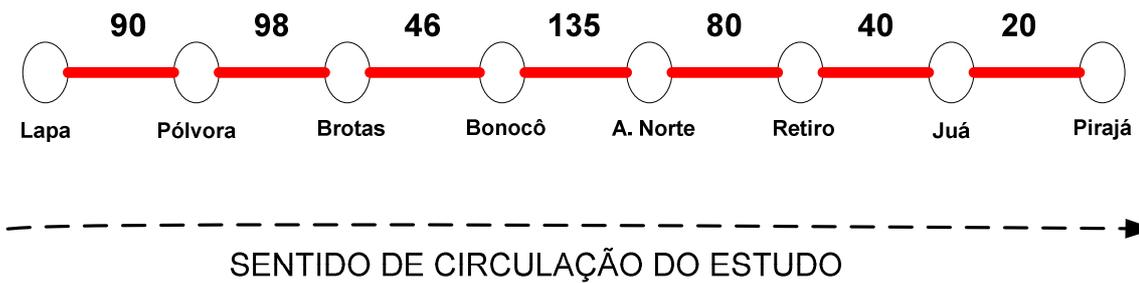


Figura 2 – Somatório das Variações de Velocidades Operacionais por Trecho da Linha 1 do Metrô Bahia

Com base nessa premissa foi escolhido o trecho entre as estações Bonocô (BNC) e Acesso Norte (ANR) para aplicação da metodologia proposta.

A base de dados da via (TDB - Track Data Base) está presente no controlador embarcado presente nos trens habilitados com o sistema CBTC, contendo a velocidade máxima (limite operacional) que pode ser desenvolvida por cada trecho entre estações.

Dois cenários foram considerados no estudo:

1 - Com a base de dados que define as velocidades máximas operacionais ao longo do trecho entre estações conforme o projeto do sistema de sinalização. O limite de velocidade máximo operacional por trecho é definido pelo sistema de sinalização como 10 Km/h abaixo do limite da velocidade civil da via;

2 - Com a aplicação de restrição de velocidade (TSR) de 50Km/h em todo o trecho entre estações pelo controlador de tráfego.

A Figura 3 a seguir ilustra o perfil do limite máximo de velocidade civil, limite máximo de velocidade operacional e limite máximo de velocidade com a aplicação de restrição de velocidade de 50 Km/h por faixa de quilômetro no trecho BNC-ANR:

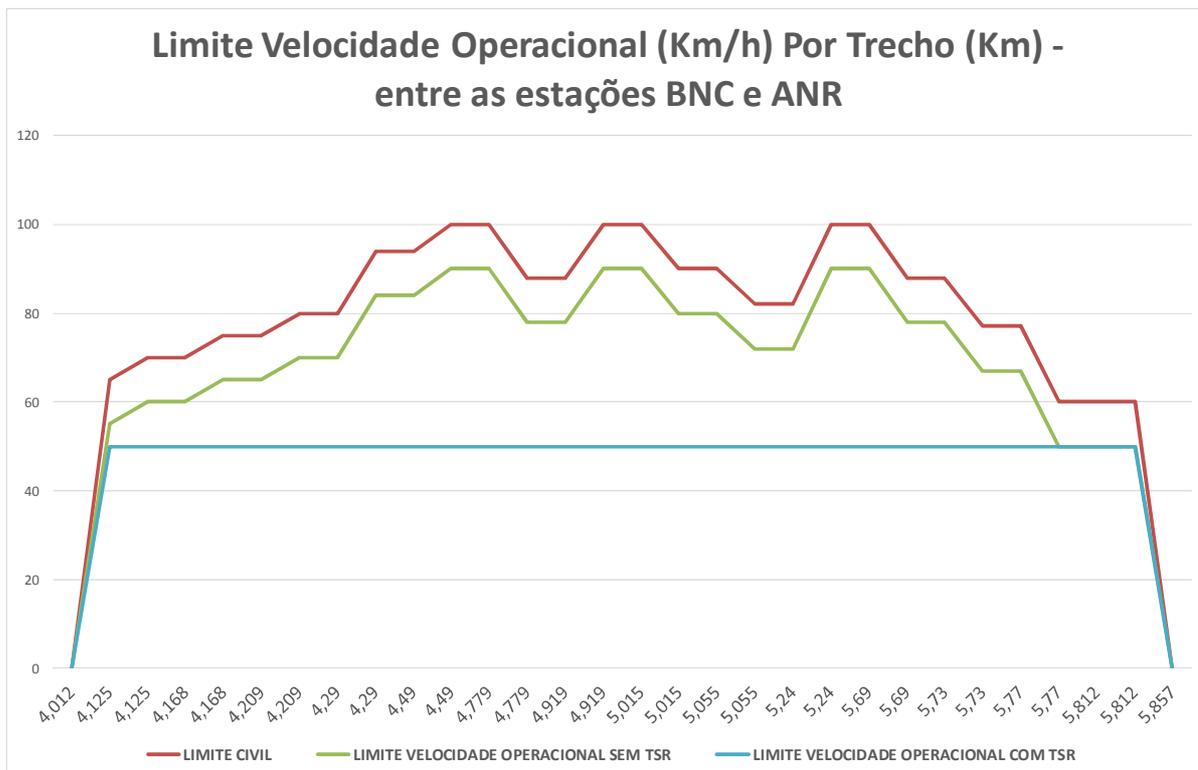


Figura 3 – Limites de velocidade: Civil, Operacional e com TRS de 50 Km/h no Trecho Bonocô/Acesso Norte

Em ambos os cenários a condução do trem foi automática (ATO - Automatic Train Operation), sem qualquer intervenção do operador. Conforme norma videográfica do sistema de sinalização, é possível verificar na Figura 4 um trem na plataforma da estação Bonocô com rota alinhada para a estação Acesso Norte, nas duas condições abordadas no estudo (SEM TSR de 50Km/h e COM TSR de 50Km/h). Os quadrados em vermelho com a indicação de 50 Km/h representam a restrição de velocidade. O controlador de tráfego ao aplicar a restrição de velocidade no trecho em questão faz com que o limite do perfil de velocidade operacional máxima em cada uma das seções que compõem o trecho do estudo seja de 50 Km/h.

(A)



(B)

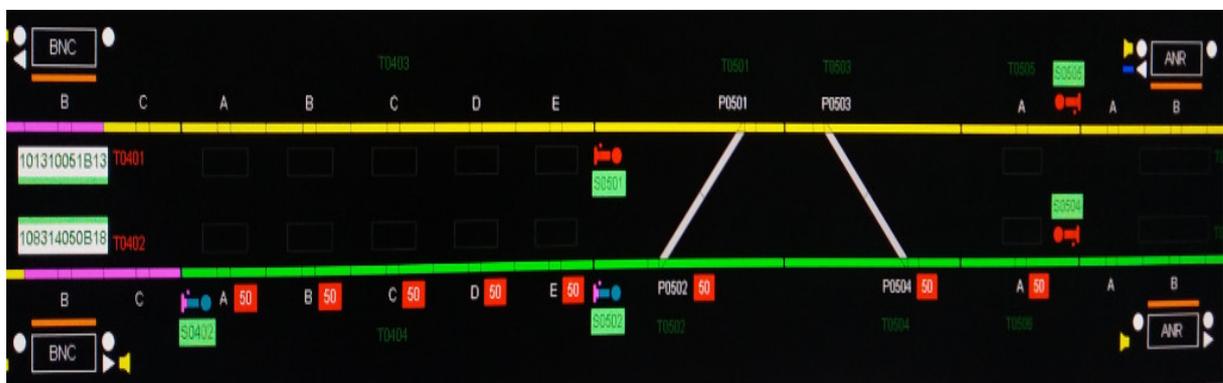


Figura 4 – Cenário de Rota Alinhada entre BNC e ANR: (A) SEM restrição de velocidade e (B) COM TSR de 50 Km/h em todo o trecho da rota

Com o sistema CBTC (Controle de Trens Baseado em Comunicação), as informações de restrição de velocidade estabelecidas em uma ou mais seções de via são enviadas desde o processamento central (sala técnica) para os controladores embarcados dos trens através da comunicação por radiofrequência das antenas de via com as antenas dos trens, conforme ilustrado na Figura 5, fazendo com que o perfil de velocidade máxima a ser perseguido pelo trem em condução automática (ATO) seja recalculado conforme as restrições estabelecidas.

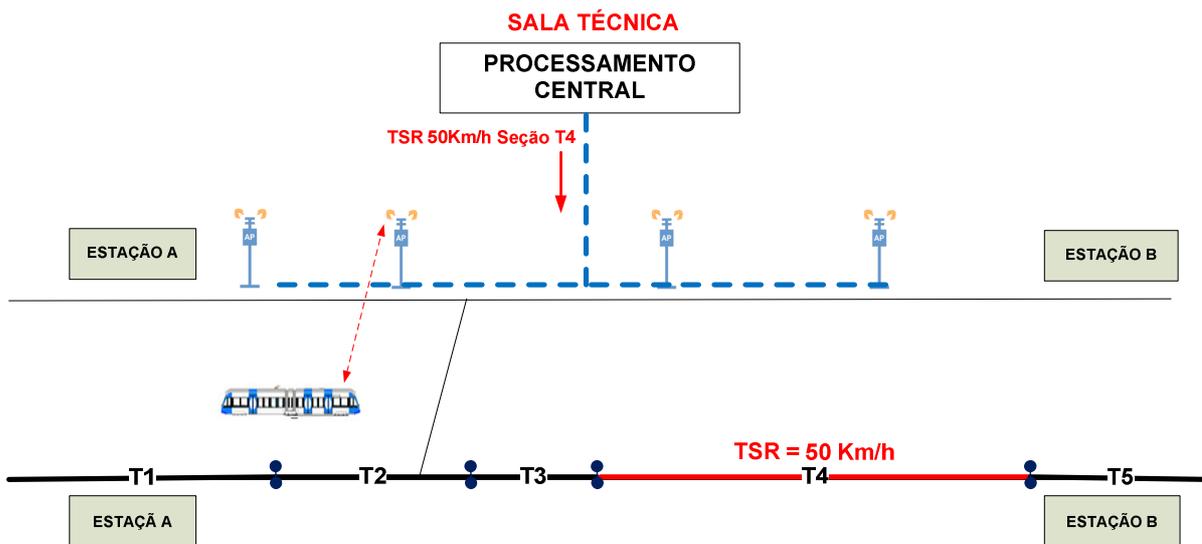


Figura 5 – Comunicação Trem com a Via no sistema CBTC

Foram coletados dados da passagem de um mesmo trem no trecho entre as estações Bonocô (BNC) e Acesso Norte (ANR) durante a operação comercial para os dois cenários estudados:

- Cenário SEM TSR: Trem do estudo partiu com condução automática (ATO) da plataforma de Bonocô às 21:33:42 e chegou na plataforma de Acesso Norte à 21:35:49 conforme dados da Tabela Horária do sistema de sinalização, totalizando 02 minutos e 07 segundos de viagem entre estações;
- Cenário COM TSR: Trem do estudo partiu com condução automática (ATO) da plataforma de Bonocô às 22:16:27 e chegou na plataforma de Acesso Norte à 22:13:41 conforme dados da Tabela Horária do sistema de sinalização, totalizando 02 minutos e 46 segundos de viagem entre estações.

Foram coletados dados de medição de tensão, corrente de linha de tração e velocidade de um trem específico durante operação. Os dados coletados são registrados a cada 250ms pelo sistema do trem, conforme especificação do fabricante [10].

A Figura 6 a seguir apresenta a variação de velocidade ao longo do tempo para os dois cenários de estudo considerados:

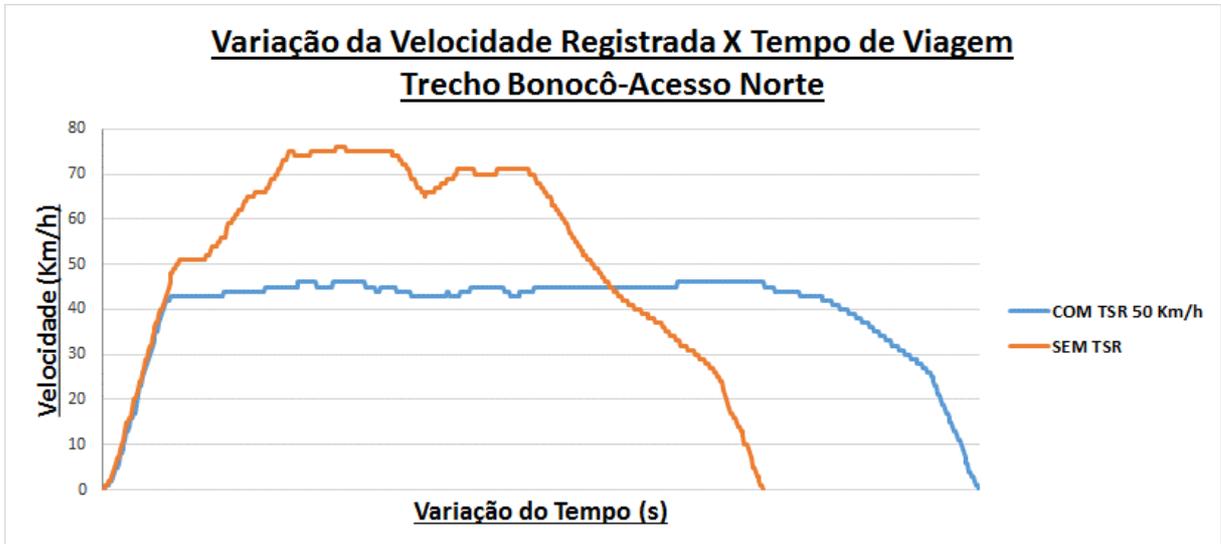


Figura 6 – Variação da Velocidade (Km/h) X Tempo de Viagem (s)

A Figura 7 a seguir apresenta a variação de corrente de tração ao longo do tempo para os dois cenários de estudo considerados:

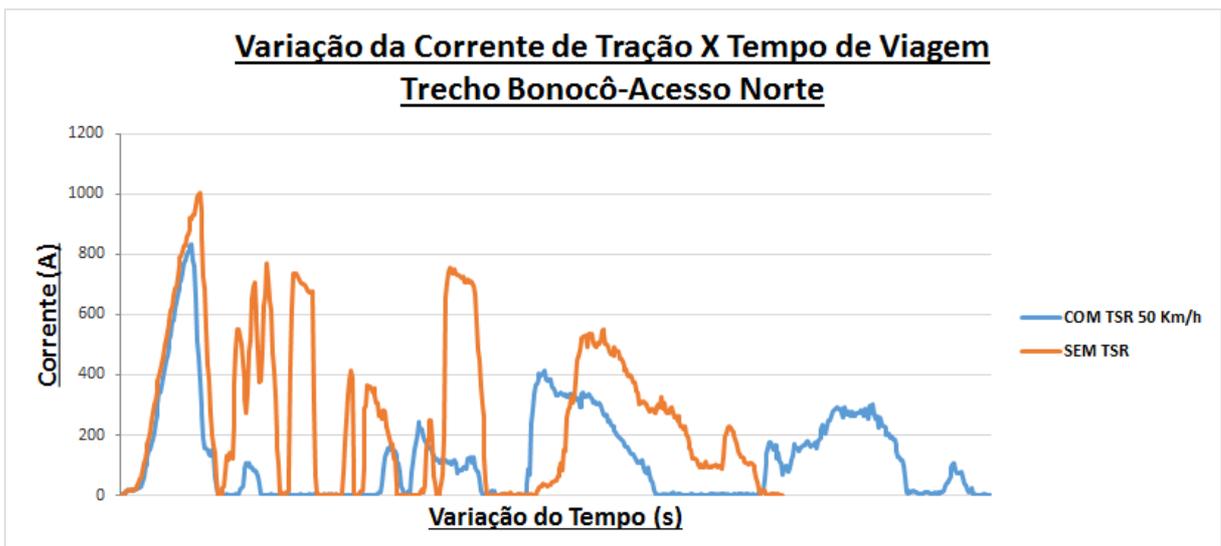


Figura 7 – Variação da Corrente (A) X Tempo de Viagem (s)

A Figura 8 a seguir apresenta a variação de potência registrada ao longo do tempo para os dois cenários de estudo considerados:

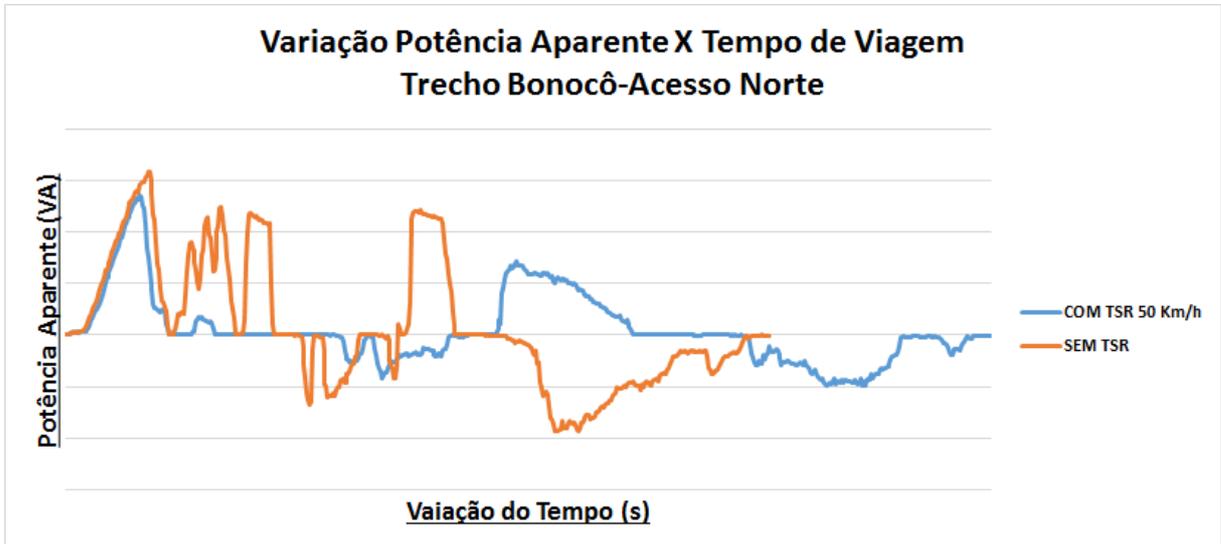


Figura 8 – Variação da Potência Aparante (VA) X Tempo de Viagem (s)

Para calcular o valor do consumo de energia (kWh) no trecho entre as estações Bonocô e Acesso Norte nos dois cenários foi considerada a seguinte modelagem matemática:

$$E (kWh) = \sum_{x=0}^n V(x) \times I(x) \times \cos \varphi \times \Delta t (x)$$

Onde:

- V(x): Tensão de Linha de Tração;
- I(x): Corrente de Linha de Tração;
- $\cos \varphi$ é o fator de potência correspondente à faixa de horário de medição do consumo de energia pela concessionária de energia;

- $\Delta t (x)$ corresponde ao tempo em que é considerado para se calcular os valores de tensão e corrente de linha de tração (valores médios da amostra);

- "n" é a quantidade de amostras em que foram registrados nos Logs extraídos do trem o efetivo consumo de energia (amostras de tensão e corrente que foram coletadas desprezando as amostras em que foram coletadas durante momentos de frenagem).

A Tabela Horária do sistema de sinalização foi coletada para este dia com os dados de partida/chegada dos trens em cada estação, com a finalidade de ser avaliado o impacto da aplicação da TSR no trecho em estudo em relação ao cumprimento do intervalo entre trens especificado para os horários vale.

A análise dos resultados é mostrado a seguir.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fórmula abaixo foi aplicada para os cenários COM e SEM a restrição de velocidade (TSR=50 Km/h) aplicada para um trem conduzido automaticamente (ATO) passando pelo trecho Bonocô-Acesso Norte para a obtenção do consumo de energia elétrica (kWh).

$$E (kWh) Economizada = \sum_{x=0}^n E (kWh) Com\ TSR(x) - \sum_{x=0}^n E (kWh) Sem\ TSR(x)$$

As informações listadas abaixo foram utilizadas como entrada de dados e/ou como premissas no cálculo da economia de kWh:

- O tempo de medição para obtenção das amostras de valores de tensão e corrente é de 250ms, conforme informação do fabricante do Material Rodante [10];

- O tempo total de uma volta completa na Linha 1 do Metrô Bahia para um trem circulando em automático (ATO) é da ordem de 36 minutos, conforme dados da Tabela Horária do sistema de sinalização;
- Com 5 trens no horário do vale o intervalo de trens praticado pela Tabela Horária da sinalização é de 7,2 minutos, sendo que para tal o tempo de descolamento de ida e volta do trem da última estação até a zona de manobra somados ao tempo de retenção (parado) na zona de manobra é da ordem de 4 minutos;
- A quantidade de trens que circula nos horários vale do Metrô Bahia (atualmente 5 trens);
- O valor da tarifa considerada de R\$/kWh é um valor médio praticado pela concessionária de energia;
- Diferentes intervalos de aplicação da TSR nos horários vale foram considerados (duas, quatro, seis e oito horas por dia);
- Foi considerado que não houve variação do fator de potência ($\cos \varphi$) entre o período das duas medições devido à proximidade das faixas de horário de medição.

Comparando os resultados dos dois cenários foi obtido o seguinte resultado:

- Uma diferença de consumo de energia da ordem de 7,06 kWh, o que percentualmente compreende 37,76% de redução no consumo de energia (kWh);
- Para a circulação SEM TSR foram registrados 185 amostras em que o trem estava "demandando potência de tração", e para o trem COM TSR foram registrados 239 amostras em que o trem estava "demandando potência de tração". A corrente (A) de

tração média SEM TSR foi de 452,55 A, sendo que a corrente média COM TSR foi de 210,58 A;

- A velocidade média SEM a aplicação da TSR foi da ordem de 52,96 Km/h, e COM a aplicação da TSR foi da ordem de 39,89 Km/h, uma redução de 24% na velocidade média.

A Tabela 2 a seguir apresenta uma projeção da economia de kWh e valores em reais (R\$) considerando a circulação com 5 trens nos horários de vale no trecho Bonocô - Acesso Norte.

A fórmula resume o cálculo realizado.

$$E (kWh) = 7,06 \times \frac{\Delta t \text{ Aplicação TSR}}{\Delta t \text{ Uma Volta}} \times N^{\circ} \text{ Dias} \times N^{\circ} \text{ Trens Horário Vale}$$

$$\text{Valor em R\$} = 0,3 \times E (kWh)$$

Onde:

7,06 kWh → representa a diferença do consumo de energia elétrica quando comparada o percurso no trecho Bonocô - Acesso Norte SEM e COM a restrição TSR de 50 Km/h;

R\$ 0,3 → Taxa praticada pela concessionária em horário Fora Ponta.

Tabela 2: Projeção - Circulação com 5 Trens nos Horários de Vale

Tempo de Uma Volta Completa (em minutos)	Número de Trens em Circulação	Tempo de Aplicação da TSR no Horário Vale (em minutos)	kWh economizado (mês)	R\$ economizado (ano)	R\$ economizado (5 anos)	R\$ economizado (10 anos)
36	5	120	3.531,02	R\$ 15.254,00	R\$ 76.269,99	R\$ 152.539,97
36	5	240	7.062,04	R\$ 30.507,99	R\$ 152.539,97	R\$ 305.079,95
36	5	360	10.593,05	R\$ 45.761,99	R\$ 228.809,96	R\$ 457.619,92
36	5	480	14.124,07	R\$ 61.015,99	R\$ 305.079,95	R\$ 610.159,89

Foram coletados os dados registrados da Tabela Horária do sistema de sinalização durante um intervalo de duração de cinco horas (Das 19:00 às 00:00) de operação comercial dentro

horário vale em que um trem ficou parado em zona de manobra devido a própria regulação da Tabela Horária, com os seguintes dados coletados:

- 41 trens passaram na zona de manobra;
- Em média o tempo de espera em zona de manobra foi de 02 minutos e 01 segundo.

Comparando o tempo de percurso entre as estações Bonocô e Acesso Norte SEM e COM TSR foi medido um intervalo de 39 segundo maior com a adição da TSR. Com a redução do tempo médio de permanência dos trens em zona de manobra, é possível mitigar o impacto do aumento do intervalo entre trens do tempo de percurso do trecho entre estações.

Apesar da proposta deste trabalho prevê a compensação de intervalo entre trens na zona de manobra foi realizada também duas projeções da economia de kWh e valores em reais (R\$) considerando um aumento da frota para 6 e 7 trens circulando no horário vale, conforme demonstrado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Projeção - Circulação com 6 e 7 Trens nos Horários de Vale

Tempo de Uma Volta Completa (em minutos)	Número de Trens em Circulação	Tempo de Aplicação da TSR no Horário Vale (em minutos)	kWh economizado (mês)	R\$ economizado (ano)	R\$ economizado (5 anos)	R\$ economizado (10 anos)
36	6	120	4.237,22	R\$ 18.304,80	R\$ 91.523,98	R\$ 183.047,97
36	6	240	8.474,44	R\$ 36.609,59	R\$ 183.047,97	R\$ 366.095,93
36	6	360	12.711,66	R\$ 54.914,39	R\$ 274.571,95	R\$ 549.143,90
36	6	480	16.948,89	R\$ 73.219,19	R\$ 366.095,93	R\$ 732.191,87

Tempo de Uma Volta Completa (em minutos)	Número de Trens em Circulação	Tempo de Aplicação da TSR no Horário Vale (em minutos)	kWh economizado (mês)	R\$ economizado (ano)	R\$ economizado (5 anos)	R\$ economizado (10 anos)
36	7	120	4.943,43	R\$ 21.355,60	R\$ 106.777,98	R\$ 213.555,96
36	7	240	9.886,85	R\$ 42.711,19	R\$ 213.555,96	R\$ 427.111,92
36	7	360	14.830,28	R\$ 64.066,79	R\$ 320.333,94	R\$ 640.667,88
36	7	480	19.773,70	R\$ 85.422,38	R\$ 427.111,92	R\$ 854.223,85

Nesses caso não há tempo de retenção em zona de manobra, o que faz com que o tempo de percurso com a adição da TSR não possa ser compensado, sendo incorporado ao intervalo entre trens. Considerando 6 trens em circulação o intervalo entre trens é da ordem de 6 minutos. Considerando 7 trens em circulação o intervalo entre trens é da ordem de 5,14 minutos. Nesse caso, a aplicação da restrição de velocidade (TSR) sem recuperação do intervalo de trens em zona de manobra como estratégia de tentativa de economia de energia elétrica nos horários vale ainda pode ser atrativa, caso o intervalo entre trens não ultrapassar os indicadores de desempenho perseguidos pelas operadoras.

CONCLUSÕES

Os resultados desse presente trabalho mostraram que a alteração em curvas de velocidade com a utilização do recurso de restrição de velocidade (TSR) do sistema CBTC em determinados trechos entre estações permite reduzir o consumo de energia de tração.

Para tal a redução de velocidade deve ser feita de maneira controlada, com a recuperação do intervalo entre trens através da redução do tempo de espera do trem em zona de manobra e/ ou com o monitoramento do aumento do intervalo entre trens para que o mesmo não ultrapasse os indicadores de desempenho perseguido pelas operadoras.

Como cenários de trabalho futuro, foi discutida a possibilidade de mapear variações bruscas no perfil de velocidade da condução automática do trem (ATO) existentes na linha como um todo, e realizar a aplicação de restrições de velocidade pontualmente onde houver variações bruscas de velocidade máxima e não apenas em um trecho completo entre estações, comparando a variação do consumo de energia elétrica (kWh) do antes e do depois das

alterações do perfil de velocidade máxima. Dessa forma será avaliada a possibilidade da redução do consumo de energia com um impacto menor no intervalo entre trens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. D. Van Der Bij, J. H. Van Schuppen, Power of Railway Power Demand, 1983.
- [2] M. Centra, Hourly Electricity Load Forecasting: Na Empirical Application to the Italian Railways, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2011.
- [3] Xiang Li, Hong K. Lo. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations, Transportation Research Part B 64, 2014.
- [4] Keiichiro Kondo, Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction Systems, IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, IEEJ Trans 2010; 5: 298–303.
- [5] F. Richard Yu, Advances in Communications-Based Train Control Systems, ISBN 9781138894501, 2017.
- [6] 1474 - IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, 2004.
- [7] MD-LP.00.LI/E.SC1-300 - Dados Vitais da Linha 1 do Metrô Bahia Rev.1 - Documento fornecido pela Siemens à CCR Metrô Bahia, 2017.
- [8] MD-GE.00.GE/E.SC0-305 - Memorial Descritivo do Sistema TGMT (Train Guard Mass Transit) Rev.1 - Documento fornecido pelo fornecedor do sistema de sinalização ao Metrô Bahia, 2017.

[9] MD-GE.00.MR/E.SC0-300 - Memorial Descritivo dos Dados Vitais do Trem Série 2000 ReV.1- Documento fornecido pelo fornecedor do sistema de sinalização ao Metrô Bahia, 2017.

[10] Technical Description of Equipment Systems, Chapter 6: Traction System, Rev.1 - Documento fornecido pelo fornecedor dos trens ao Metrô Bahia, 2017.