



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 2

ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL E AUMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM VAGÕES GRANELEIROS NO BRASIL

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário tem no combustível seu principal custo de operação. Em composições longas, características de nosso país, há uma grande quantidade de tipos de vagões, alguns projetados há muito tempo, empregando ferramentas que foram superadas pelo estado atual da técnica. Existe hoje um grande interesse, por parte das operadoras ferroviárias, em soluções que proporcionem uma redução no consumo de combustível durante a operação. Além da utilização de locomotivas mais novas e eficientes, deve-se também dar atenção especial para os vagões. Projetos mais recentes, além dos benefícios em questão de segurança operacional, são, em sua maioria, mais leves e possuem um design mais preocupado com a questão aerodinâmica.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 1 - Vagão graneleiro convencional. Fonte: Greenbrier Maxion.

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho, em termos de eficiência energética, de dois tipos de vagões graneleiros: um vagão convencional e um vagão desenvolvido recentemente pela empresa Greenbrier Maxion (GBMX) onde o aprimoramento aerodinâmico, otimização estrutural e aumento da eficiência volumétrica foram as principais premissas. A tabela 1 abaixo mostra os dados principais para os vagões em questão.

Tabela 1 – Propriedades dos vagões convencional e GBMX

Medida	Convencional	GBMX
Comprimento entre engates (mm)	17.100	16.500
Tara (kg)	28.800	28.200
Capacidade de carga (kg)	101.200	101.800
Peso bruto máximo (kg)	130.000	130.000

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Nota-se que o vagão GBMX, apesar de ser mais curto, possui uma capacidade de carga maior que um vagão convencional, conseguindo levar 600 quilos a mais. Considerando que um trem típico graneleiro no Brasil possui 80 vagões, a substituição dos vagões equivaleria a um ganho de 48 toneladas. Além disso, devido ao fato de ser mais curto, é possível aumentar o número de vagões no trem. Nesse sentido, uma composição com 83 vagões GBMX tem aproximadamente o mesmo comprimento que uma composta por 80 graneleiros convencionais, representando um ganho de capacidade de 353,4 toneladas por trem.



Figura 2 - Vagão graneleiro GBMX. Fonte: Greenbrier Maxion.

Além do aumento de capacidade, o vagão GBMX apresenta um melhor comportamento aerodinâmico, derivado de modificações feitas no seu design. Para quantificar este ganho, foram conduzidos testes de modelos em escala em um dos túneis de vento do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Os resultados indicaram que o

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

coeficiente de arrasto do vagão GBMX é cerca de 23% menor do que o de um graneleiro convencional.

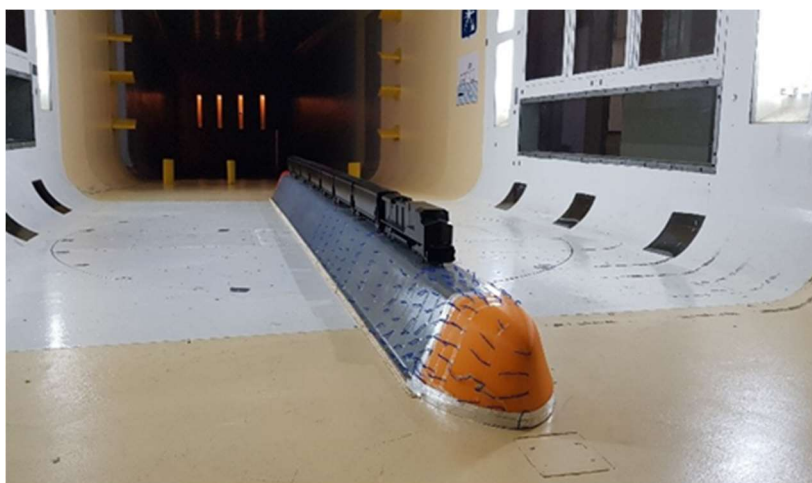


Figura 3 - Ensaio conduzido no túnel de vento. Fonte: Elaborada pelo autor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A força total resistiva ao movimento de um trem em via nivelada e tangente é dada pela seguinte equação, onde A, B e C são coeficientes que incluem as influências de atrito entre roda trilho, atrito nos mancais de rolamento, perdas dinâmicas e resistência aerodinâmica.

$$R = A + BV + CV^2 \quad (1)$$

Valores empíricos para os coeficientes foram propostos pela primeira vez por W. J. Davis em 1926 [1]. Dessa forma, a equação de resistência ao movimento do trem assumiu a seguinte forma, onde R é a resistência (libras/tonelada curta) w é o peso por



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

eixo (toneladas curtas/eixo), N o número de eixos, A_c é a área da seção frontal (pés ao quadrado), C_s é o coeficiente aerodinâmico e V é a velocidade (pés por segundo). A equação 2 foi determinada para vagões, enquanto a 3 para locomotivas.

$$R = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,045V + \frac{C_s A_c}{wN} V^2 \quad (2)$$

$$R = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,03V + \frac{C_s A_c}{wN} V^2 \quad (3)$$

A formulação original da equação de Davis deu resultados satisfatórios para a época. Porém, com os avanços técnicos e operacionais ocorridos na ferrovia, mostrou-se necessário o desenvolvimento de novos valores para as constantes. Dessa forma, duas grandes revisões foram feitas à equação, pela Association of American Railroads (AAR) [2] e pela Canadian National Railway (CN) [3]. As duas revisões estão baseadas em grandes quantidades de dados experimentais, incluindo testes em túnel de vento, roll down e dinamômetro.

A forma definida pela AAR (equação 4) negligencia o termo B da equação original, assumindo que tem uma relevância bem pequena para as vias americanas que seguem os padrões de qualidade da associação. O segundo termo do coeficiente A decresceu de 29 para 18 libras por eixo, refletindo o melhoramento nos rolamentos. O termo C, por sua vez, passa a incluir a densidade do ar ρ (slugs/pés ao cubo) e o coeficiente de arrasto C_d .



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

$$R = 1,3 + \frac{18}{w} + \frac{0,5\rho}{wN} aAc V^2 \quad (4)$$

A formulação definida pela CN (equação 5) mantém o termo B na equação, que assumiu um mesmo valor para locomotivas e vagões: 0,03. Assim como na equação definida pela AAR, o segundo termo do coeficiente A decresceu de 29 para 18. Porém, o primeiro termo do coeficiente A sofreu um aumento de 1,3 para 1,5. No termo C foi definido um coeficiente aerodinâmico tabelado para diferentes tipos de vagões. Na equação abaixo, R é a resistência (libras/tonelada curta), N é o número de eixos do vagão ou locomotiva, W é o peso total (tonelada curta), V é a velocidade (milhas por hora), C é o coeficiente tabelado definido pela CN e a é a área da seção transversal (pés ao quadrado).

$$R = 1,5 + \frac{18N}{W} + 0,03V + \frac{Ca}{10000W} V^2 \quad (5)$$

A figura 4 mostra a composição da resistência em função da velocidade para um vagão de carga comum. A figura 5 a influência percentual de cada componente na resistência total. Nota-se que o termo aerodinâmico, começa a ter uma influência considerável em velocidades acima de 60 Km/h.

Para estimar o consumo de combustível, é necessário estabelecer uma relação entre a resistência ao movimento do trem, o esforço trator da locomotiva e o perfil de operação da ferrovia.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

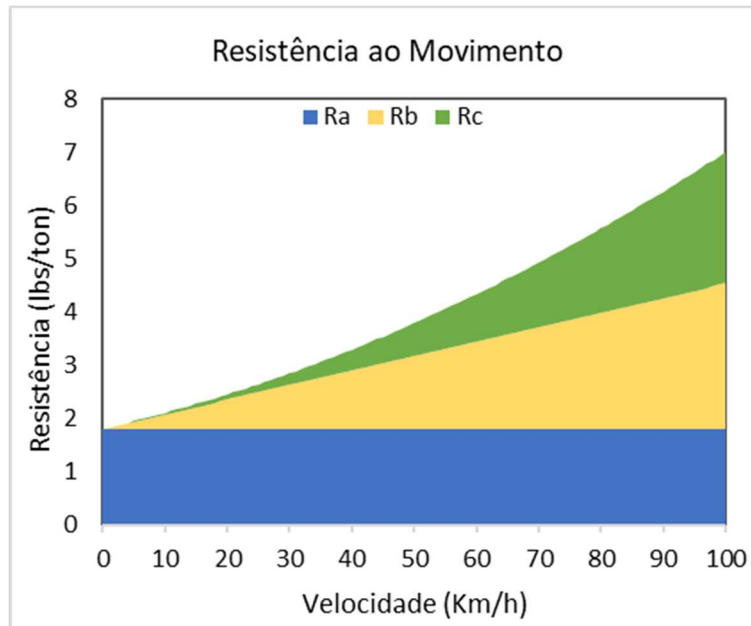


Figura 4 - Resistência ao movimento para um vagão comum. Fonte: Elaborada pelo autor.

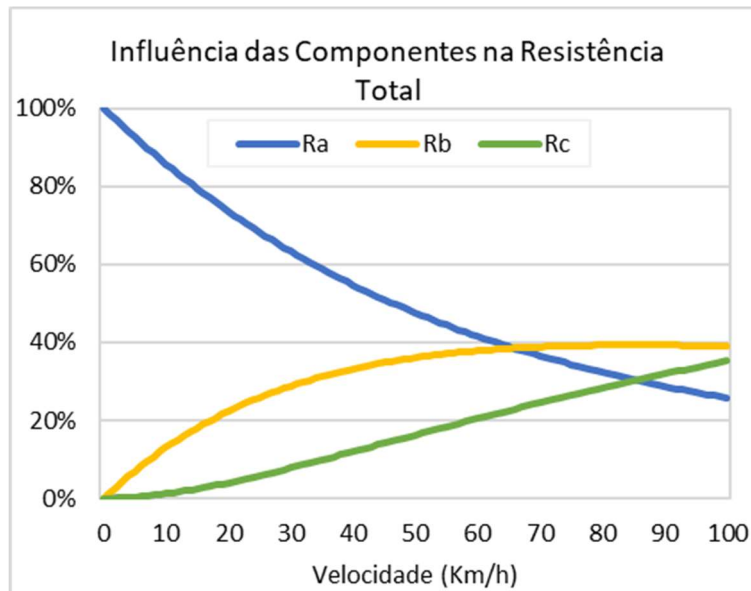


Figura 5 - Influência das componentes na resistência ao movimento. Fonte: Elaborada pelo autor.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.1 METODOLOGIA I

A Metodologia I é baseada em uma equação apresentada por Paul et al (2009). A equação estabelece uma correlação direta entre o consumo de combustível e as forças resistivas que atuam no trem. Ela vem de uma versão modificada da equação de Davis, assumindo que o trem está operando em uma via reta a uma velocidade constante.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Galões de combustível} \\ \text{por mil milhas} \end{array} \right] = K(0,0015W + 0,00256S_dV^2 + CW) \quad (6)$$

onde, K = combustível consumido por distância percorrida por unidade de resistência à tração; S_d = área de arrasto; W = massa do vagão; e C = fator de inclinação.

Os três termos à direita da equação 6 representam, respectivamente, a resistência ao rolamento, a resistência ao arrasto aerodinâmico e a inclinação da via. A área de arrasto do trem (S_d) é igual ao produto da área da seção transversal pelo coeficiente de arrasto. O termo K é uma constante determinada de forma experimental que representa um fator médio de consumo de combustível considerando diferentes tipos de locomotivas. Enquanto isso, o termo C indica o grau de inclinação em uma ferrovia e depende exclusivamente da geometria da via.

A equação 6 fornece o consumo de combustível a uma velocidade constante. Para aplicar esses resultados a uma operação real, é necessário somar as contribuições para o consumo de combustível em cada velocidade e, em seguida, multiplicá-las pela



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

distância percorrida naquela velocidade particular. Definindo ΔX_j como a distância que o trem percorreu a uma velocidade constante V_j , o consumo total de combustível pode ser calculado pela equação 7.

$$[\text{Consumo}] = K^* \sum_{j=1}^m \left[\frac{\Delta X_j}{1,000} \sum_{i=1}^n (0.0015W_i + 0.00256S_{d_i}V_j^2 + CW_i) \right] \quad (7)$$

2.2 METODOLOGIA II

O segundo método para calcular o consumo de combustível de um trem é baseado na Equação Modificada de Davis. Este método relaciona a resistência do trem ao movimento com o esforço de tração do trem (a potência disponibilizada pelas locomotivas). Para cada configuração de ponto de aceleração (1 a 8), a curva de esforço trator encontra a curva de resistência total ao movimento em uma velocidade específica. Esta velocidade é a máxima teórica que a composição pode atingir naquela configuração. Quanto menor a resistência do trem, maior será a velocidade alcançada para cada ponto de aceleração. Como o consumo da locomotiva é definido em litros por hora, quanto maior a velocidade, menor o tempo e conseqüentemente menor é o consumo.

A resistência total ao movimento pode ser calculada usando a Equação de Davis na sua forma revisada pela AAR. No entanto, nesta metodologia, o termo B que foi



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

originalmente suprimido será mantido como 0,03. Isso ocorre porque a qualidade da via férrea no Brasil não é tão alta quanto a das Ferrovias Classe I dos EUA. Assim, a partir da equação 4, a resistência total ao movimento de um trem é a soma das resistências individuais de cada vagão ou locomotiva, conforme indicado na equação 8, onde m é o número de locomotivas e vagões.

$$R_t = \sum_{i=1}^m W_m \left(1.3 + \frac{18}{w_i} + 0.03V + \frac{0.5\rho_i C_{di} A_{ci}}{w_i N_i} V^2 \right) \quad (8)$$

O próximo passo é determinar os pontos de interseção entre a curva de resistência total ao movimento e a curva de esforço trator das duas locomotivas. São ao total oito pontos de interseção, que significam a velocidade máxima teórica que o trem irá atingir em cada ponto de aceleração. Dessa forma, é possível estimar o consumo de combustível a partir da equação 9. ΔX_j é a distância percorrida no ponto j , V_j é a velocidade máxima teórica no ponto j e c_j é o consumo de combustível no ponto j .

$$[Consumo] = \sum_{j=1}^8 \left(\frac{\Delta X_j C_j}{V_j} \right) \quad (9)$$

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética do trem é calculada como a relação entre o consumo de combustível durante o trecho em que o trem está carregado e a capacidade de carga do trem (número de vagões multiplicada pela lotação de cada vagão).



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

$$Eficiência = \frac{\text{Consumo Carregado (litros)}}{\text{Capacidade de Carga (toneladas)}} \quad (10)$$

3. SIMULAÇÃO

Para avaliar a redução do consumo de combustível resultante da substituição de vagões graneleiros antigos pelo modelo novo GBMX, três diferentes configurações de trem foram simuladas. A primeira configuração consiste em 80 vagões antigos e 2 locomotivas (Trem A). A segunda consiste em 80 vagões GBMX e 2 locomotivas (Trem B), enquanto a terceira consiste em 83 vagões GBMX e 2 locomotivas (Trem C).

3.1 ESFORÇO TRATOR DE UMA LOCOMOTIVA

O esforço trator de uma locomotiva é a força fornecida à composição para retirar o trem da inércia, manter a velocidade constante ou para aumento de velocidade. Uma locomotiva diesel-elétrica possui oito pontos de aceleração. Cada ponto de aceleração define o esforço trator fornecido em cada velocidade, bem como a quantidade de combustível consumida naquele ponto. A figura 6 mostra, de forma gráfica, os dados de esforço trator para cada um dos oito pontos de uma locomotiva genérica diesel-elétrica de 4400 HP de potência. Já a tabela 2 mostra os dados de consumo de combustível.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

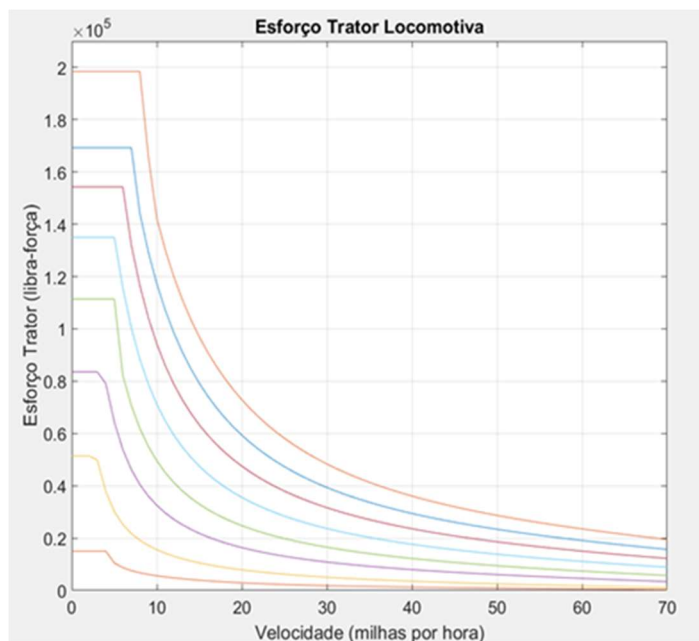


Figura 6 - Esforço trator de uma locomotiva para os diferentes pontos de aceleração.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Consumo da Locomotiva

Ponto	Consumo (litros/hora)
1	44,3
2	101,1
3	205,9
4	297,9
5	414,9
6	530,0
7	642,8
8	792,3



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

3.2 DADOS OPERACIONAIS

A precisão das simulações de consumo de combustível depende fortemente dos dados operacionais. A Figura 5 demonstra como os componentes da resistência do trem (A, B ou C) afetam a resistência total de maneira diferente dependendo da velocidade. No caso específico deste estudo, que se concentra nos efeitos aerodinâmicos, a velocidade desempenha um papel crítico.

As Figuras 7 e 8 mostram o histograma de velocidade de uma operação típica de trem no Brasil, revelando que a composição opera principalmente em velocidades abaixo de 50 km/h. Conforme a Equação de Davis, a resistência do trem nesta faixa de velocidades é atribuída principalmente aos termos A e B. Conseqüentemente, qualquer redução no consumo de combustível resultante de mudanças no coeficiente de arrasto pode ser menos significativa do que a própria diminuição do coeficiente de arrasto.

O primeiro método de análise usa diretamente os dados de velocidade mostrados anteriormente. O Método II, por outro lado, requer o processamento e correlação das velocidades com o ponto de aceleração da locomotiva. Uma aproximação precisa ser feita neste caso. Considerando o trem composto por 80 vagões convencionais e 2 locomotivas como referência, determina-se os pontos de interseção entre as curvas de esforço trator e resistência ao movimento. Esses pontos representam a velocidade máxima permitida que um trem atingirá naquela configuração. Definindo

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

os 7 pontos de interseção, reordena-se os dados de velocidade, obtendo um histograma de distância percorrida por ponto de aceleração da locomotiva.

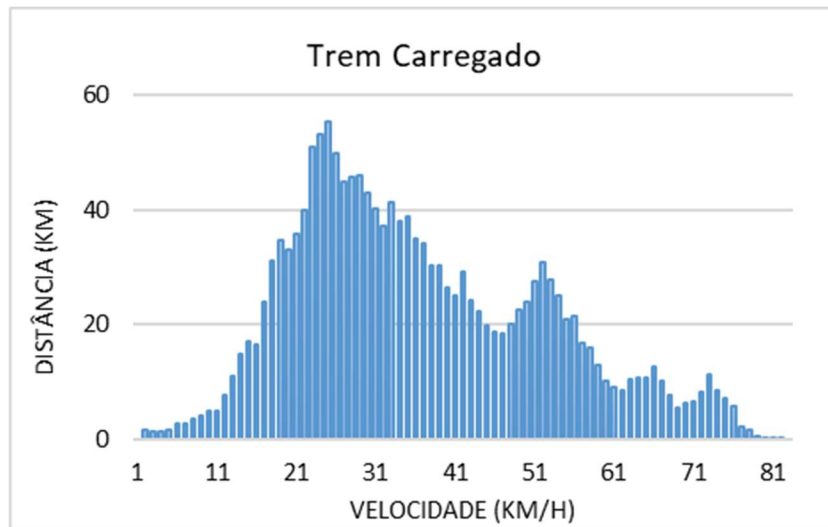


Figura 7 – Perfil de velocidade para um trem genérico carregado. Fonte: Elaborada pelo autor.

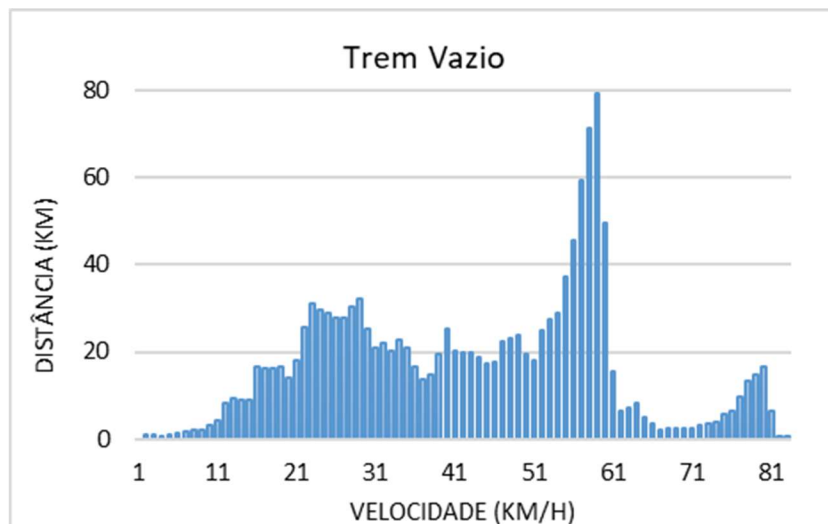


Figura 8 – Perfil de velocidade para um trem genérico vazio. Fonte: Elaborada pelo autor.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4. RESULTADOS

As duas metodologias produziram estimativas variadas para o consumo de combustível durante um ciclo completo de operação, ida carregado e volta vazio. A Metodologia I resultou em uma estimativa média de consumo de combustível 19,2% maior do que a Metodologia II. Dado que cada método possui características específicas, é razoável esperar estimativas divergentes. A principal razão para essa discrepância reside nas propriedades distintas das locomotivas utilizadas. A Metodologia I incorpora um fator constante (K) que leva em consideração o consumo médio medido por diferentes tipos de locomotiva representativas da operação ferroviária dos Estados Unidos, enquanto a Metodologia II utiliza uma curva genérica de esforço de tração de uma locomotiva de 4,400 HP, considerando os diferentes pontos de aceleração disponíveis.

Embora haja uma diferença nos valores absolutos, ambos os resultados indicam a mesma tendência. A Metodologia I mostra que um trem composto por 80 vagões GBMX (Trem B) consome 3,1% menos combustível do que um trem composto por 80 vagões convencionais (Trem A). Enquanto isso, a Metodologia II sugere que tal trem consumiria 2,3% menos combustível. Se considerarmos um trem composto por 83 vagões GBMX (Trem C), o consumo de combustível seria quase o mesmo que o de um

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

trem de 80 vagões convencionais (Trem A), com a Metodologia I estimando uma redução de 0,3% e a Metodologia II indicando um aumento de 0,1%.

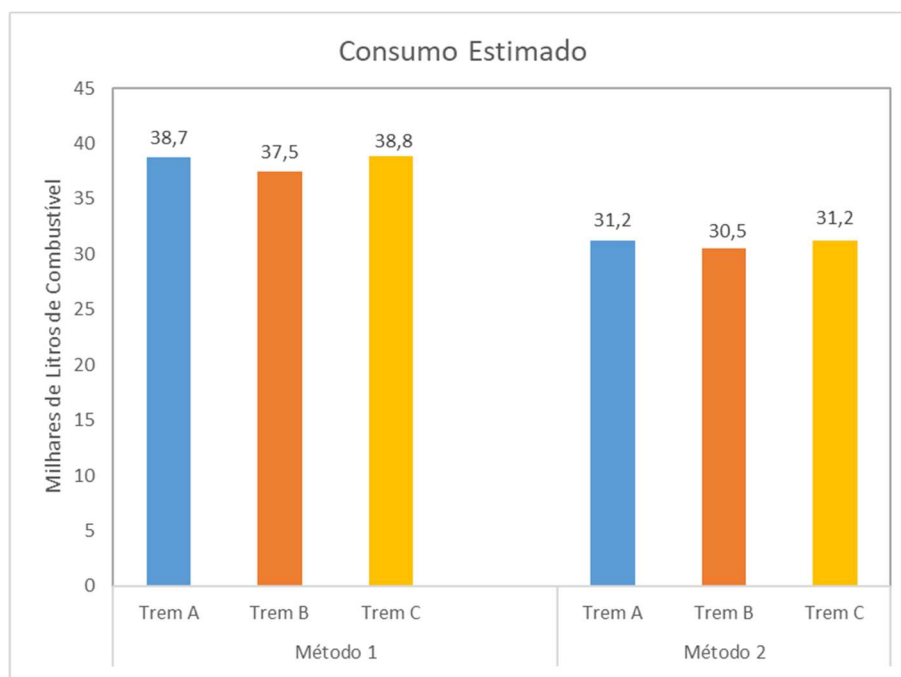


Figura 9 – Consumo estimado para Trem A (80 vagões convencionais), Trem B (80 vagões GBMX) e Trem C (83 vagões GBMX).

Analisando a eficiência energética, definida como a quantidade de combustível consumida pela capacidade de carga, ocorre também um ganho expressivo. Um trem B composto por 80 vagões GBMX tem uma eficiência energética 3,7% maior do que a de um trem A de 80 vagões convencionais na Metodologia I. Para um trem C de 83 vagões GBMX, a eficiência energética seria 4% maior. A mesma comparação usando a

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Metodologia II estima um aumento de 2,9% para 80 vagões GBMX e um aumento de 4,5% para 83 vagões GBMX.

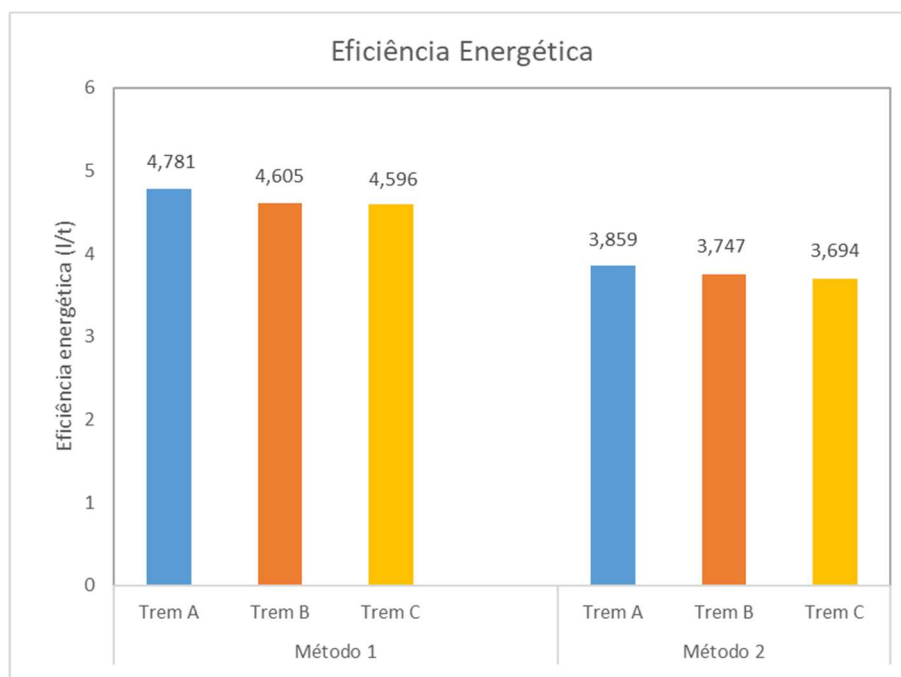


Figura 10 – Eficiência energética estimada para Trem A (80 vagões convencionais), Trem B (80 vagões GBMX) e Trem C (83 vagões GBMX).

A Figura 10 mostra os resultados obtidos para a eficiência energética. É importante notar que, como essa métrica é definida como a quantidade de combustível consumida para transportar uma tonelada de carga, um valor menor de eficiência energética indica uma operação mais eficiente. Um trem B, composto por 80 vagões GBMX, consome menos combustível e pode transportar mais carga (cada vagão GBMX tem uma capacidade de carga 600 kg maior do que os vagões convencionais), proporcionando, portanto, uma melhoria na eficiência.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Um trem C, composto por 83 vagões GBMX, de acordo com as simulações apresentadas na figura 9, consome quase a mesma quantidade de combustível que um trem A, composto por 80 vagões convencionais. Além disso, a capacidade de carga do trem mais longo é 353 toneladas maior, o que produz os melhores valores de eficiência energética entre as configurações simuladas.

5. CONCLUSÃO

As simulações apresentadas neste relatório mostram resultados promissores. Um trem de 80 vagões composto por vagões GBMX modernos e recém-desenvolvidos apresenta uma redução estimada entre 2,3% e 3,1% no consumo de combustível se comparado a um trem com 80 vagões convencionais. Além disso, o vagão GBMX pesa 600 kg a menos, permitindo que mais carga seja transportada em cada trem, levando a um aumento na eficiência energética, definida como a razão entre o consumo e a quantidade de carga transportada, entre 2,9% e 3,7%.

Considerando ainda um trem composto por 83 vagões GBMX, que tem o mesmo comprimento que um trem composto por 80 vagões convencionais, nota-se uma tendência de manutenção da quantidade de combustível consumida, com estimativas entre 0,1% de aumento e 0,3% de redução. A adição de 3 vagões ao trem, porém, gera



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

um alto ganho na quantidade de carga transportada, levando essa configuração a apresentar um ganho entre 2,9% e 4,5% na eficiência energética.

É claro, pelo perfil de velocidade de uma operação ferroviária padrão no Brasil, que a redução da resistência aerodinâmica não conseguiu atingir todo o seu potencial. No entanto, uma redução significativa no consumo de combustível ainda pode ser alcançada. Dito isso, é evidente que este estudo tem o potencial de trazer benefícios financeiros e operacionais significativos para os operadores ferroviários brasileiros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baker, C.J. & Brockie, N.J. 1991. Wind tunnel tests to obtain train aerodynamic drag coefficients: Reynolds number and ground simulation effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 38 (1991) 23-28 Elsevier Science Publishers.
- Bécsi, T. & Aradi, S. 2017. Energy Saving Possibilities at the Hungarian State Railways. 20th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2017, 4-6 September 2017, Budapest, Hungary.
- Davis, W.J., Jr. 1926. The Traction Resistance of Electric Locomotives and Cars. *General Electric Review*, Vol. 29.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Furlong, C.F., Gielow, M.A., Gielow, R.L., Paul, J.C., & Nelson, R.L. 1988. Results of Wind Tunnel and Full-Scale Tests Conducted from 1983 t 1987 in Support of The Association of American Railroad's Train Energy Program. Airflow Sciences Corporation Report Number R-88-010. AAR Report R-685.

Hungria, L. 2017. Segurança operacional de trens de carga.

Hungria, L. 2021. Resistência ao movimento do trem.

Paul, J., Johnson, R.W., & Yates, R. G. 2009. Application of cfd to rail car and locomotive aerodynamics. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, 41.

Rochard, B.P. & Schmid, F. 2000. A review of methods to measure and calculate train resistances. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 2000 214: 185.

Tolliver, D., Lu, P. & Benson, D. 2013. Analysis of Railroad Energy Efficiency in the United States. MPC Report No. 13-250.

Watkins, S., Saunders, J.W. & Kumar, H. 1992. Aerodynamic drag reduction of goods trains. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40 (1992) 147-178.Elsevier.