

Modelagem Energética para Veículos Ferroviários de Passageiros

Ryan David Earl¹, Philipe Augusto de Paula Pacheco^{2,3}, Leonardo Bartalini Baruffaldi⁴, Auteliano Antunes dos Santos⁵

¹Laboratório Ferroviário, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Brasil. Email: r230367@dac.unicamp.br

²Laboratório Ferroviário, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Brasil. Email: p235226@dac.unicamp.br

³Engenharia Ferroviária, Departamento de Ferrovia, IF Sudeste MG, Brasil. Email: philipe.pacheco@ifsudestemg.edu.br

⁴Faculdade de Engenharia Mecânica, IFSP Hortolândia, Brasil. Email: leonardo.baruffaldi@ifsp.edu.br

⁵Laboratório Ferroviário, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Brasil. Email: aute@fem.unicamp.br

Resumo

A melhoria da segurança operacional e da eficiência energética do transporte ferroviário de passageiros é um requisito importante para os operadores. Assim, avaliar a perda de energia é um fator crítico a ser estudado. Neste artigo é apresentada uma abordagem para determinar as perdas de energia dos diferentes componentes de um veículo de passageiros. Empregando modelagem de dinâmica multicorpos, um trecho medido de 33 km de uma ferrovia compartilhada de carga/passageiros no Brasil foi utilizado para determinar as principais fontes de dispêndio de energia durante a operação, que incluem o contato roda/trilho, a suspensão do veículo e os elementos de conexão entre veículos. Um vagão com truque Y32RS de bitola métrica com capacidade para 80 passageiros foi modelado. O estudo inclui tanto a dinâmica lateral como a longitudinal, levando em conta as irregularidades das vias. O consumo de energia por elemento foi analisado para determinar as perdas de eficiência no uso de combustível decorrentes das características de operação do veículo. Além disso, a metodologia proposta pode ser aplicada para otimizar outros parâmetros de veículos ferroviários visando a economia de energia.

Palavras-chave: dinâmica multicorpos; eficiência energética; economia de combustível; ferrovia.

Abstract

The improvement of operational safety and energy efficiency in passenger rail are important requirements for railway operators. For this reason, analyzing the energy losses in the system is a critical factor. This article presents an approach to determine the energy losses in the different components of a passenger vehicle. Using multibody dynamics modeling, a 33 km section of a shared cargo/passenger railroad was utilized to determine the main sources of energy loss in operation. These sources include the wheel/rail contact, the vehicle suspension, and the connection devices between vehicles. A wagon equipped with Y32 RS, metric gauge, bogies with an 80-passenger capacity was modeled. The study includes both the lateral and longitudinal dynamics, while considering the track irregularities. The energy consumption per vehicle element was analyzed to determine the fuel efficiency losses during operation. Also, the proposed methodology could be used to optimize railway vehicle parameters in relation to energy savings.

Keywords: multibody dynamics; energy efficiency; fuel savings; railway

1. Introdução

O transporte ferroviário é altamente econômico em termos de energia, com várias vantagens sobre os demais tipos de modais. No entanto, devido ao grande arrasto aerodinâmico e ao material rodante muitas vezes ineficiente e de tecnologia antiga, há muito

espaço para melhorar a eficiência energética dessa modalidade de transporte [1].

De acordo com Wu, Luo e Cole [2] medidas de otimização energética da composição ferroviária são exigidas tanto pelos operadores como pelos fabricantes. Ainda segundo os autores, todas as medidas de economia de energia têm de garantir

segurança da operação ferroviária. Dessa forma, o ideal é minimizar o uso de energia e ao mesmo tempo melhorar o desempenho dinâmico dos veículos e composições ferroviárias [3].

Os trabalhos recentes demonstram que há uma tendência para o desenvolvimento de estudos para otimizar o sistema ferroviário, principalmente adotando técnicas de programação matemática, como uso de modelos numéricos e algoritmos para resolver problemas ferroviários de larga escala. Saprónova et al. [4] propuseram um método matemático para análise de energia aplicada ao material rodante. Os resultados dos modelos desenvolvidos revelaram detalhes sobre a resistência dinâmica ao movimento para o material rodante estudado. Em função dos resultados obtidos, foi proposto um arranjo de que reduziu a resistência total ao movimento entre 8% e 20%, e, promoveu uma economia de combustível e eletricidade para composições entre 5% e 12%. Semenov et al. [5], também com a ajuda de modelagem matemática, realizaram estudos de resistência ao movimento de um vagão com rodas com diferentes geometrias. Foram comparados dois designs de rodas: uma roda tradicional (TWD) e uma roda com um novo design (PWD). Os resultados revelaram as vantagens potenciais da utilização de rodas PWD em truques de vagões ferroviários, uma vez que levam à redução da resistência ao movimento. Zhang, Tang e Peng [6] propõem uma metodologia eficaz para diminuir o consumo de energia, otimizando os coeficientes de amortecimento do veículo. A redução dos consumos de energia cinética e energia de tração foram selecionados como objetivos de pesquisa, com a segurança e o conforto considerados como restrições básicos. Para cada tipo de amortecedor da suspensão, o efeito do seu coeficiente de amortecimento (DC) no objetivo da pesquisa foi estudado por simulações. Foi demonstrado que o modelo de veículo otimizado pode diminuir em quase 4% o consumo de energia. Além disso, a abordagem proposta também pode ser utilizada para otimizar outros parâmetros de um veículo ferroviário para redução global da energia dispendida.

Apesar do grande número de pesquisas envolvendo modelos matemáticos para simulações aplicadas às ferrovias, a maioria desses modelos visa a otimizar a operação ferroviária (carta de velocidades, carga, etc.) ou reduzir a resistência ao rolamento no contato roda-trilho (R/T). Com exceção do trabalho de Zhang, Tang e Peng [6], não são encontrados na literatura modelos desenvolvidos para medir o consumo energético do vagão, considerando a influência dos seus mais diversos componentes, como a suspensão primária e secundária, prato pião, conjunto de choque e tração

(CCT), e o contato entre a roda e o trilho (R/T). De acordo com Saprónova et al. [4] é muito importante prever o consumo energético do material rodante ainda durante a fase de projeto, para uma melhor definição das características dos componentes. Além disso, a predição do consumo energético do vagão pode servir como ferramenta para a definição dos limites de manutenção dos componentes do veículo, somando-se aos associados à confiabilidade dos sistemas.

Para superar as limitações mencionadas com relação à predição do consumo energético do vagão, o presente artigo propõe uma metodologia generalizada para obtenção do consumo energético em cada componente do vagão. Simulações dinâmicas multicorpos são utilizadas para aplicar o método proposto em uma composição que trafega em um trecho de via real.

Na sequência deste trabalho, a seção 2 apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa. Os resultados são apresentados e discutidos na seção 3, enquanto as conclusões são apresentadas na seção 4.

2. Metodologia

Na indústria ferroviária, softwares de dinâmicos multicorpos são amplamente utilizados para estudar a interação veículo/via. O software VAMPIRE® é um dos mais aplicados devido ao seu menor custo computacional, pois utiliza uma abordagem off-line para o cálculo do contato roda-trilho, ou seja, utiliza valores de interpolação a partir de tabelas pré-calculadas. Esse método é conhecido como *look up tables* (LUT) [7].

Nesta seção é apresentado o modelo dinâmico, com foco na análise de energia. A seção está organizada da seguinte forma: O modelo dinâmico do vagão utilizando o software comercial VAMPIRE® é apresentado na Seção. 2.1. A Seção 2.2 apresenta uma explicação resumida do cálculo energético utilizado neste estudo. Em 2.3 são apresentados os parâmetros avaliados na análise, como traçado da via, velocidade, etc.

2.1. Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico construído no VAMPIRE® é baseado nos veículos de passageiros utilizados na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) no Brasil. O veículo tem capacidade para 80 passageiros e é montado em dois truques Y32RS de bitola métrica (1.0 m), cada um com dois rodeiros. O modelo simulado conta com uma locomotiva e três vagões de passageiros (Figura 1).

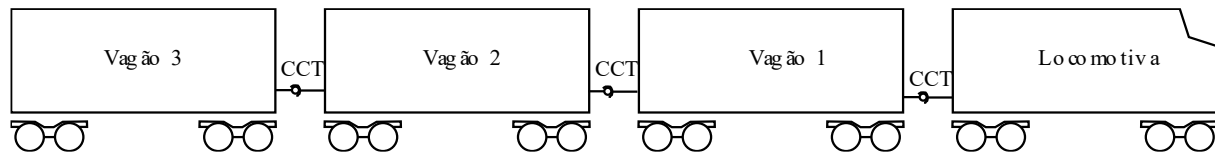


Figura 1. Composição com uma locomotiva e três vagões interligados por CCTs.

O modelo do vagão consiste em três massas: a caixa do vagão, o truque de ataque, e o truque de arrasto. A primeira caixa está conectada ao referencial inercial por uma mola (elemento de rigidez) e por um amortecedor. As caixas são conectadas aos truques com múltiplos elementos de força. Esses elementos de força são iguais em cada um dos truques e incluem 3 elementos tipo *PIN LINK*, 2 elementos tipo *SHEAR SPRING*, 1 elemento *BUSH*, e 1 elemento de rigidez (que atua como batente lateral). Cada truque é conectado aos 2 rodeiros com 4 elementos de *SHEAR SPRING* e 4 elementos de *DAMPER* como mostrado na Figura 2.

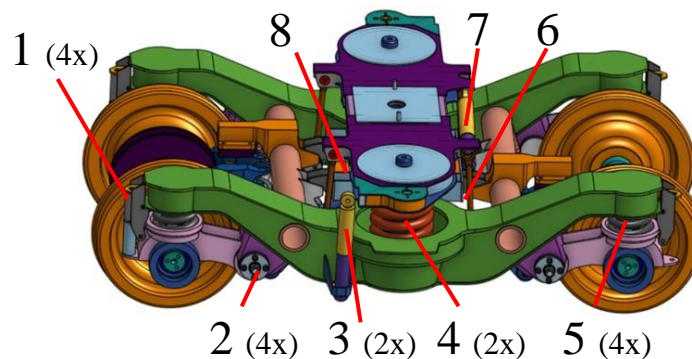


Figura 2. Modelo de truque Y32. 1 – Amortecedor da suspensão primária; 2 – Bucha de bandejas; 3 – Amortecedor vertical da suspensão secundária; 4 – Mola da suspensão secundária; 5 – Mola da suspensão primária; 6 – Barra anti-rolagem e junta Watt; 7 – Amortecedor vertical da suspensão secundária; 8 – Prato pião. Fonte: elaboração própria.

As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, os valores de propriedades de inércia e mecânicas utilizadas na confecção do modelo multicorpos. As curvas de elementos não lineares são dispostas na Figura 3.

Tabela 1. Propriedades de massa e inércia do modelo de carro de passageiros vazio e carregado.

Nome	Componente	Vazio	Carregado
Caixa	M (t)	25,81	37,00
	Ixx (Mg/m ²)	52,00	61,00

Truque	Iyy (Mg/m ²)	1518	1930
	Izz (Mg/m ²)	1518	1930
	CGz (m)	1,927	1,593
	M (t)	1,918	-
Truque	Ixx (Mg/m ²)	1,056	-
	Iyy (Mg/m ²)	1,413	-
	Izz (Mg/m ²)	2,366	-

	CGz (m)	0,560	-
Rodeiro	M (t)	1,203	-
	Iyy (Mg/m ²)	0,090	-
	Izz(Mg/m ²)	0,319	-
	CGz (m)	0,419	-

Tabela 2. Propriedades mecânicas do modelo de truque.

ID	Elemento	Componente	Valor
1	<i>DAMPER</i>	K _z (kN/m)	0,001
		D _z (kN.s/m)	3734
2	<i>BUSH</i>	K _x (kN/m)	50,0
		K _y (kN/m)	5,00
		K _z (kN/m)	50,0
		K _t (kN.m/rad)	5,73
		K _p (kN.m/rad)	4,01
		K _w (kN.m/rad)	5,73
		D _x (kN.s/mm)	0,015
		D _y (kN.s/mm)	0,005
		D _z (kN.s/mm)	0,020
		K _x (kN/mm)	60,0
		K _y (kN/mm)	6,50
		K _z (kN/mm)	100
3	<i>PINLINK</i>	K _y (kN/mm)	6,00
		D _y (kN.s/mm)	Figura 3
4	<i>SHEAR SPRING</i>	K _x (kN/mm)	0,15
		K _y (kN/mm)	0,15
		K _z (kN/mm)	0,56
5	<i>PINLINK</i>	K _z (kN/mm)	6,00
		D _z (kN.s/mm)	Figura 3

6	<i>SHEAR SPRING</i>	K _x (kN/mm)	0,80
		K _y (kN/mm)	0,80
		K _z (kN/mm)	0,71
7	<i>BUSH</i>	K _x (kN/mm)	5,00
		K _t (kN.m/rad)	2,20
		D _x (kN.s/mm)	0,025
		K _x (kN/mm)	10,0
8	<i>BUMPSTOP</i>	K _y (kN/mm)	0,7
		Folga (mm)	20,0

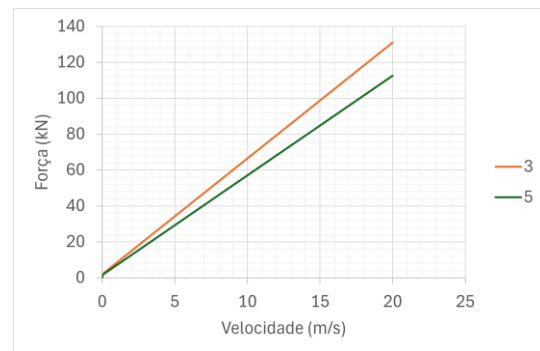


Figura 3. Não-linearidade: 3 – amortecedor lateral da suspensão secundária; 5 – amortecedor vertical da suspensão secundária.

O modelo do CCT consiste em duas massas conectadas entre si e aos veículos adjacentes por elementos de força. Esses elementos de força são iguais em cada um dos truques e incluem 3 elementos tipo *BUSH*, 1 elemento de *PINLINK*, e 1 elemento de *BUMPSTOP*.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do modelo de CCT.

Elemento	Componente	Valor
<i>BUSH</i>	K _x (kN/m)	0
	K _y (kN/m)	0,010
	K _z (kN/m)	0,010
	K _t (kN.m/rad)	0
	K _p (kN.m/rad)	0,010
	K _w (kN.m/rad)	0
	D _x (kN.s/mm)	0
	D _y (kN.s/mm)	0,025

	D_z (kN.s/mm)	0,025
	D_t (kN.s/mm)	0
	D_p (kN.s/mm)	0,025
	D_w (kN.s/mm)	0
<i>BUSH</i>	K_x (kN/m)	0,010
	K_y (kN/m)	0,010
	K_z (kN/m)	0,010
	K_t (kN.m/rad)	0
	K_p (kN.m/rad)	0,010
	K_w (kN.m/rad)	0
	D_x (kN.s/mm)	0,025
	D_y (kN.s/mm)	0,025
	D_z (kN.s/mm)	0,025
	D_t (kN.s/mm)	0
	D_p (kN.s/mm)	0,025
	D_w (kN.s/mm)	0
<i>BUSH</i>	K_x (kN/m)	0,010
	K_y (kN/m)	0,010
	K_z (kN/m)	0
	K_t (kN.m/rad)	0
	K_p (kN.m/rad)	0,010
	K_w (kN.m/rad)	0,010
	D_x (kN.s/mm)	0,025
	D_y (kN.s/mm)	0,025
	D_z (kN.s/mm)	0
	D_t (kN.s/mm)	0
	D_p (kN.s/mm)	0,025
	D_w (kN.s/mm)	0,025
<i>PINLINK</i>	K_x (kN/mm)	0,010
	D_x (kN.s/mm)	0,025

<i>BUMPSTOP</i>	K_x (kN/mm)	0,315
-----------------	---------------	-------

2.2. Modelo de energia

Com base em estudos anteriores [2, 6, 8], a dissipação de energia ocorre principalmente pela força de atrito entre roda e trilho, pela força de amortecimento na suspensão e no CCT, podendo ser facilmente expressa.

2.2.1. Roda-Trilho (R/T)

A dissipação de energia local na área de contato é o produto escalar do escorregamento local e da tensão tangencial local, de modo que a energia total dissipada em toda a área de contato é igual à integral de superfície da energia local [9, 10]. Consequentemente, a potência dissipada em decorrência do trabalho de atrito é dada pela equação (1):

$$Q_{R/T} = \int_0^t (|F_x v_x| + |F_y v_y| + |M_z \phi_z|) V dt \quad (1)$$

onde F_x , F_y e M_z são a força longitudinal, a força lateral e o momento de rotação na área de contato, enquanto v_x , v_y e ϕ_z são os escorregamentos longitudinal, lateral e de rotação, respectivamente.

2.2.2. Suspensão

Como mostrado na seção 2.1, cada elemento da suspensão é composto por uma mola e um amortecedor. Dessa forma, a energia dissipada pela suspensão pode ser expressa como [6]:

$$Q_s = \int_0^t ([K_s] \cdot [D] \cdot [\dot{D}] + [C_s] \cdot [\dot{D}] \cdot [\dot{D}]) dt \quad (2)$$

onde $[K_s]$ e $[C_s]$ denotam respectivamente a matriz de rigidez e amortecimento da suspensão, $[D]$ e $[\dot{D}]$ denotam respectivamente a matriz de deslocamento e velocidade dos dois objetos que estão conectados pela suspensão.

2.2.3. CCT

Energia também é dissipada pelos dispositivos do CCT. De acordo com Wu et al [2], esses dispositivos podem absorver energia do sistema ferroviário durante a carga e podem liberar energia para o sistema ferroviário na descarga. A diferença de energia entre o processo de carga e o processo de descarga é a energia dissipada pelo CCT. O componente de energia do CCT é calculado usando a equação (3):

$$Q_{ACT} = \int_0^t \sum \sin(xv) abs(F_c \Delta x) dt \quad (3)$$

onde x é a deflexão do par de CCT de tração; v é a velocidade relativa de dois veículos adjacentes; F_c é a

força do acoplador; Δx é a mudança de deflexão do par de CCT de tração durante o intervalo de tempo atual.

2.3. Parâmetros do estudo

Este estudo utiliza um trecho de uma ferrovia brasileira com extensão de 33.9 km e, com raio mínimo de curva

de 194 m. A linha tem bitola métrica e tráfego misto, incluindo trens de passageiros e de carga. A curvatura e a superelevação da pista são mostradas na Figura. 4, respectivamente. A velocidade de 50 km/h é constante.

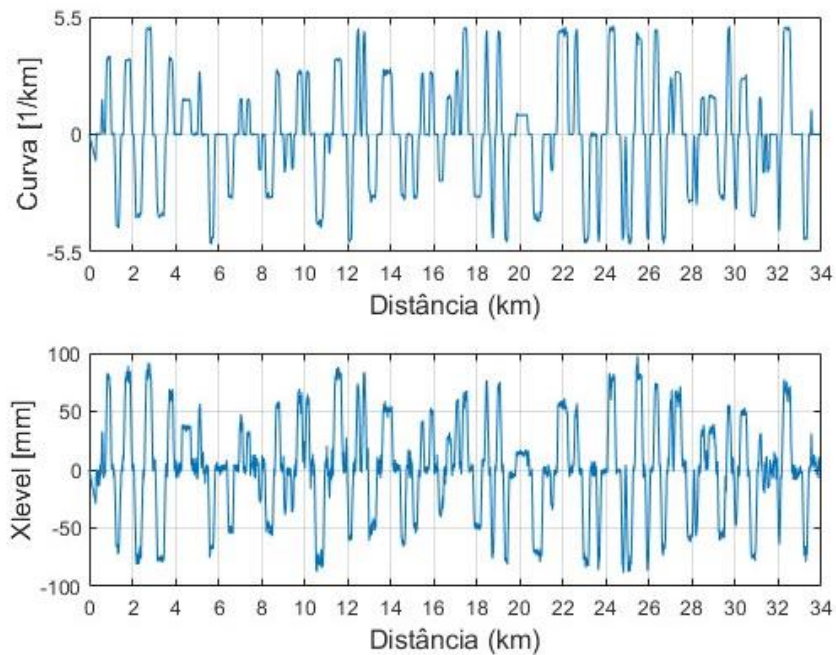


Figura 4. O perfil de curvatura e superelevação da via utilizada.

Os dados macrogeométricos do trecho ferroviário foram obtidos a partir de medições de campo e incluem as irregularidades reais.

3. Resultados

A energia dissipada total durante a viagem é mostrada na Figura 5. Como esperado a condição com o vagão carregado dissipa mais energia do que a condição vazia. De acordo com Jerrelind et al [11], a economia de energia devido aos vagões mais leves deve-se, em parte, à menor resistência ao rolamento, incluindo a resistência às curvas, e à menor resistência à inclinação, mas a principal economia está associada a menores perdas na tração e na frenagem. Além disso, veículos mais leves proporcionariam também menos danos nas rodas e trilhos. Entretanto, estudos dinâmicos apontam que o vagão vazio apresenta resultados mais críticos em relação a segurança quando comparado com o vagão carregado [12].

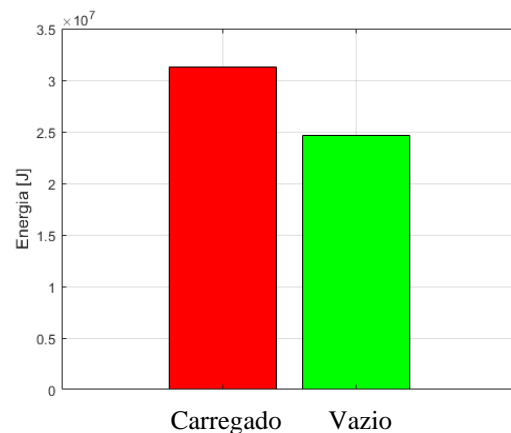
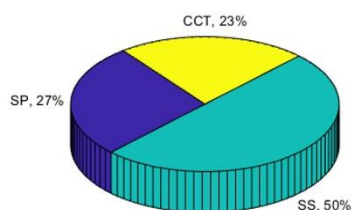


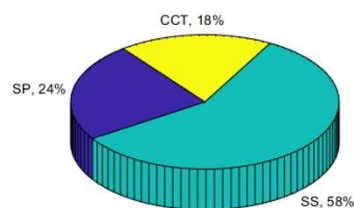
Figura 5. Energia total dissipada pelos elementos de força e o contato roda-trilho no carro carregado (vermelho) e no carro vazio (verde).

Na Figura 6 é apresentada a distribuição da energia dissipada durante a viagem, excluindo a energia de contato R/T por conta de sua porcentagem dominante. É possível observar que como mencionado anteriormente, há uma reduzida participação do CCT, comprovando que o vagão mais leve proporciona menores perdas na tração. Além disso, podemos

observar que para as duas condições simuladas, vazio e carregado, a dissipação na suspensão secundária é predominante. Nos vagões de passageiros, a suspensão secundária tem um papel fundamental para absorção das vibrações produzidas pelas irregularidades da via e dessa forma garantir o conforto para os passageiros [13]. Recentemente, houve um crescimento significativo na pesquisa sobre a implementação de sistemas de economia de energia em componentes da suspensão secundária de trens de passageiros. Exemplos incluem o coletor de energia eletromagnética introduzido por Pan et al. [14] e a suspensão secundária ativa autoalimentada proposta por Wang et al. [15].



Nota: Energia dissipada total é 31MJ, com 98% dissipada por contato entre roda-trilho.



Nota: Energia dissipada total é 25MJ, com 97% dissipada por contato entre roda-trilho.

Figura 6. Distribuição da dissipação de energia na condição do vagão carregado (acima) e vazio (abaixo) nas suspensões primária (SP), secundária (SS) e no conjunto de choque e tração (CCT).

Também é possível notar que a suspensão secundária para o vagão vazio dissipou percentualmente mais energia do que no caso carregado. Esse resultado pode ser explicado pela resistência ao deslocamento provocada pela maior inércia do vagão carregado. Esse é o motivo pelo qual o caso vazio é mais estudado em análises sobre segurança.

Como mostrado na seção anterior, a suspensão secundária é composta por quatro amortecedores verticais, dois amortecedores laterais, e dois elementos representando as conexões de tração e atrito. A contribuição destes elementos no caso do vagão carregado é mostrada na Figura 7. Observa-se uma maior contribuição dos componentes que representam as conexões de links e atrito (T1P e T2P). No modelo atual, esses elementos são utilizados para representar um conjunto de elementos da suspensão secundária

porque com isso há uma redução de custo computacional. O aprimoramento dos modelos nesta região exige o desmembramento dos componentes para localizar melhor quais componentes reais poderiam ser aprimorados. Esse assunto será abordado em trabalhos futuros.

Na Figura 7 também é possível observar uma maior dissipação no truque traseiro (52%) em comparação com o truque de ataque (48%). Normalmente, as análises dinâmicas destacam que o truque de ataque é o mais significativo em termos de resultados de segurança, com o índice de descarrilhamento (força lateral sobre a força vertical - L/V), apresentando valores mais altos, ou seja, menos seguro [16]. A Figura 8 apresenta os resultados de L/V para as rodas do rodeiro dianteiro dos truques de ataque e traseiro. Como se pode notar, o truque de ataque apresenta os maiores valores. Assim, os achados indicam que não existe uma correlação positiva entre segurança e dissipação de energia. Esse achado corrobora com o encontrado por Zhang et al [17] para vagões de passageiros, onde também foi mostrada uma correlação negativa entre L/V e energia.

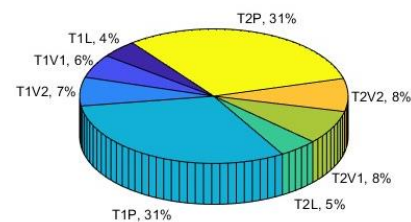


Figura 7. Distribuição da dissipação na condição do vagão carregado, onde T1L é o amortecedor lateral do truque de ataque, T1V1 e T1V2 são os amortecedores verticais do truque de ataque, T1P é a representação dos links de tração e atrito. Os elementos do truque traseiro são designados como T2.

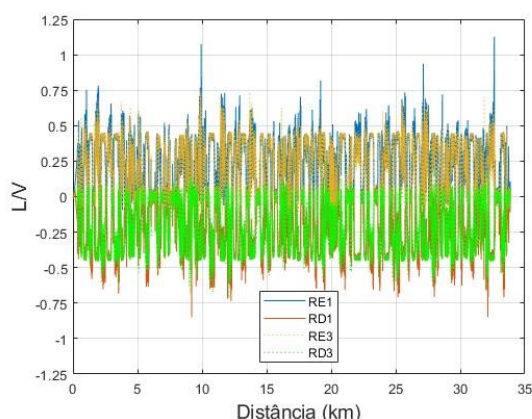


Figura 8. Resultado de L/V para as rodas do primeiro rodeiro do truque de ataque e do truque traseiro. RD – roda da direita; RE – roda da esquerda; 1 – rodeiro frontal do truque de ataque; 3 – rodeiro frontal do truque traseiro.

A Figura 9 ilustra a relação entre a potência dissipada e a curvatura da via. Observa-se que os picos de potência mais altos ocorrem nas transições das curvas de menor raio. Conforme discutido por Pacheco et al. [18], curvas com raios menores resultam no contato do friso da roda com a lateral do boleto do trilho, o que aumenta a dissipação de energia no ponto de contato roda-trilho. Além disso, as discontinuidades nos pontos de início e fim da transição podem contribuir para maiores forças de contato roda/trilho, desgaste das rodas e coeficiente de descarrilamento (L/V), conforme observado por Pacheco et al. [19]. Devido à utilização de dados reais da via sem suavização nas transições, os resultados atuais podem apresentar valores sobrestimados para as energias calculadas, devido ao método de convergência no simulador utilizado.

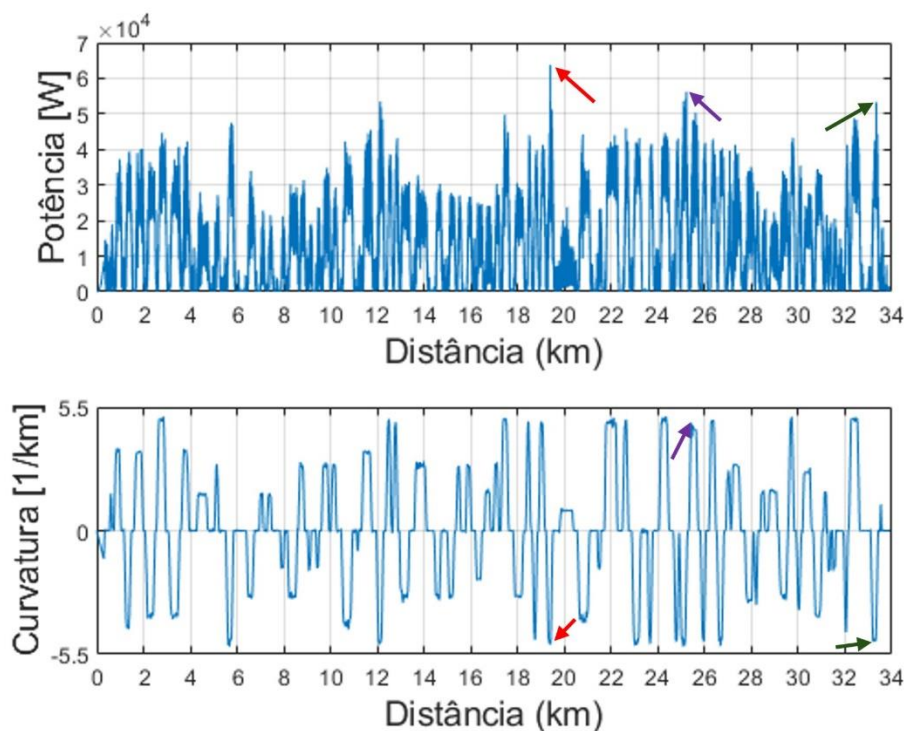


Figura 9. Potência dissipada (superior) e curvatura (inferior). Picos de dissipação são mostrados pelas flechas ao longo da via. Os picos ocorrem nas transições das curvas mais fechadas na via.

4. Conclusões

Neste estudo foi utilizada simulação multicorpos com o programa VAMPIRE® para simular um modelo de composição ferroviária com foco em carro de

passageiros numa via de 33.9 km com irregularidades medidas. O estudo analisou a dissipação de energia pelo contato roda-trilho, os elementos de suspensão, e os CCTs para ambas as condições de carregamento, carregado e vazio. A maior contribuição de perda de energia foi no contato roda-trilho, responsável por 98%

das perdas no vagão carregado e 97% das perdas no vagão vazio. Desconsiderando a dissipação no contato R/T, a maior dissipação foi encontrada na suspensão secundária, que contabilizou 50% das perdas no vagão carregado e 58% das perdas no vagão vazio.

O elemento da suspensão secundária que representa os links de tração e atrito contribuiu para a maior dissipação de energia dentro da suspensão secundária. Além disso, os elementos da suspensão secundária no truque traseiro contribuiriam mais para a dissipação de energia do que os elementos no truque de ataque. Por fim, observou-se que os maiores picos de potência são encontrados nas transições das curvas de menores raios, como esperado.

5. Agradecimentos

Os autores desejam expressar seu agradecimento à Vale S.A. pelo financiamento deste estudo e apoio técnico, e também ao CNPQ (Processo Número 303582/2023-5), que apoiou este projeto com bolsa pesquisa.

6. Referências

- [1] P. Geiberger, “Monitoring energy efficiency of heavy haul freight trains with energy meter data,” Thesis (Master’s Degree) - KTH Royal Institute of Technology School of Engineering Sciences, 2021. [PDF]. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1583522/FULLTEXT01.pdf>
- [2] Q. Wu, S. Luo e C. Cole, “Longitudinal dynamics and energy analysis for heavy haul trains,” *J. Mod. Transport.*, vol. 22, p. 127–136, 2014. [internet]. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-014-0055-x>
- [3] M. McClanachan e C. Cole, “Current train control optimization methods with a view for application in heavy haul railways,” *Proc Inst Mech F J Rail Rapid Transit*, vol. 226, p. 36–47, 2012. [internet]. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954409711406352>
- [4] S. Y. Saprónova, V. P. Tkachenko, O. V. Fomin, I. Kulbovskiy e E. P. Zub, “Rail Vehicles: The Resistance to the Movement and the Controllability,” Monograph. Dnipro: Ukrmetallurginform STA, 2017. [PDF]. Disponível em: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/MonographKyivverstka.pdf>
- [5] S. Semenov, E. Mikhailov, J. Dižo e M. Blatnický, “The Research of Running Resistance of a Railway Wagon with Various Wheel Designs,” *TRANSBALTICA*, p. 110–119, 2021. [internet]. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-94774-3_11
- [6] D. Zhang, Y.-Y. Tang e Q.-Y. Peng, “A novel approach for decreasing driving energy consumption during coasting and cruise for the railway vehicle,” *Energy*, vol. 263, 2023. [internet]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222025014>
- [7] S. Bruni, J. Meijaard, G. Rill e A. Schwab, “State-of-the-art and challenges of railway and road vehicle dynamics with multibody dynamics approaches,” *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 49, pp. 1-32, 2020. [internet]. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11044-020-09735-z>
- [8] A. Myslinski e A. Chudzikiewicz, “Power Dissipation and Wear Modeling in Wheel–Rail Contact,” *applied sciences*, vol. 14, 2024. [internet]. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/1/165>
- [9] G. I. Alarcón, N. Burgelman, J. M. Meza, A. Toro e Z. Li, “Power dissipation modeling in wheel/rail contact: Effect of friction coefficient and profile quality,” *Wear*, vol. 366, pp. 217-224, 2016. [internet]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S043164816300655>
- [10] N. Burgelman, “The Wheel-Rail Contact Problem in Vehicle System Dynamic Simulation,” PhD Thesis, Delft University of Technology, 2016. [PDF]. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:646708/FULLTEXT01.pdf>
- [11] J. Jerrelind, P. Allen, P. Gruber, M. Berg e L. Drugge, “Contributions of vehicle dynamics to the energy efficient operation of road and rail vehicles,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 59, pp. 1114-1147, 2021. [internet]. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2021.1913194>
- [12] R. D. Earl, Campos, V. H., Baruffaldi, L. B., Santos, A. A., Bittencourt, M. L., Fernandes, R., “Dynamic Simulation Models for Passenger Railway Vehicles: A Case Study Concerning the Carajás and Vitória to Minas Railway Coaches,” em VI Simpósio de Engenharia Ferroviária, Campinas, SP, 2023. [internet]. Disponível em: <https://proceedings.science/sef/sef-2023/papers/dynamic-simulation-models-for-passenger-railway-vehicles-a-case-study-concerning?lang=en>
- [13] A. Orvnäs, “Methods for Reducing Vertical Carbody Vibrations of a Rail Vehicle,” KTH Engineering Sciences: Report in Railway Technology, 2010. [PDF]. Disponível em: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:322072/FULLTEXT01.pdf>

- [14] Y. Pan, F. Liu, R. Jiang, Z. Tu e L. Zuo, “Modeling and onboard test of an electromagnetic energy harvester for railway cars,” *Applied Energy*, vol. 250, pp. 568-581, 2019. [internet]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919308438>
- [15] P. Wang, H. Li, J. Zhang e T. Mei, “An analytical design approach for self-powered active lateral secondary suspensions for railway vehicles,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 53, pp. 1439-1454, 2015. [internet]. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0042314.2015.1050964>
- [16] J. Evans e S. Iwnicki, “Vehicle Dynamics and the Wheel/Rail Interface,” Rail Technology Unit, 2002. [PDF]. Disponível em: <https://e-space.mmu.ac.uk/11370/1/vehicle%20dynamics%20wheel%20rail%20interface.pdf>
- [17] D. Zhang, F.-R. Zhou, Y.-Y. Tang, Z.-Y. Tao e Q.-Y. Peng, “Optimization of the loading plan for a railway wagon from the perspectives of running safety and energy conservation,” *Energy*, vol. 280, 2023. [internet]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306544223016237>
- [18] P. A. P. Pacheco, M. Magelli, M. V. Lopes, P. A. Correa, N. Zampieri, N. Bosso e A. A. d. Santos, “The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons,” *Railway Engineering Science*, 2024. [internet]. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-024-00334-8>
- [19] P. Pacheco, P. H. A. Correa, Ramos, P. G., G. Santos e A. A. Santos, “Effect of transition functions on the dynamic behavior of heavy-haul wagons,” em 20th International Wheelset Congress, Chicago, 2023. [internet]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/374165753_Effect_of_transition_functions_on_the_dynamic_behavior_of_heavy-haul_wagons