

TÉCNICAS DE COMPENSAÇÃO PARA MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DA VELOCIDADE NAS MEDIÇÕES DE UM VAGÃO FERROVIÁRIO INSTRUMENTADO

1º Autor Yago Arthur de Morais Silva, Graduando, UFES, Brasil.

2º Autor Maria Clara Assunção Viana, Bacharela, Unicamp, Brasil

3º Autor Guilherme Fabiano Mendonça dos Santos, Dr., UFES, Brasil

RESUMO

Este estudo investiga a influência da velocidade nos dados medidos por um vagão instrumentado em uma ferrovia, visando compreender como diferentes velocidades afetam as medições dos sensores e desenvolver estratégias para compensar esses efeitos. A partir de dados obtidos por simulações dinâmicas, observa-se um comportamento linear entre a velocidade e as medições de aceleração vertical na travessa lateral do vagão. Para compensação desse efeito, avalia-se três abordagens de normalização: baseada no ajuste linear, pela velocidade e pela velocidade ao quadrado. Os resultados indicaram a compensação pela velocidade ao quadrado como a mais eficaz, resultando em medições de aceleração quase independentes da velocidade. A partir dessa normalização, obtêm-se variáveis de aceleração que descrevem apenas a resposta à excitação dinâmica da via, o que assegura uma avaliação mais acurada da condição dos trilhos ferroviários independentemente da velocidade de operação do veículo. Essas conclusões destacam a importância de considerar a influência de fatores externos, como velocidade, na análise de dados de medições em vagões instrumentados para aplicações de monitoramento da condição dos trilhos ferroviários.

Palavras-chaves: Velocidade; Carga Pesada; Vagão Instrumentado; Monitoramento de condição

1. INTRODUÇÃO

A segurança é uma preocupação primordial no setor ferroviário, isso porque acidentes não só incorrem em custos significativos, mas também representam graves riscos à segurança humana. Diante da necessidade de garantir uma operação segura, inúmeros estudos têm se concentrado em desenvolver estratégias para prevenir acidentes ferroviários [1]. O monitoramento de trilhos ferroviários é tipicamente realizado por dois métodos comuns: inspeção visual e o uso de carros controle, sendo que o primeiro se concentra na detecção de defeitos nos trilhos por meio de um processo extremamente dependente do operador. Já os carros controle, por sua vez, são veículos de velocidade constante especializados no monitoramento da geometria dos trilhos, oferecendo um método mais preciso e confiável. No entanto, eles estão associados a custos operacionais elevados e necessitam de operações periódicas, o que resultar em interrupções no serviço da rede ferroviária [2, 3].

Diante desses desafios, tem-se observado um interesse crescente em métodos que se baseiam na medição da resposta dinâmica dos veículos ferroviários [3]. Uma

abordagem prática para a implementação desses métodos envolve o uso de um vagão instrumentado (VI). Esse tipo de vagão, utilizado em operações regulares, é equipado com uma variedade de sensores que monitoram a resposta dinâmica do veículo durante a sua operação normal. Atuando como uma plataforma para o monitoramento contínuo dos trilhos, o VI combina efetivamente as vantagens das inspeções visuais e dos carros controle [4].

Ainda existem desafios a serem superados para que essa metodologia alcance seu potencial máximo. Dentre eles, está a variação da velocidade do vagão durante diferentes viagens em sua operação regular [5]. Variações na velocidade podem introduzir distorções nos dados coletados, dificultando a identificação precisa de defeitos nos trilhos. Um aumento na velocidade pode amplificar certas respostas dinâmicas do vagão, enquanto uma redução da velocidade pode atenuá-las. Essa variação na resposta devido à velocidade pode distorcer a presença de defeitos existentes na via, levando a diagnósticos imprecisos. Diante disso, é necessário realizar a compensação de velocidade nos dados medidos para levar em conta veículos que operam em velocidade mais baixa e, portanto, geram níveis de respostas mais baixas do que o esperado sobre o mesmo trecho de trilho [6].

Diante dessa problemática, este trabalho tem como objetivo investigar a influência da velocidade nos dados medidos por um vagão instrumentado existente em uma ferrovia da BRA1. Busca-se compreender como essa variável impacta a precisão das medições dos sensores e desenvolver estratégias eficazes para compensar tais efeitos, assegurando uma avaliação mais acurada da condição dos trilhos ferroviários. Essa análise será realizada utilizando dados simulados que representam a operação do vagão em um mesmo trecho de trilho, porém em diferentes velocidades. Dessa forma, será possível isolar o efeito da velocidade nas medições, assegurando que todas as outras condições do trecho permaneçam constantes e eliminando a interferência de fatores externos na análise.

2. METODOLOGIA

A investigação sobre o impacto da velocidade nos sensores de um vagão instrumentado é fundamental para compreender como diferentes velocidades de deslocamento influenciam as medições desses dispositivos. Para explorar essa relação, foi conduzida uma série de experimentos e análises estatísticas.

2.1. Simulação dinâmica

Os dados foram obtidos por meio de uma simulação realizada no software de dinâmica multicorpos SIMPACKTM, que utilizou a modelagem de um vagão instrumentado do tipo gôndola GDE, existente na ferrovia brasileira BRA1. A Figura 1 mostra o modelo de vagão utilizado na simulação, indicando algumas de suas instrumentações, que são:

- 1 acelerômetro triaxial localizado no corpo do vagão acima do truque traseiro;

- 4 acelerômetros uniaxiais instalados nas travessas laterais, alinhados com as linhas de centro do primeiro e último rodeiros;
- 4 células de carga instaladas acopladas com um sistema de molas entre as laterais e as travessas centrais, permitindo a medição do deslocamento vertical da suspensão secundária;

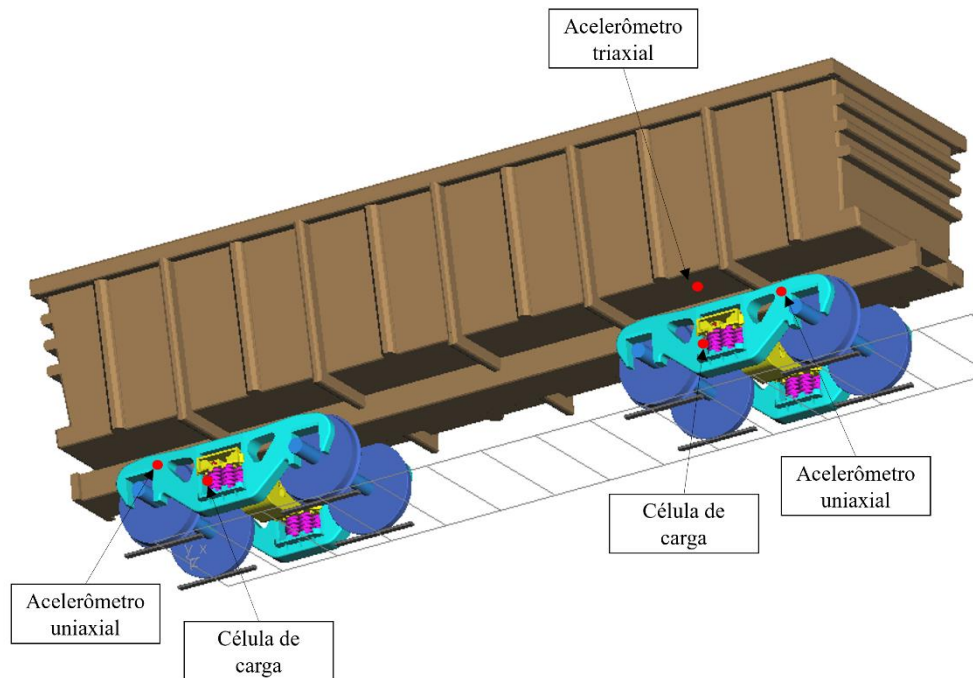


Figura 1. Modelo do vagão instrumentado utilizado no estudo, com algumas de suas instrumentações indicadas pelos pontos em vermelho.

A simulação foi conduzida com base em um segmento real da ferrovia BRA1, que possui uma extensão aproximada de 2 km, compreendendo 4 curvas e 5 tangentes, com a curvatura ilustrada na Figura 2. O modelo do trilho incorporou irregularidades geométricas descritas pela Classe 4 da Federal Railroad Administration (FRA), que são representativas das condições típicas encontradas nas ferrovias brasileiras.

Após a modelagem, foram realizadas um total de 8 simulações, abrangendo uma gama de velocidades que variou de 4 a 18 m/s, correspondente à velocidade máxima dos veículos de carga na BRA1. Essas simulações permitiram extrair as medições de aceleração e de deslocamento a partir dos sensores existentes no vagão, de forma que seja possível analisar a variação desses dados sob mesmas condições de via e diferentes regimes de velocidade.

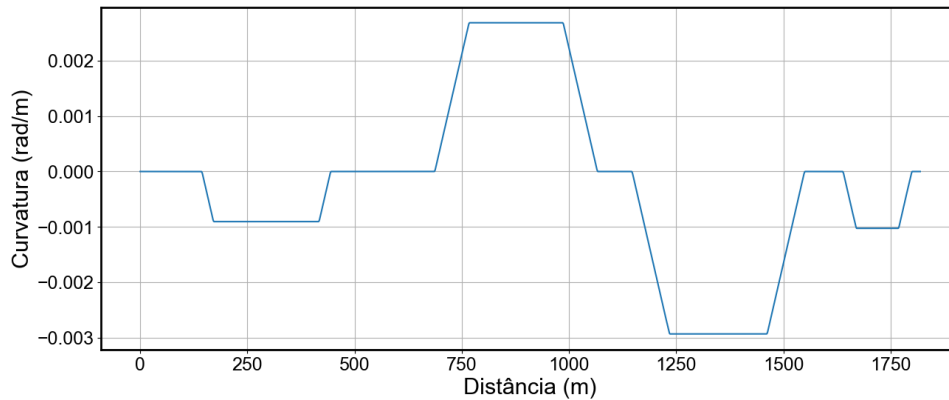


Figura 2. Curvatura do trecho de via utilizado.

2.2 Influência da velocidade

Dado os diferentes tipos de sensores presentes no vagão, optou-se por concentrar a análise inicial nos acelerômetros uniaxiais. Esta decisão permite uma investigação mais detalhada e focada da relação entre a velocidade e as leituras de aceleração. As siglas utilizadas para descrever cada um dos sensores analisados são descritas abaixo:

- AU_FR: Acelerômetro uniaxial posicionado na travessa lateral direita do truque dianteiro;
- AU_FL: Acelerômetro uniaxial posicionado na travessa lateral esquerda do truque dianteiro;
- AU_BR: Acelerômetro uniaxial posicionado na travessa lateral direita do truque traseiro;
- AU_BL: Acelerômetro uniaxial posicionado na travessa lateral esquerda do truque traseiro.

A Figura 3 exibe as medições obtidas por 'AU_FR' em função das diversas velocidades simuladas. As tendências observadas indicam que menores velocidades correspondem a níveis mais baixos de aceleração, estabelecendo uma relação direta entre a velocidade de operação do vagão e os valores de aceleração medidos. Esse padrão reforça a importância de uma análise criteriosa e de possíveis ajustes nas leituras dos sensores conforme a velocidade, para assegurar uma avaliação precisa da condição da via. Cabe ressaltar que a mesma tendência foi observada nas medições dos demais acelerômetros, sugerindo um comportamento consistente entre as variáveis monitoradas.

O estudo dessa correlação foi realizado a partir do emprego de gráficos de violino, que proporcionam uma visualização detalhada da distribuição e frequência dos dados de aceleração para cada velocidade, destacando picos de ocorrência. Essa análise foi conduzida considerando a macrogeometria completa da via, as regiões de tangente e, posteriormente, apenas as curvas. O objetivo era verificar a existência de padrões específicos e se a velocidade interage com a geometria da via de maneira distinta, influenciando as medições de aceleração.

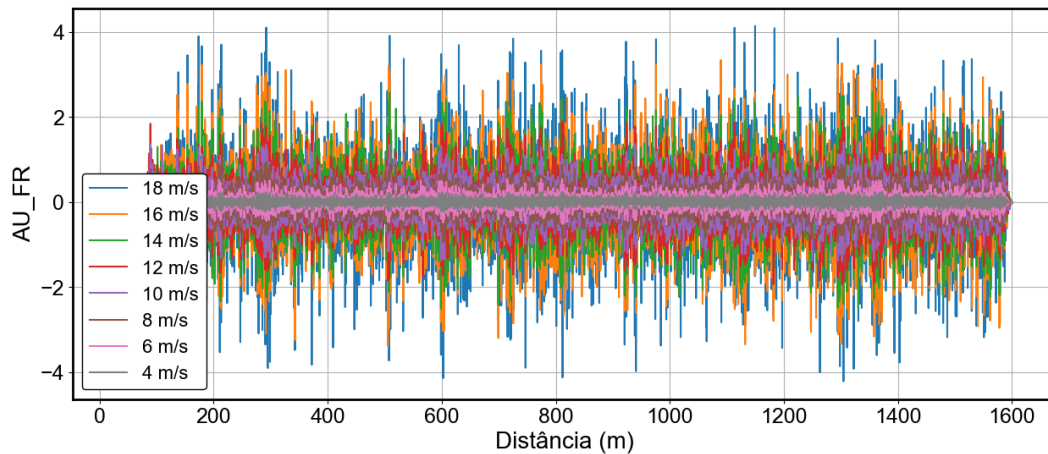


Figura 3. Variação da aceleração 'AU_FR' em função da velocidade.

A Figura 4 ilustra a relação da velocidade com a variável 'AU_FR', analisando a macrogeometria completa da ferrovia. Observa-se um crescimento de 'AU_FR' à medida que a velocidade também aumenta. Esse comportamento se repetiu para os demais acelerômetros e foi consistente nas análises específicas das regiões com apenas tangentes e apenas curvas. Isso indica que a influência da velocidade nas medições de aceleração é relativamente uniforme, independentemente da geometria específica da via.

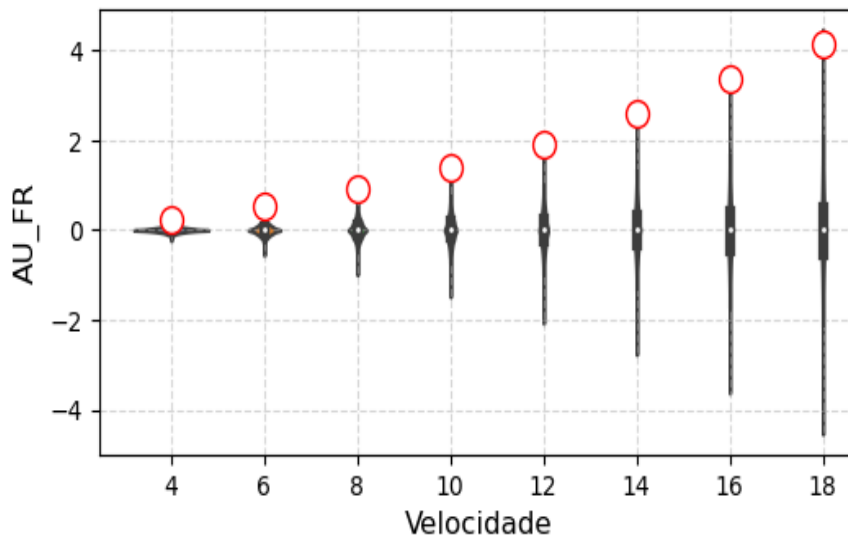


Figura 4. Relação entre diferentes velocidades e medições de aceleração 'AU_FR', com destaque nos pontos máximos, considerando todo comprimento da via

Após a análise inicial, buscou-se determinar se a relação entre a velocidade e a aceleração apresentava algum padrão. Para isso, ajustou-se uma regressão linear e exponencial aos pontos máximos dos dados de aceleração. A escolha dessas funções foi motivada pela necessidade de explorar diferentes tipos de relações entre a velocidade e a aceleração. Além disso, o ajuste aos pontos máximos permite capturar os valores extremos, que são mais sensíveis às variações de velocidade.

A regressão linear é utilizada para descrever uma relação diretamente proporcional entre duas variáveis, de acordo com a Equação 1. Nela, a velocidade atua como a variável independente (x), enquanto a aceleração atua como a variável dependente (y).

$$y(x) = ax + b \quad (1)$$

Por outro lado, a regressão exponencial, descrita pela Equação 2, se ajusta melhor quando a relação entre as variáveis é não linear. Nessa formulação, a velocidade também é indicada por x e a aceleração por y . Destaca-se que ambos os ajustes estão sujeitos à restrição de que a velocidade $x \geq 4$ m/s, uma vez que se espera que a aceleração seja zero quando o vagão estiver parado, e que velocidades inferiores não foram consideradas na análise.

$$y(x) = ae^{(bx)} \quad (2)$$

A Figura 5 demonstra a representação do comportamento das linhas de regressão, tanto linear quanto exponencial, na análise da relação entre ‘Velocidade’ e ‘AU_FR’. Observa-se que a regressão linear exibe um coeficiente de determinação (R^2) superior, indicando ser o modelo mais apropriado para os dados em questão. De maneira semelhante, para todos os outros acelerômetros uniaxiais, a regressão linear também teve maior coeficiente de determinação, demonstrando-se o modelo mais adequado.

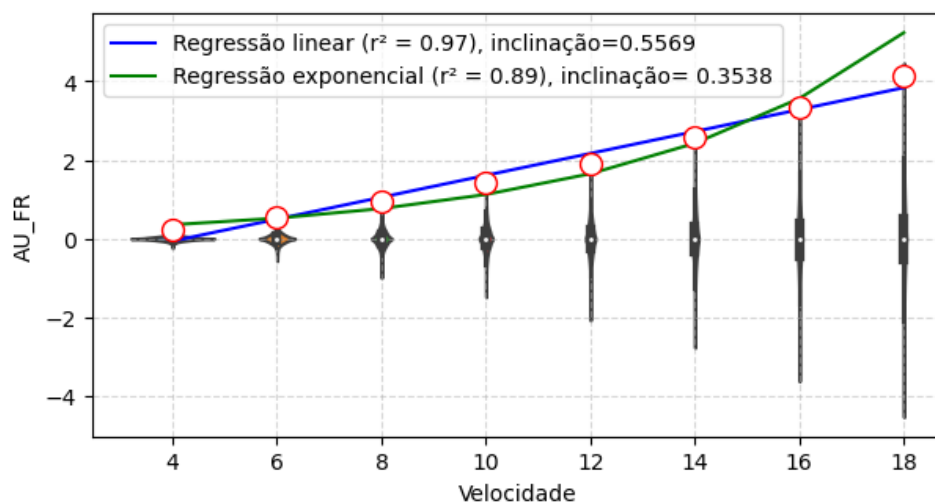


Figura 5. Ajuste linear e exponencial aos pontos máximos de ‘AU_FR’.

2.3 Remoção do efeito da velocidade

A partir dessa análise buscou-se métodos para remover a influência dessa variável nos dados. Para isso, foram adotadas três abordagens diferentes, que são descritas abaixo.

2.3.1 Abordagem 1

A Figura 5 evidenciou uma relação linear direta entre a velocidade (x) e a aceleração (y): à medida que a velocidade aumenta, a aceleração também aumenta proporcionalmente. Dessa forma, para analisar a aceleração de maneira que ela não seja influenciada pela variação da velocidade, realiza-se um processo de normalização, mostrado pela Equação

3. Essa estratégia consiste em dividir as medições de aceleração (y) pelos valores preditos pelo ajuste linear para cada velocidade específica. Tal abordagem permite a criação de um novo valor de aceleração ($Y_{(corrigido)}$), independente da velocidade (x), que considere apenas as variações que são independentes da velocidade, isolando assim os efeitos reais que descrevem a resposta à excitação dinâmica da via.

$$Y_{(corrigido)} = \frac{y(x)}{(ax + b)} \quad (3)$$

2.3.2 Abordagem 2

Além da abordagem inicial de regressão linear, outra técnica adotada foi a normalização de cada valor de aceleração medido pela velocidade correspondente àquela medição. Esse processo se baseia na relação proporcional entre aceleração e velocidade, conforme evidenciado anteriormente, e é descrito pela Equação 4.

$$Y_{(norm)}(x) = \frac{y(x)}{x} \quad (4)$$

Nessa formulação, $Y_{(norm)}(x)$ representa a aceleração normalizada para uma velocidade unitária. Dessa forma, ao normalizar a aceleração, ajusta-se cada medição para uma base comum, permitindo comparar as acelerações de forma mais uniforme, independentemente das velocidades em que foram medidas. Apesar de normalizar, é importante destacar que $Y_{(norm)}$ ainda está em função de x , mas todas as medições estão na mesma base. Essa técnica facilita a análise das variações intrínsecas da aceleração, isolando as respostas dinâmicas do sistema das variações de velocidade

2.3.3 Abordagem 3

O estudo de Yu et al. (2023) apresenta um modelo que descreve o movimento da roda sobre o trilho. De acordo com os autores, para uma simplificação da análise, considera-se que, a roda, ao avançar, segue o perfil do trilho de forma que sua trajetória vertical reflete as irregularidades da via. Além disso, o modelo assume que a roda, como um corpo rígido, não deforma sob carga, mantendo a forma. Dessa forma, a posição vertical da roda $z_w(t)$, que se move a uma velocidade constante V ao longo do trilho, pode ser descrita pela Equação 5. Na qual R é o raio da roda e $z_r(s)$ representa o perfil vertical do trilho como uma função da posição s ao longo do trilho. De acordo com as simplificações adotadas, a variável s é definida como $s = Vt$, na qual V é a velocidade constante do vagão e t é o tempo.

$$z_w(t) = z_r(s) + R \quad (5)$$

Dessa forma, a derivada segunda de $z_w(t)$ em relação ao tempo corresponde a aceleração vertical da roda $a_w(t)$, descrita pela Equação 6.

$$a_w(t) = \frac{d^2 z_r}{ds^2} \cdot V^2 \quad (6)$$

De acordo com a Equação acima, a aceleração vertical da roda é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade, o que significa que qualquer alteração na velocidade do vagão alterará proporcionalmente o valor da aceleração medida. Dessa forma, para tornar a aceleração independente da velocidade do trem, basta dividi-la dividindo-a por V^2 , fornece uma medida normalizada da aceleração, em m^{-1} , que reflete exclusivamente a geometria do trilho, eliminando o efeito da velocidade [7].

Com base no modelo estabelecido por Yu et al. (2023), uma adaptação será considerada para as medições de aceleração analisadas, apesar dos sensores estarem posicionados na travessa lateral do vagão. Dessa forma, similarmente ao estudo busca-se obter uma medida de velocidade independente da velocidade, fornecendo uma medição mais representativa para condição do trilho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme detalhado nas seções anteriores, três estratégias distintas foram implementadas com o objetivo de atenuar a influência da velocidade sobre os dados de aceleração. As Figuras 6, 7 e 8 exibem a relação entre a variável 'Velocidade' e 'AU_FR' após a aplicação das estratégias de normalização baseada no ajuste linear, (abordagem 1) normalização pela velocidade (abordagem 2) e normalização pela velocidade ao quadrado (abordagem 3), respectivamente. Embora os resultados sejam apresentados somente para uma variável, um padrão similar foi observado nas demais variáveis. Apesar de serem mostrados os resultados apenas para uma das variáveis, todas as outras demonstraram comportamento equivalente.

Observa-se que, em todas as abordagens, houve uma redução na inclinação da reta de regressão linear, quando comparada à inclinação original de 0,5569 mostrada na Figura 5. Especificamente, as inclinações foram reduzidas para 0,06215 na abordagem 1 (uma redução de aproximadamente 88,8%), para 0,0238 na abordagem 2 (uma redução de aproximadamente 95,7%) e para -0,0004 na abordagem 3 (uma redução de quase 100%). Essa diminuição da inclinação indica uma atenuação significativa do efeito da velocidade na medição da aceleração após a aplicação das estratégias de normalização.

Além disso, é notável que a terceira abordagem, a normalização pela velocidade ao quadrado, resultou na menor inclinação de reta, valor próximo de zero, indicando que essa abordagem foi particularmente eficaz em tornar as medições de aceleração praticamente independentes da velocidade. Isso sugere que o modelo apresentado por Yu et al. (2023) para descrever o movimento da roda ferroviária sobre o trilho é uma boa simplificação para representar a aceleração vertical na travessa lateral.

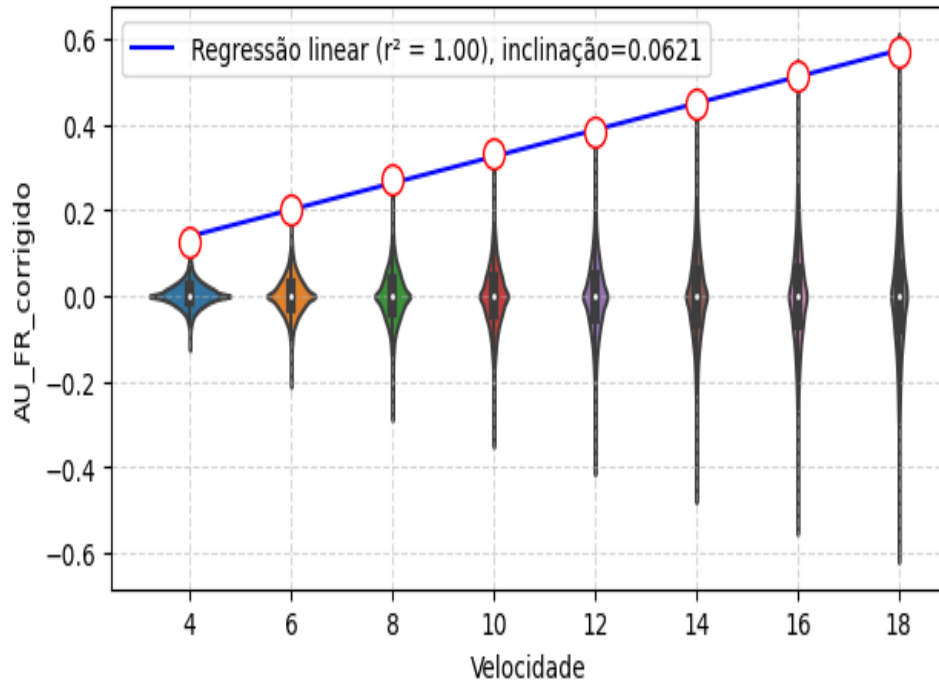


Figura 6. Relação entre as variáveis ‘Velocidade’ e ‘AU_FR’ após a correção baseada no ajuste linear.

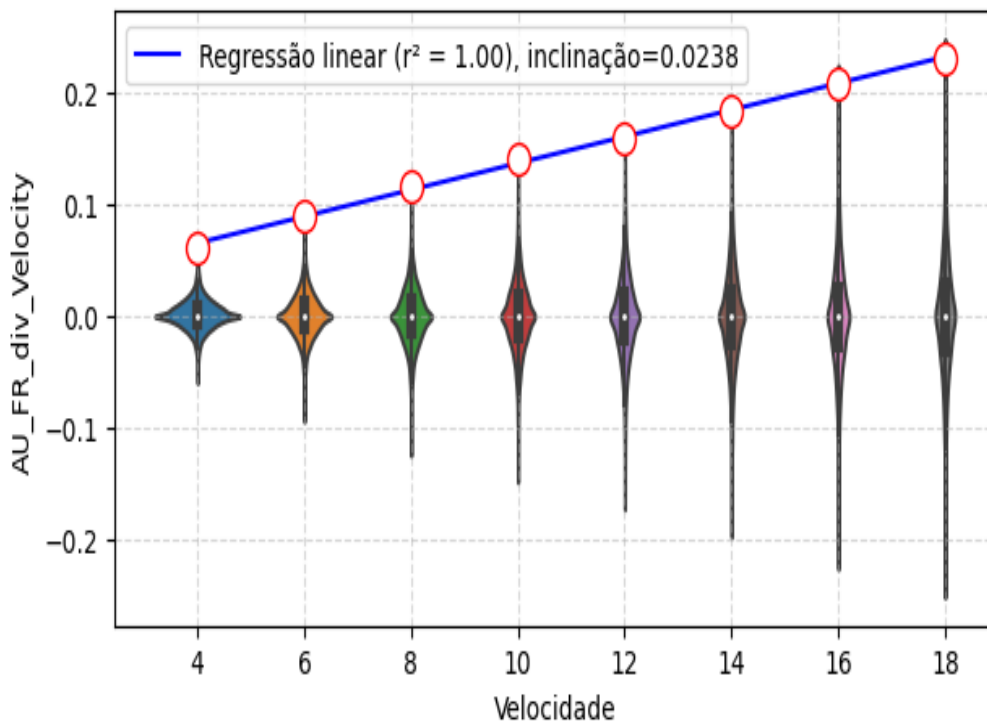


Figura 7. Relação entre as variáveis ‘Velocidade’ e ‘AU_FR’ após a normalização pela velocidade.

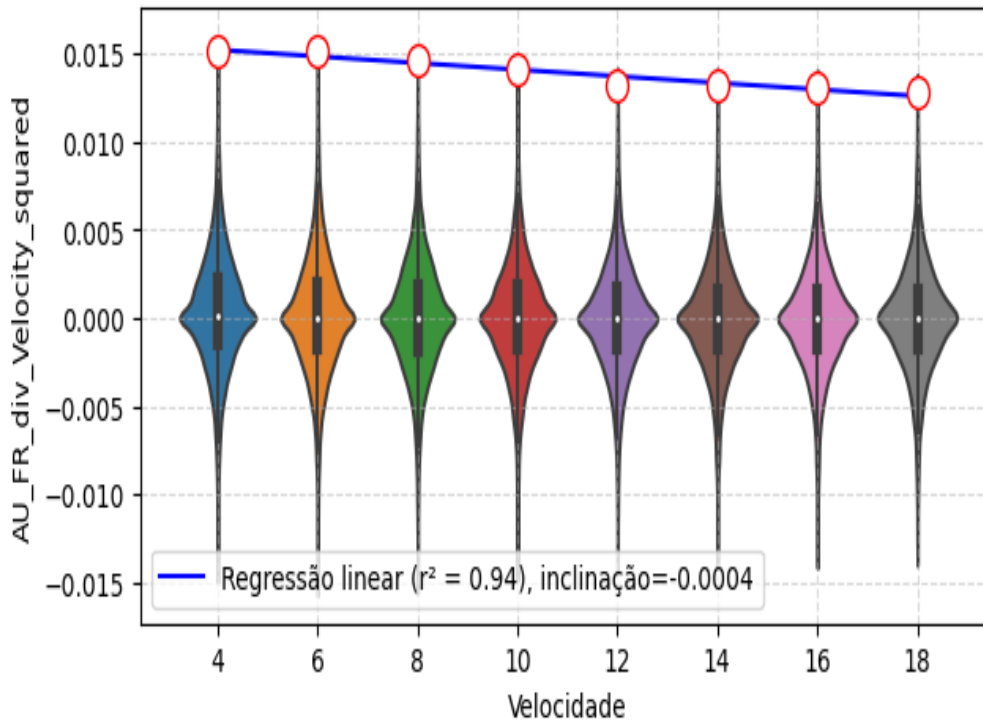


Figura 8. Relação entre as variáveis 'Velocidade' e 'AU_FR' após a normalização pela velocidade ao quadrado.

Outro aspecto relevante é que, nos dados normalizados pela velocidade (abordagem 2) e pelo ajuste linear (abordagem 1), embora as retas de regressão apresentem inclinações menores em comparação com os dados originais, ainda se observa uma relação positiva entre a 'Velocidade' e 'AU_FR'. Isso implica que, mesmo com uma menor inclinação, os valores de 'AU_FR' ainda aumentam com o aumento da 'Velocidade', embora em uma magnitude reduzida. Portanto, essas abordagens não são indicadas para eliminar completamente a influência da velocidade, pois mantêm o comportamento original de que maior velocidade leva a maior aceleração.

4. CONCLUSÃO

Este estudo investigou o impacto da velocidade nos dados de aceleração medidos por um vagão instrumentado, mostrando que a variação da velocidade do vagão impacta diretamente nas medições dos acelerômetros verticais da travessa lateral, nas quais menores velocidades correspondem a níveis mais baixos de aceleração. Além disso, observou-se que esse efeito possui um comportamento linear, com a aceleração aumentando proporcionalmente à velocidade. Diante disso, foram desenvolvidas abordagens eficazes para compensar os efeitos da velocidade e assegurar uma avaliação mais precisa da condição dos trilhos ferroviários. Três abordagens distintas de normalização foram implementadas: normalização baseada no ajuste linear, normalização pela velocidade e normalização pela velocidade ao quadrado.

Os resultados obtidos mostram a abordagem baseada na divisão pela velocidade ao quadrado como a mais indicada para remoção do efeito da velocidade nas medições. Essa estratégia resultou em medições de aceleração quase independentes da velocidade, com uma redução de quase 100% na inclinação da reta de regressão linear em comparação

com o comportamento original dos dados. Já as abordagens de normalização pela velocidade e pelo ajuste linear, apesar de reduzirem a inclinação da reta de regressão, ainda mantêm uma relação positiva entre velocidade e aceleração. Portanto, elas não eliminam completamente a influência da velocidade.

Por fim, a aplicação desses métodos de compensação permite uma análise mais precisa e confiável da condição dos trilhos ferroviários, independentemente das variações na velocidade do vagão. Isso contribui significativamente para a segurança e eficiência das operações ferroviárias, fornecendo informações mais confiáveis para a detecção e prevenção de defeitos nos trilhos. Uma vez que o estudo foi realizado considerando apenas os acelerômetros verticais da travessa lateral do vagão, é necessário o desenvolvimento de análises que considerem os outros sensores do vagão (medições de deslocamento e nas direções X e Y), além da validação em dados reais coletados pelo veículo.

5. AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pela VALE S.A. como parte de um programa de pesquisa chamado “Cátedra de Vagões”.

6. REFERÊNCIAS

- [1] MOHAMMADI, Reza et al. Exploring the impact of foot-by-foot track geometry on the occurrence of rail defects. **Transportation research part C: emerging technologies**, v. 102, p. 153-172, 2019.
- [2] ILIOPOULOS, I. A.; SAKELLARIOU, J. S.; FASSOIS, S. D. Track segment automated characterisation via railway–vehicle–based random vibration signals and statistical time series methods. **Vehicle System Dynamics**, v. 60, n. 10, p. 3336-3357, 2022.
- [3] PIRES, A. et al. Measuring vertical track irregularities from instrumented heavy haul railway vehicle data using machine learning. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 127, p. 107191, 2024.
- [4] NGIGI, R. W. et al. Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics. In: **Journal of physics: conference series**. IOP Publishing, 2012. p. 012016.
- [5] LEDERMAN, George et al. Track-monitoring from the dynamic response of an operational train. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 87, p. 1-16, 2017.
- [6] BALOUCHI, Farouk; BEVAN, Adam; FORMSTON, Roy. Development of railway track condition monitoring from multi-train in-service vehicles. **Vehicle System Dynamics**, v. 59, n. 9, p. 1397-1417, 2021.
- [7] YU, Xinxin et al. Study of Signal Processing Techniques for Detecting Rail Corrugation Using Axle-Box Accelerometers in a Scaled Experimental Track. **Available at SSRN 4431440**.

TECHNIQUES FOR MINIMIZING THE EFFECT OF SPEED ON MEASUREMENTS FROM AN INSTRUMENTED RAILWAY VEHICLE

Abstract

This study investigates the influence of speed on data measured by an instrumented wagon on a railway, aiming to understand how different speeds affect sensor measurements and to develop strategies to compensate for these effects. Using data obtained from dynamic simulations, a linear relationship is observed between speed and vertical acceleration measurements on the wagon's side beam. To compensate for this effect, three normalization approaches are evaluated: linear adjustment-based, speed-based, and speed squared-based. The results indicate that normalization by speed squared is the most effective, resulting in acceleration measurements nearly independent of speed. This normalization provides acceleration variables that describe only the response to dynamic track excitation, ensuring a more accurate assessment of railway track condition regardless of vehicle operating speed. These findings underscore the importance of considering the influence of external factors, such as speed, in the analysis of measurement data from instrumented wagons for railway track condition monitoring applications.

Keywords: Speed; Heavy-Haul; Instrumented Vehicle; Condition Monitoring