



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

CATEGORIA 3

USO COLETIVO DE SENSORES INERCIAIS DE BAIXO CUSTO PARA
MONITORAMENTO DO CONFORTO E DA VIA PERMANENTE

INTRODUÇÃO

A inspeção periódica da via permanente ferroviária é necessária para a garantia do conforto e da segurança. O uso de veículos especialmente equipados para esse tipo de levantamento, usando tecnologias com ou sem contato, é prática consolidada na prática dos gestores (PITA, 2006; STOW; ANDERSSON, 2006; NIELSEN et al., 2013) e oferece maior produtividade em relação a alternativas como o uso da topografia clássica, a inspeção visual e o uso de troles manuais. Contudo, o uso de veículos e sistemas dedicados apresenta inconvenientes como os altos custos de aquisição, operação e manutenção, a conseqüente menor cobertura espaço-temporal e o possível impacto no tráfego, fatores que estimulam pesquisa em alternativas de baixo custo e quase contínuas.

Objetivando redução de custos e aumento da produtividade no monitoramento da via permanente ferroviária, pesquisas têm buscado alternativas baseadas no uso da vibração de veículos em operação na caracterização quase contínua do conforto de na



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

indicação indireta da qualidade viária. A maior parte dos trabalhos nesta área emprega sensores inerciais (acelerômetros e giroscópios) de uso industrial, intermediários quando à qualidade e ao custo de aquisição e manutenção intermediários (MOLODOVA et al., 2014; WESTON et al., 2015; SALVADOR et al., 2016). Os pontos de instalação variam de acordo com os objetivos de monitoramento, podendo estar no corpo do carro (monitoramento do conforto e indicação indireta das condições da via), no truque ou na caixa do eixo (nestes dois casos, caracterização das respostas com remoção da influência das suspensões os e maior fidelidade às condições da via). Considerando os parâmetros da geometria viária, as técnicas de tratamento de dados de acelerações e vibrações angulares nesse campo de pesquisa podem ser diretas, buscando reconstituição da geometria, ou indiretas, por meio do cálculo de estatísticas nos domínios do tempo, do espaço e da frequência.

WESTON et al. (2015) realizam extenso trabalho de revisão da literatura no monitoramento da geometria a partir de veículos em operação comercial. Entre as conclusões, os autores afirmam que o emprego de sensores de muito baixo custo (destinados ao consumidor final, similares àqueles de *smartphones*) apresenta limitações devido ao elevado ruído e à baixa confiabilidade. Ademais, a instalação destes no corpo do veículo, opção mais prática e menos custosa, dificultaria o desenvolvimento de sistemas de monitoramento da qualidade de via pela influência das suspensões primária e secundária. Outro fator limitante ao uso das acelerações é a forte influência



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

da velocidade, aproximadamente quadrática, na relação entre irregularidades de via e vibrações. Apesar dessas limitações, a profusa presença de dispositivos móveis com potencialidades de sensoriamento crescentemente maiores e a oportunidade de sistemas de monitoramento colaborativos têm incitado pesquisas que lidem com os desafios apontados no uso de sensores de baixa qualidade e muito baixo custo, sejam smartphones (NETIRAIL-INFRA, 2017; SERAJ; MERATNIA; HAVINGA, 2017; PAIXÃO; FORTUNATO; CALÇADA, 2019) ou dispositivos especialmente desenvolvidos para essa aplicação. Dada as limitações desses sensores, verifica-se a prevalência de técnicas indiretas na caracterização da geometria viária.

Neste contexto, o presente artigo apresenta bases metodológicas para o **uso coletivo** de sensores inerciais de muito baixo custo, semelhante aos existentes em smartphones e aparelhos semelhantes, a bordo de trens em operação para monitoramento do conforto e, de forma indireta, da qualidade da via. Por **uso coletivo**, considera-se tanto o uso de múltiplos sensores em uma mesma composição quanto a fusão de dados de viagens sucessivas por um mesmo trecho empregando o mesmo conjunto sensor. A proposta parte da hipótese de que o uso coletivo dos sensores de muito baixo custo supera a baixa qualidade individual com a possibilidade de identificação de medições discrepantes e, por meio da fusão dos sinais, de redução de ruídos no sinal de vibração. Sob essa abordagem, espera-se produzir resultados mais acurados e robustos em



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

comparação com o uso individual dessa classe de sensores inerciais e definir bases para atividades de monitoramento de muito baixo custo complementares às já existentes.

Este artigo resume os resultados apresentados em três artigos anteriores dos autores (omitido para avaliação cega) e estrutura-se conforme as seguintes seções:

- **Materiais e métodos.** Inicialmente, descreve-se o desenvolvimento dos dispositivos sensores, com a utilização de um microcomputador de placa única para integração de um módulo de medidas inerciais a um receptor GPS em cada unidade. A segunda parte apresenta os testes executados em viagens com o trem de diagnóstico da Rede Ferroviária Italiana (RFI) por sua malha de alta velocidade (eixos Nápoles – Milão e Turim – Veneza) e com o carro-controle da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) pela Linha 7 – Rubi (da Estação da Luz, centro da cidade de São Paulo, Brasil, à Estação Jundiaí, cidade homônima, Brasil). Por fim, descreve-se a metodologia de tratamento de dados para fusão dos sinais, para caracterização do conforto segundo a norma ISO-2631 (*Vibração mecânica e choque - Avaliação da exposição humana às vibrações de corpo inteiro*) e para validação dos resultados.
- **Diagnóstico.** Apresenta-se os resultados em termos de valores eficazes das acelerações verticais ponderadas segundo a norma, bem como a correlação dos



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

resultados de conforto (tanto individuais quanto dos sinais resultantes da fusão) com parâmetros da geometria da via.

- Análise dos resultados. Discute-se os comportamentos individuais e coletivos dos dois conjuntos de testes para descrição do conforto e, indiretamente, caracterização da via. Em outras palavras, analisa-se a concordância interna à população de sensores e a concordância dos valores de aceleração ponderados (calculados tanto a partir dos sinais individuais quanto do sinal médio calculado da população sensora) com os parâmetros da geometria. Verifica-se, assim, ganhos da abordagem coletiva e o potencial uso do sinal coletivo (sinal médio) enquanto indicador indireto da qualidade da via.
- Conclusões. Caracteriza-se potencialidades, limitações e passos futuros para a implementação dessas soluções de baixo custo em monitoramentos ferroviários.

MATERIAIS E MÉTODOS

Sensores utilizados

Dado que a motivação do desenvolvimento do método proposto é seu emprego em um sistema coletivo de monitoramento da via, optou-se pelo desenvolvimento de conjuntos sensores baseados em módulos de baixo custo, de qualidade similar aos sensores existentes em *smartphones* e demais dispositivos móveis (classificados no mercado de



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

sensores inerciais como destinados ao consumidor final – *consumer-grade*). O objetivo foi desenvolver dispositivos com componentes disponíveis ao público geral, de fácil instalação em qualquer veículo e substituição em caso de falhas. Outra vantagem é a flexibilidade quanto à incorporação de sensores suplementares, que pudessem ser integradas de forma coletiva e cujos componentes, filtros, algoritmos e processamento interno pudessem ser tratados sem limitações de propriedade intelectual. Para os testes descritos neste trabalho, treze unidades sensores foram construídas. As unidades sensoras (retratadas na Figura 1 sem o carregador portátil) foram detalhadamente apresentadas em trabalhos anteriores (omitido para avaliação cega) do presente grupo de pesquisa e seus componentes são brevemente descritos a seguir:

- Microcomputador de placa única *Raspberry Zero W*, com 512 MB de RAM e funcionalidades de comunicação sem fio Wi-Fi 802.11 e *Bluetooth*. Tem dimensões de 6,5 x 3,0 cm. Os microcomputadores utilizados nesta pesquisa operaram com o sistema operacional *Raspbian*, baseado em Debian GNU/Linux.
- Unidade de Medida Inercial (*Inertial Measurement Unit*, IMU) baseada em tecnologia *micro-electrical-mechanical system* (MEMS). Trata-se do módulo InvenSense MPU-9250 (INVENSENSE, 2019), de 1,4 x 1,4 cm com 10 graus de liberdade. É composto por acelerômetro, giroscópio e magnetômetro (todos triaxiais) somados ao módulo barométrico BMP280 (pressão e temperatura). A biblioteca C++/Python chamada RTIMULib (RICHARDS TECH, 2018) foi instalada



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

no sistema operacional *Raspbian* para configuração, calibração e obtenção dos dados do módulo IMU. Além dos dados brutos do módulo inercial (acelerações, velocidades angulares e intensidade do campo magnético nos três eixos, bem como pressão atmosférica e temperatura), a biblioteca fornece a atitude do sensor (ângulos de rolamento, inclinação e guinada) estimada pela fusão dos dados inerciais e magnéticos por filtro de Kalman e a altitude estimada pela fórmula barométrica. Os dados foram gravados a aproximadamente 83 Hz devido às limitações da biblioteca e do hardware selecionados, valor próximo dos 100 Hz inicialmente pretendidos considerando as frequências atingíveis de forma estável por *smartphones* intermediários.

- Módulo *Global Positioning System* (GPS) da Ublox modelo 6M, compreendendo receptor de 3,5 x 2,5 cm e antena externa de 2,6 x 2,6 cm. O modelo permite apenas posicionamento por ponto simples com frequência de até 5 Hz utilizando sinais dos satélites da constelação GPS (U-BLOX, 2011). Para o controle do módulo e aquisição dos dados de posição, velocidade e tempo, foi utilizada a biblioteca Python chamada GPSD (BRAAM, 2017). Para o presente trabalho, adotou-se a taxa de 1 Hz (configuração predefinida) por limitações de processamento do microcomputador e adequação à atividade proposta.

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

- Unidade de armazenamento (cartão SD) de 16 GB. Nos testes preliminares (1 Hz para GPS e 83 Hz para inercial), verificou-se a possibilidade de armazenamento de dados de até 120 horas de gravação.
- Alimentação de energia por carregador portátil com capacidade de 10.400 mAh. Nos testes realizados antes das atividades de campo, a bateria suportou a operação do conjunto por aproximadamente 50 horas, permitindo o funcionamento dos dispositivos de forma independente da parte elétrica do veículo no qual foram instalados.



Figura 1. Conjunto composto com nove unidades sensores e detalhes de uma destas unidades. Fonte: os autores.

Descrição dos testes realizados

O primeiro conjunto de testes foi realizado junto à companhia *Rete Ferroviaria Italiana* (estatal que gere a infraestrutura ferroviária italiana) entre 14 e 17 de janeiro de 2020 pela malha de alta velocidade desse país (aproximadamente 1.500 km nos eixos Nápoles – Milão e Turim – Veneza) durante atividade de inspeção programada. Tais testes se deram a bordo do trem de diagnóstico ETR500Y2, adaptado de uma composição de modelo ETR500 e nomeado *Diamante* (*acrônimo para diagnostico, manutenzione e*

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

tecnologia). Esse trem de inspeção está em operação desde 2012, é composto por oito carros somados a duas locomotivas e está equipado com mais de duzentos sensores de diferentes naturezas, incluindo conjuntos de sensores inerciais de nível industrial para monitoramento da dinâmica do veículo e, em combinação com medidas a laser, caracterização de irregularidades da via.



Figura 2. Trem diagnóstico da Rede Ferroviária Italiana.

Tabela 1. Itinerário dos testes executados a bordo do trem Diamante na rede de alta velocidade italiana.

Dia	Origem	Paradas intermediárias	Destino	Deslocamento aproximado (km)
1	Nápoles	Roma > Florença > Bolonha	Milão	800
2	Milão	Turim > Brescia > Milão > Brescia	Vicenza	640
3	Vicenza	Veneza > Pádua > Veneza	Milão	410
4	Milão	Bolonha > Florença > Roma	Nápoles	800

As inspeções na rede de alta velocidade são efetuadas a cada duas semanas, enquanto o ciclo em vias de menor velocidade e capacidade é da ordem de 4 meses. As vias da rede de alta velocidade são em bitola internacional, têm velocidades máximas de



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

projeto entre 200 e 300 km/h (majoritariamente acima de 240 km/h) e variam entre trechos em lastro (majoritários) e em laje de concreto.

Para os testes a bordo do trem *Diamante*, os sensores¹ foram diretamente aderidos ao piso do salão do trem por meio de fitas adesiva dupla-face². De forma a viabilizar a análise da influência da posição dos sensores sob o conceito coletivo, adotou-se diferentes distribuições dos sensores de diferentes distribuições dos sensores (oito ou nove a depender do arranjo) ao longo da composição para os diferentes dias de testes conforme a seguinte descrição (ilustrados na Figura 3):

- Primeiro dia: nove sensores foram agrupados sob a nona (última) janela à direita³ do oitavo carro, aproximadamente sobre o truque traseiro.
- Segundo dia: nove sensores foram distribuídos pelo oitavo carro, com cada sensor posicionado sob cada uma das nove janelas à direita do referido carro (espaçamento longitudinal de aproximadamente 1,9 m entre sensores consecutivos).

¹ Neste texto, as unidades sensoras são referidas simplesmente pelo termo sensor.

² Identificou-se na literatura que a influência amortecedora das fitas dupla-face se dá em faixas de alta frequência, acima daquelas de interesse para caracterização do conforto e descrição indireta da qualidade viária (MATHEWS, 2022)).

³ Orientação em relação ao trem (de acordo com a frente e a traseira da composição, dadas pela numeração fixa dos carros de 1 a 8) e não em relação ao sentido de deslocamento. Ressalta-se que o trem inspecionou determinados trechos em movimento reverso de acordo com a necessidade operacional, invertendo a orientação do trem em relação à orientação da via e do deslocamento.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- Terceiro dia: um sensor instalado por carro (total de oito sensores) em posições homólogas, à direita sob a última janela de cada carro.
- Quarto dia: os nove sensores foram distribuídos na seção transversal alinhada à última janela do oitavo carro, com um sensor posicionado sob a janela esquerda e os demais sensores igualmente distribuídos entre a janela direita e o centro dessa seção transversal.

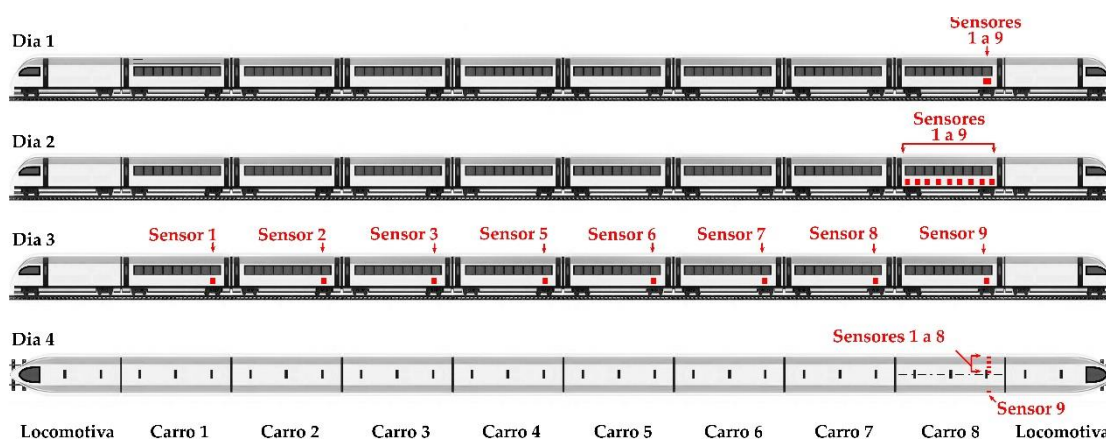


Figura 3. Distribuição dos sensores nos testes a bordo do trem *Diamante* da Rede Ferroviária Italiana.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 4. Instalação dos sensores no piso do trem *Diamante* para o primeiro dia (à esquerda) e para o segundo dia (à direita).

Para este artigo, foram realizadas análises para oito trechos (dois por dia de teste, apresentados na Tabela 2) de velocidade aproximadamente constante, de forma a remover a influência da velocidade na magnitude das acelerações.

Tabela 2. Subtrechos selecionados para análise

Dia	Trecho	Extensão aprox. (km)	V média (km/h)	Desvio padrão V (km/h)	Local. aprox.	Direção trem
1	A	13,3	238,7	2,5	Montepulciano	Direta
1	B	20,1	241,2	5,8	Módena	Direta
2	A	53,9	298,8	2,5	Novara	Direta
2	B	15,2	195,1	5,0	Milão	Direta
3	A	14,0	218,5	5,8	Pádua	Reversa
3	B	10,2	159,5	2,5	Soave	Direta
4	A	10,1	181,4	3,6	Parma	Reversa
4	B	73,2	239,4	2,9	Arezzo	Direta

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

O segundo conjunto de testes foi realizado na Linha 7 – Rubi (da Estação da Luz, centro da cidade de São Paulo, Brasil, à Estação Jundiaí, estado de São Paulo, Brasil) da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM). A primeira viagem, um ciclo completo de ida (Luz-Jundiaí) e volta (Jundiaí-Luz) no dia 6 de abril de 2022, compreendeu coleta de dados de vibração a bordo do carro-controle Plasser & Thurer EM100U (Figura 5), empregado pela CPTM na inspeção da rede ferroviária metropolitana de São Paulo. Os dados técnicos do carro-controle EM100U são apresentados na Tabela 3.



Figura 5. Carro-controle Plasser & Thurer EM100U.

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

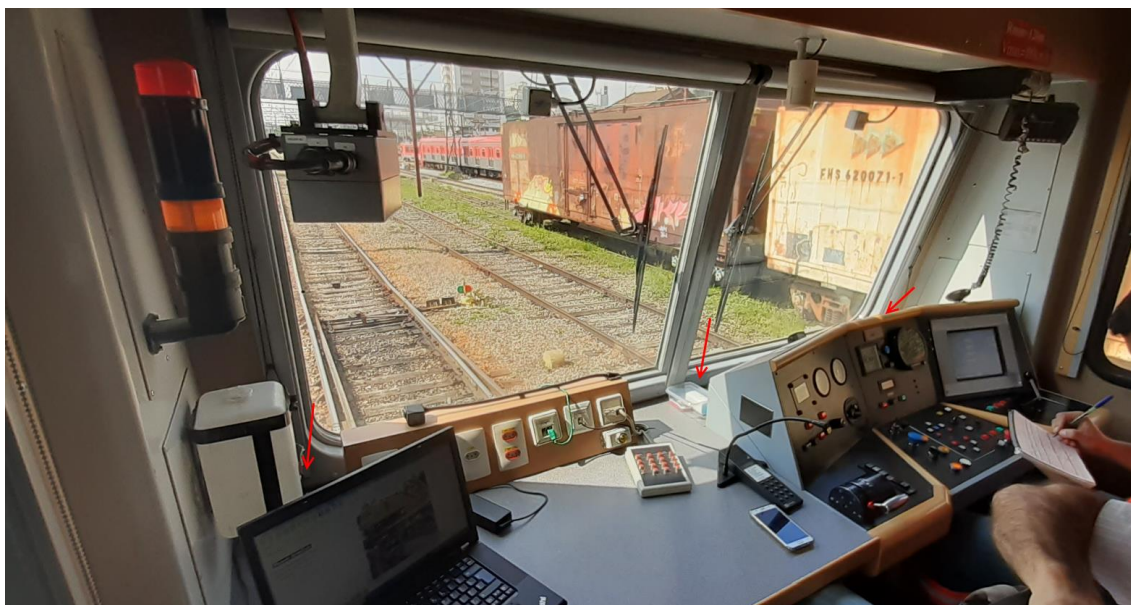


Figura 6. Instalação dos sensores sobre o painel do carro-controle da CPTM.

Tabela 3. Dados técnicos do carro-controle Plasser & Theurer EM100U. Fonte: Mongiò (2014).

Comprimento	18,90 m
Largura	4,13 m
Distância entre os eixos	12,00 m
Potência do motor	320 kW
Peso	58 t
Velocidade operação (inspeção de geometria e de desgaste dos trilhos por triangulação <i>laser</i> , vídeo-inspeção, inspeção de rede aérea)	100 km/h
Velocidade operação (ultrassom nos trilhos)	60 km/h

Nos testes a bordo do EM100U, foram embarcados 10 dispositivos sensores distribuídos conforme descrito a seguir e representado esquematicamente na Figura 7. As



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

orientações (dianteira, traseira, esquerda, direita) levam em conta a cabine principal e sua entrada, orientada no referido teste ao sentido Jundiaí.

- Sensores 1, 2 e 3 aderidos por fita dupla-face ao painel da cabine traseira, com o sensor 1 posicionado ao centro e os sensores 2 e 3 nas extremidades.
- Sensores 6, 7, 8 e 9 distribuídos em seção aproximadamente central (desvio de 1,7 m do centro) do salão do carro-controle, aderidos ao piso. A instalação exatamente sobre o centro é impraticável devido à distribuição interna dos equipamentos do carro-controle.
- Sensores 10, 11 e 13 instalados no painel da cabine principal, com o sensor 13 posicionado ao centro e os sensores 10 e 11 nas extremidades.

Para fins de controle dos sensores e do fluxo de seus dados, optou-se por manter a numeração dos sensores considerando o conjunto total de sensores disponíveis (13), com a exclusão dos sensores 4, 5 e 12 por problemas operacionais a serem investigados.

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

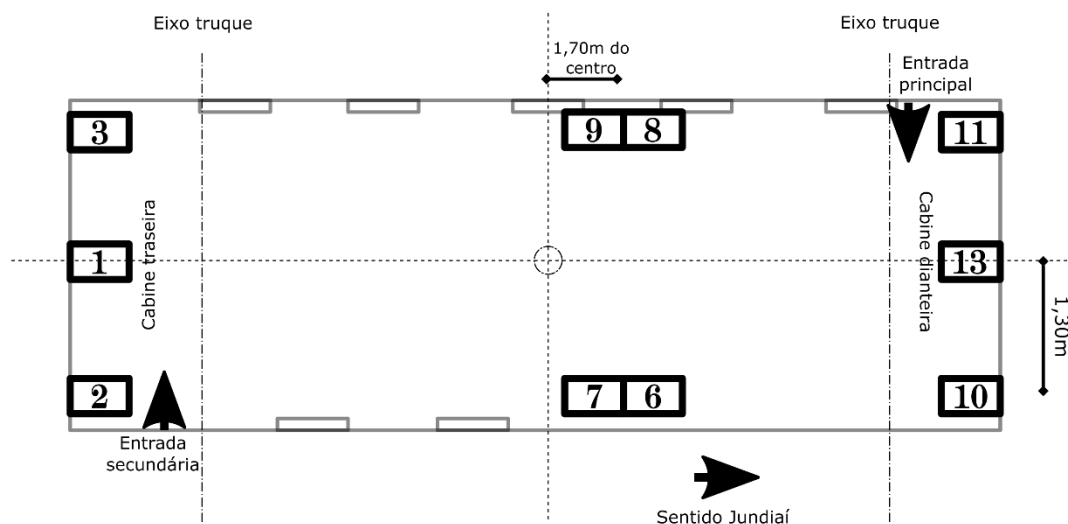


Figura 7. Representação esquemática de topo da distribuição dos sensores no carro-controle

Ressalta-se que o trecho de menor velocidade analisado nos testes italianos é de 158 km/h, metade da velocidade máxima para o trem de diagnóstico italiano e 58% superior à velocidade máxima do carro-controle da CPTM. Cita-se, também, que as vias da CPTM nas quais se realizou os testes são de Classe III (classificação da *Federal Railroad Administration* - FRA, com velocidade máxima de 96 km/h para transporte de passageiros), condição menos exigente quanto às exceções geométricas admissíveis em comparação às vias de velocidade máxima de 300 km/h, como no caso italiano.

Tratamento dos dados

Fusão dos dados



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O conceito coletivo considera a fusão de múltiplos sinais de vibração oriundos de sensores operando concomitantemente durante uma viagem ou na fusão de sinais obtidos de viagens sucessivas por um mesmo trecho de via. A fusão de dados tem três aspectos críticos:

- Alinhamento espaço-temporal dos dados, realizado por meio da correlação cruzada com defasagem em tempo (*time-lagged cross-correlation*). Este passo é necessário para evitar interferência destrutiva decorrente de uma defasagem (erro nos relógios dos sensores) no cálculo do sinal médio.
- Identificação e exclusão dos sinais discrepantes, por meio do cálculo de correlação entre sinais brutos e exclusão daqueles com coeficiente de correlação abaixo de limiar definido para o conjunto de dados.
- Integração em si, realizada por meio de duas abordagens: i) cálculo da média simples dos sinais, caso especial da média ponderada pelo inverso da variância; e ii) cálculo das respostas médias (média dos valores eficazes por trecho) do conjunto de sensores. Como resultado da abordagem coletiva, o sinal médio (coletivo, opção *i*) calculado de sensores redundantes resultaria em redução de ruído por fator igual a 1 sobre a raiz de N (sendo N o número de sensores) de acordo com o Teorema do Limite Central. O cálculo das respostas médias (opção *ii*), por sua vez, não tem o potencial de redução de ruídos uma vez estes são



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

internalizados no cálculo do valor eficaz. O presente trabalho, assim, realiza análise comparativa do desempenho destes dois possíveis indicadores médios.

As acelerações verticais, tanto individuais quanto a média dos sinais, foram tratada segundo os procedimentos estabelecidos pela Norma *ISO 2631- Vibração mecânica e choque - Avaliação da exposição humana às vibrações de corpo inteiro* - (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1997), com parâmetros obtidos de sua *Parte 4: Diretrizes para a avaliação dos efeitos da vibração e do movimento rotativo no conforto dos passageiros e da tripulação em sistemas de transporte guiados*. Por meio da ponderação dos sinais pelas faixas de frequência relevantes para o conforto humano, obteve-se valores de aceleração ponderada (a_w) para cada um dos sensores e calculou-se o valor eficaz para trechos de 200 metros. A opção pela metodologia da ISO para avaliação do conforto ocorre devido à sua prevalência em trabalhos relacionados, permitindo comparações. A escolha do comprimento da seção levou em conta valores típicos para o domínio ferroviário na descrição dos parâmetros de via (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2010). A referência que descreve os testes italianos (omitido para avaliação cega) apresenta maiores detalhes a respeito dessas opções.

Por fim, para validação dos resultados de conforto, os valores eficazes das acelerações ponderadas foram correlacionados com os desvios-padrão dos parâmetros em trechos



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de 200 metros. As informações registradas pelo trem de inspeção da Rede Ferroviária Italiana e pelo carro-controle da CPTM, ambos com resolução espacial de 0,25 metro, são apresentadas a seguir:

1. Trem *Diamante* da RFI:

a. Parâmetros de geometria:

- i. nivelamento longitudinal levantado por laser óptico: esquerda e direita, de 23,22 m, faixas D1 (3 a 25 m de comprimento de onda), D2 (25 a 70 m) e D3 (70 a 150 m) da norma europeia;
- ii. alinhamento levantado por laser óptico: esquerda e direita, corda de 23,22 m, faixas D1 (3 a 25 m), D2 (25 a 70 m) e D3 (70 a 200 m) da norma europeia;
- iii. torção levantada por laser óptico combinado com plataforma inercial, em bases de 3 e 9 metros;
- iv. nivelamento transversal levantado por plataforma inercial;
- v. bitola levantada por laser óptico.

b. Dados de posição: quilometragem, coordenadas geográficas (obtidas por GNSS diferencial)

c. Dados de operação: velocidade, data e hora, identificação do veículo.

2. Carro-controle *da CPTM*:



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- a. Parâmetros de geometria (levantados por plataforma inercial triangulação *laser*):
 - i. curvatura da via;
 - ii. nivelamento longitudinal: esquerda e direita, em cordas de 10 e 20 metros;
 - iii. alinhamento: esquerda e direita, em cordas de 10 e 20 metros;
 - iv. empeno em base de 20 metros;
 - v. torção em base de 10 metros;
 - vi. superelevação;
 - vii. bitola.
- b. Perfil dos trilhos segundo classificação da União Internacional de Caminhos de Ferro (UIC) e desgaste dos boletos.
- c. Dados de posição: quilometragem, coordenadas geográficas, identificação da linha e da via (obtidas por marcos quilométricos, hodometria e posicionamento GPS).
- d. Dados de operação: velocidade, data e hora, direção da viagem, identificação do veículo.

DIAGNÓSTICO

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

Inicialmente, a Figura 8 mostra representações no domínio do tempo dos sinais de aceleração individuais e do sinal médio (fundido) para o primeiro dia dos testes italianos, trecho A. O primeiro dia foi selecionado para esta análise porque os sensores são teoricamente redundantes (sob uma solitação similar) e as diferenças em termos de amplitude das acelerações devem-se apenas ao ruído dos sensores. Este exemplo é representativo da redução de ruído proporcionada pelo sinal médio, convergente com a redução teoricamente esperada. Para este trecho, a variância na aceleração vertical para o conjunto de sensores varia de 0,06 a 0,14 m/s^2 e tem uma média igual a 0,11, enquanto a variância do sinal médio (após fusão) é igual a 0,04 m/s^2 (fator de redução de cerca de $1/\sqrt{N}$ em relação à média, com $N = 7$ sensores).

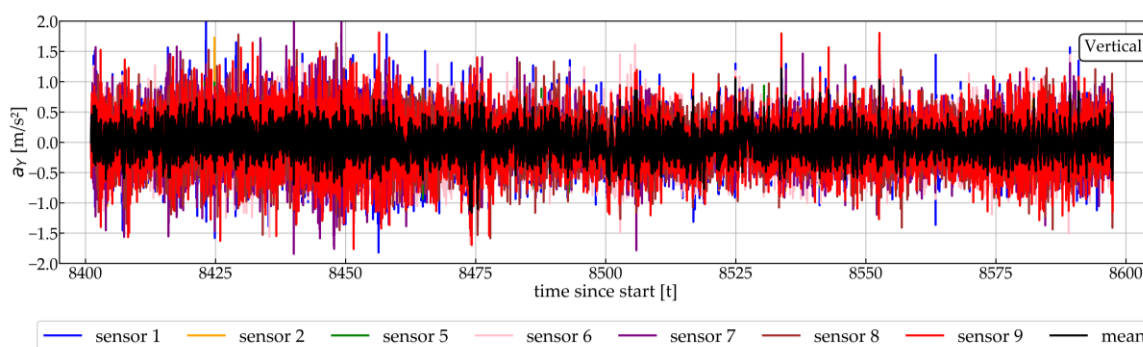
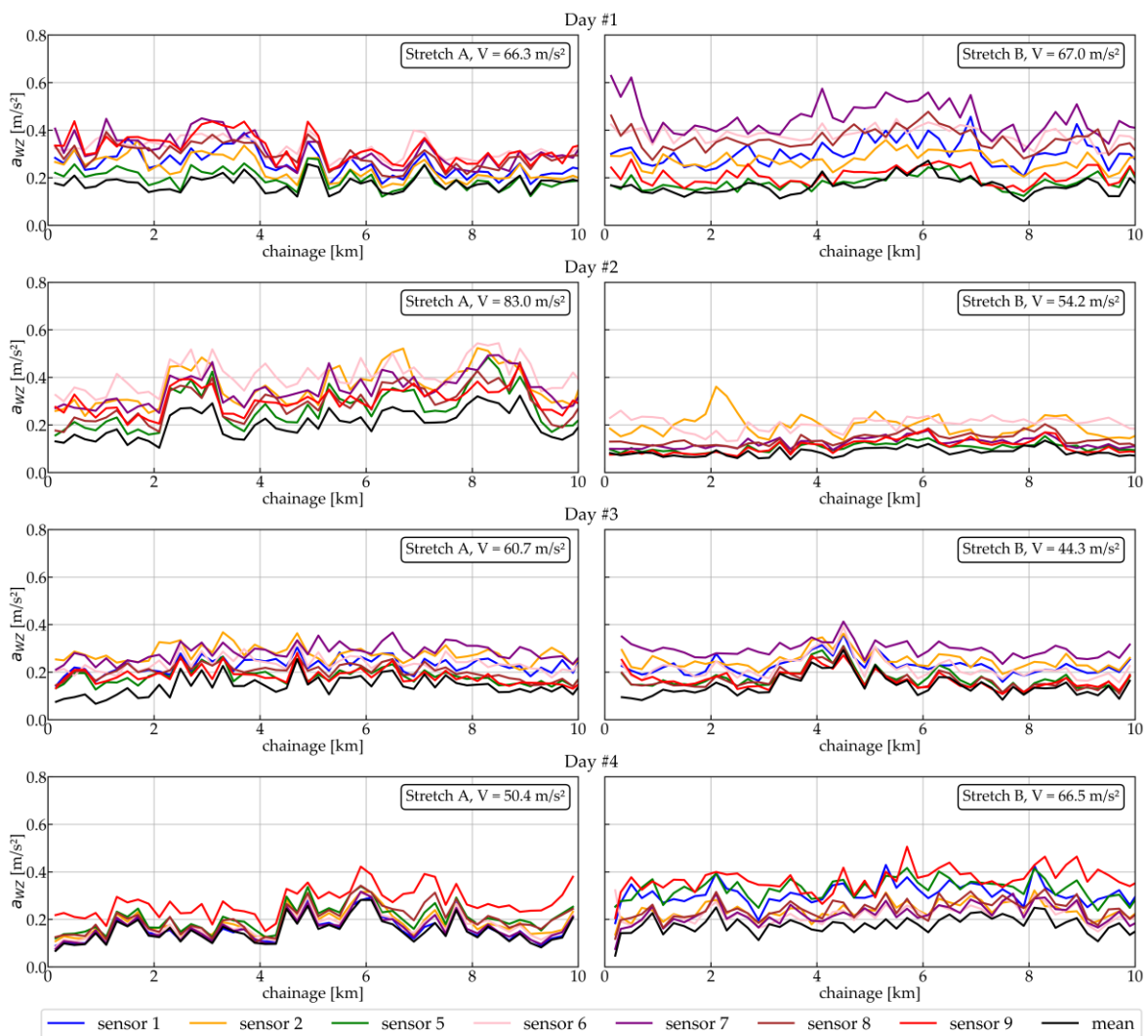


Figura 8. Acelerações individuais brutas e sinal médio (média aritmética dos sinais) para o primeiro dia de testes italianos, trecho A.

Os valores eficazes das acelerações ponderadas segundo a ISO-2631 são apresentados nas Figuras 9 e 10 para, respectivamente, os testes italianos e brasileiras. Para cada figura, adotou-se a mesma escala vertical nos gráficos de forma. Ademais, excluiu-se os

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

sensores que apresentaram comportamento discrepante (sensores 3 e 4 nas viagens italianas e sensor 3 na viagem brasileira). Na Figura 6, apresenta-se apenas a viagem de ida do carro-controle como representativa do comportamento também verificado na viagem de volta.



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

Figura 9. Valor eficaz das acelerações verticais ponderadas segundo a ISO-2631, subtrechos dos testes italianos.

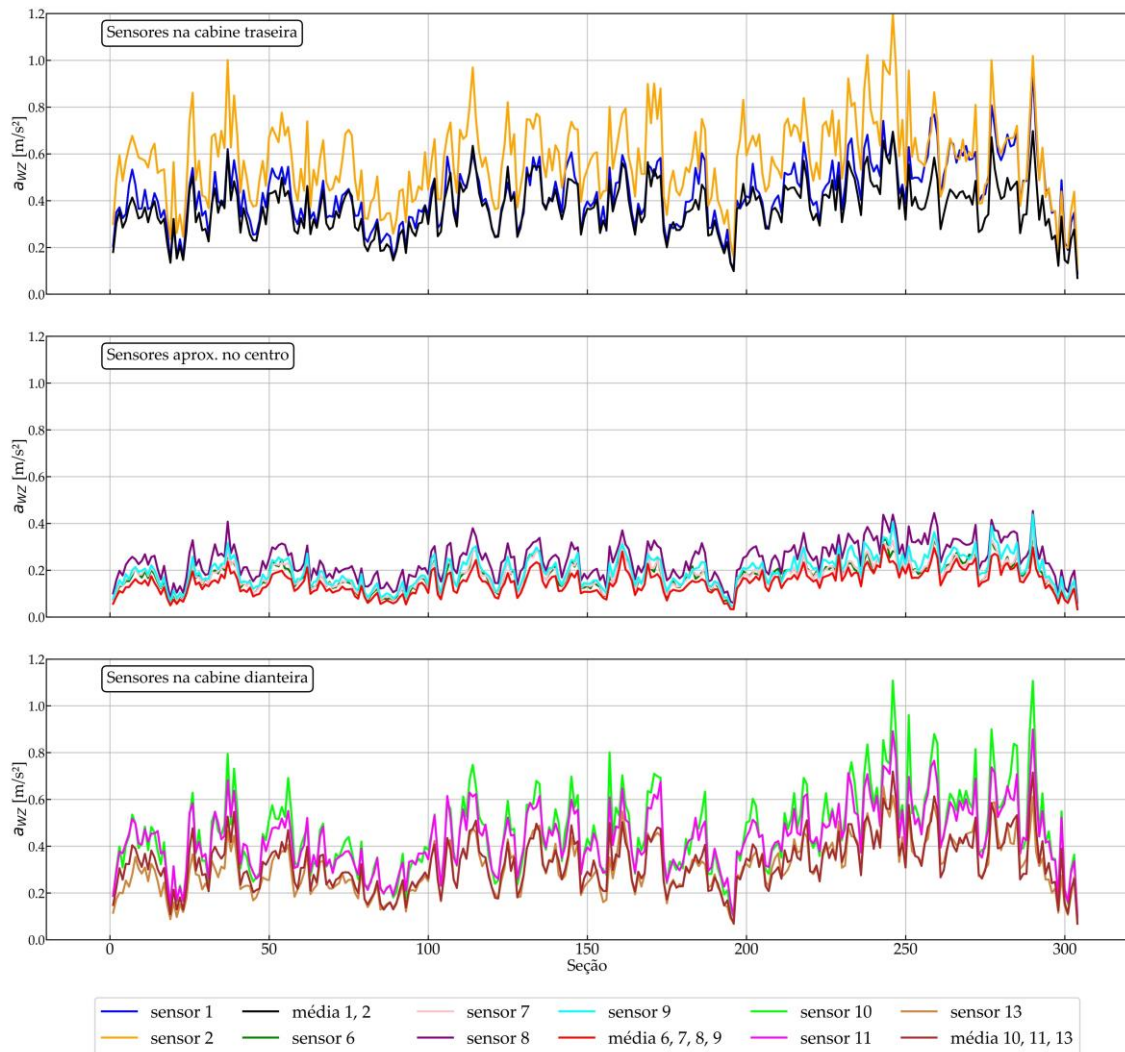


Figura 10. Valor eficaz das acelerações verticais ponderadas segundo a ISO-2631, viagem de ida do teste na CPTM.

A Figura 11 sumariza os resultados considerando o valor eficaz médio por sensor e por trecho, permitindo comparações em termos de dispersão entre os sensores e valores médios da população de sensores para cada trecho. Tem-se, assim, indicativos da

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

variância entre sensores e entre viagens (composição de diferenças em velocidade e em nível de degradação das vias).

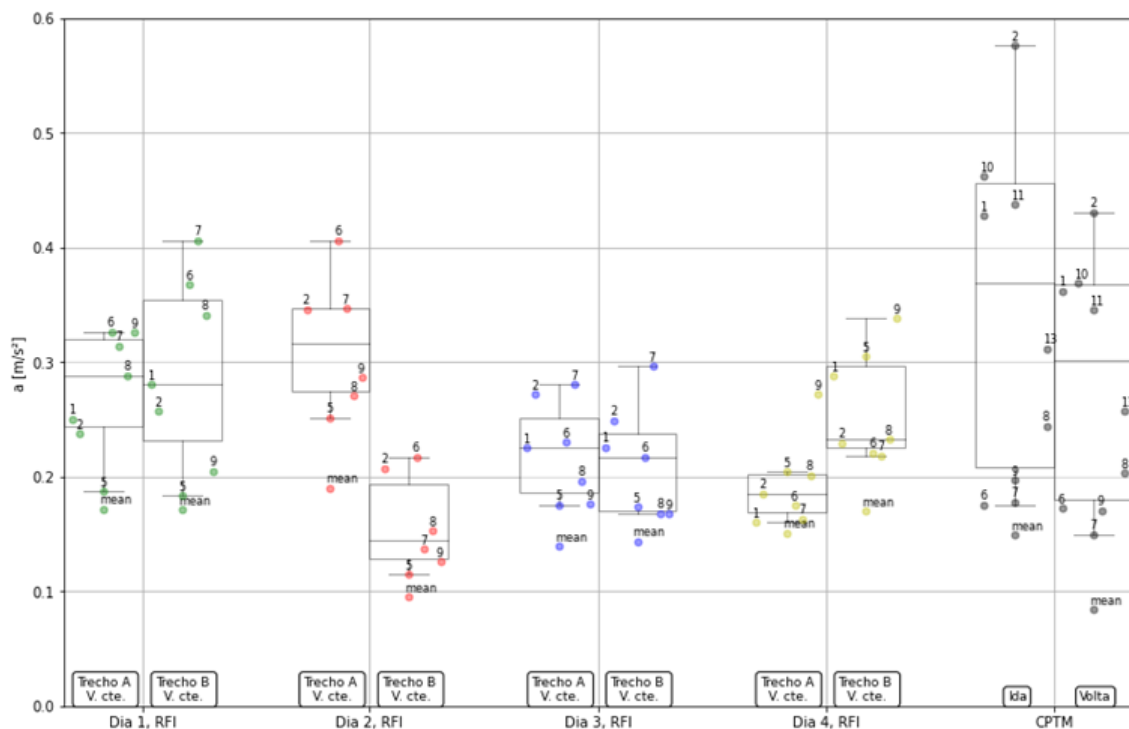


Figura 11. Diagrama de caixa para os valores eficazes médios por sensor e por trecho.

Para validação dos resultados de conforto, calculou-se a correlação destes com os dados de nivelamento longitudinal (desvio padrão⁴ por seção) obtidos pelo trem de inspeção e pelo carro-controle⁵ conforme apresentado na seção anterior. As correlações são

⁴ Equivalente ao valor eficaz para média nula, isto é, se desconsiderados desvios sistemáticos em geometria.

⁵ Enfatiza-se que, a despeito das questões de imprecisão associadas às técnicas de levantamento da geometria por plataforma móvel, tal técnica é de uso corrente na inspeção viária e atende a critérios mínimos que permitem a descrição da qualidade da geometria, podendo ser tomada como referência no caso da análise de sensores de baixo custo e de baixa qualidade, como no presente caso.



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

apresentadas nas Tabelas de 4 a 7. Os sensores são representados por seu número (de 1 a 9, com omissões em caso de sensor com operação discrepante), bem como são listados os resultados para o sinal médio (coluna homônima) e para média dos valores eficazes dados pelos sensores (coluna “Valor RMS”). No caso do teste na CPTM, calculou-se também o sinal médio para sensores em uma mesma posição (colunas “Média 1, 2”, “Média 6, 7, 8, 9” e “Média 10, 11, 13”). São apresentadas apenas os resultados para correlação média superior a 0,3, bem como apenas valores para um dos trechos de velocidade constante como representativo do comportamento também verificado no outro trecho do mesmo dia. Não foi possível realizar validação para os dados do primeiro dia de testes na ferrovia italiana por não disponibilização de dados. Ademais, para as viagens na CPTM, considerou-se apenas os intervalos com velocidade superior a 50 km/h, com menor variação de velocidade e menor impacto da velocidade na correlação entre vibrações e irregularidades.

Tabela 4. Coeficientes de correlação entre acelerações verticais ponderadas e parâmetros da via, trecho A do dia 2 dos testes italianos.

Parâmetro	2	5	6	7	8	9	Sinal médio	Média RMS
Niv. long., esquerda, D1	0,43	0,62	0,45	0,63	0,62	0,62	0,63	0,63
Niv. long., direita, D1	0,4	0,58	0,4	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
Niv. long., esquerda, D2	0,23	0,41	0,34	0,40	0,39	0,40	0,37	0,4
Niv. long., direita, D3	0,13	0,44	0,32	0,35	0,35	0,37	0,33	0,36
Niv. long., direita, D2	0,16	0,34	0,24	0,34	0,27	0,33	0,29	0,31

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

Tabela 5. Coeficientes de correlação entre acelerações verticais ponderadas e parâmetros da via, trecho A do dia 3 dos testes italianos.

Parâmetro	1	2	5	6	7	8	9	Sinal médio	Média RMS
Niv. long., direita, D1	0,56	0,61	0,74	0,42	0,55	0,56	0,67	0,64	0,68
Niv. long., esquerda, D1	0,56	0,65	0,75	0,46	0,50	0,56	0,70	0,63	0,70
Niv. long., esquerda, D2	0,4	0,57	0,54	0,4	0,49	0,48	0,62	0,56	0,60
Niv. long., direita, D2	0,36	0,56	0,5	0,37	0,45	0,41	0,57	0,50	0,55

Tabela 6. Coeficientes de correlação entre acelerações verticais ponderadas e parâmetros da via, trecho B do dia 4 dos testes italianos.

Parâmetro	1	2	5	6	7	8	9	Sinal médio	Média RMS
Niv. long., esquerda, D1	0,61	0,85	0,65	0,86	0,81	0,83	0,44	0,91	0,82
Niv. long., total, D1	0,61	0,84	0,64	0,83	0,8	0,82	0,36	0,91	0,81
Niv. long., esquerda, corda 10 m	0,6	0,83	0,64	0,85	0,8	0,82	0,43	0,9	0,81
Niv. long., direita, D1	0,61	0,78	0,62	0,77	0,76	0,75	0,29	0,85	0,77
Niv. long., direita, corda 10 m	0,6	0,77	0,61	0,77	0,75	0,74	0,29	0,84	0,76
Niv. long., esquerda, D2	0,33	0,5	0,36	0,52	0,5	0,46	0,3	0,55	0,48
Niv. long., direita, D2	0,32	0,44	0,34	0,46	0,46	0,39	0,21	0,49	0,43
Niv. long., esquerda, D3	0,23	0,31	0,21	0,3	0,31	0,3	0,24	0,32	0,3
Niv. long., direita, D3	0,23	0,3	0,21	0,29	0,3	0,29	0,23	0,3	0,29

Tabela 7. Coeficientes de correlação entre acelerações verticais ponderadas e parâmetros da via, seções com velocidade superior a 50 km/h (188 de 304 seções), testes na CPTM

Parâmetro	1	2	Média 1, 2	6	7	8	9	Média 6, 7, 8, 9	10	11	13	Média 10, 11, 13	Média total sinais	Média RMS
Niv. long., esquerda, corda 10 m	0,29	0,28	0,26	0,61	0,58	0,4	0,48	0,63	0,24	0,32	0,49	0,52	0,84	0,29
Niv. long., direita, corda 10 m	0,31	0,32	0,27	0,6	0,57	0,41	0,47	0,59	0,25	0,32	0,46	0,49	0,81	0,31
Niv. long., esquerda, D1	0,28	0,29	0,25	0,58	0,54	0,38	0,44	0,56	0,25	0,33	0,47	0,5	0,80	0,29
Niv. long., direita, D1	0,34	0,36	0,3	0,58	0,56	0,43	0,48	0,54	0,31	0,38	0,46	0,5	0,76	0,35
Niv. long., esquerda, corda 20 m	0,21	0,17	0,19	0,45	0,41	0,26	0,34	0,45	0,16	0,22	0,34	0,37	0,64	0,20
Niv. long., direita, corda 20 m	0,25	0,26	0,24	0,44	0,42	0,31	0,36	0,42	0,21	0,27	0,35	0,38	0,60	0,26
Niv. long., esquerda, D0	0,69	0,63	0,59	0,79	0,81	0,75	0,79	0,72	0,7	0,71	0,73	0,74	0,54	0,72
Niv. long., direita, D0	0,53	0,44	0,44	0,63	0,66	0,59	0,61	0,6	0,54	0,54	0,58	0,6	0,52	0,54



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Por fim, a Figura 12 apresenta o mapeamento do conforto (valor eficaz da aceleração vertical ponderada segundo a ISO-2631, em trechos de 200 m) e sua confrontação com valores de desvio padrão do nivelamento longitudinal (faixa D1, também em trechos de 200 m) para um subtrecho do quarto dia de testes na ferrovia italiana. Utiliza-se escala coroplética limitada aos valores máximos e mínimos para o conjunto de dados desse dia de testes⁶. Este exemplo de utilização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) destaca potencialidades no tratamento e na apresentação dos dados oriundos do sistema proposta, atividade possibilitada pela coleta de posições GPS concomitante ao monitoramento das vibrações. Essa ferramenta visual permite identificação de trechos associados a maior desconforto e possivelmente associados a maiores desvios em geometria, a serem futuramente investigados por meio de outras técnicas.

⁶ Optou-se por não utilizar escala coroplética vinculada aos limites dados pelas normas (tanto para conforto quanto irregularidades) pois os valores para os trechos considerados são relativamente baixos. No caso do conforto, os valores eficazes estão sempre nos dois níveis de menor desconforto sugeridos pela ISO-2631. No caso das irregularidades, os valores de desvio padrão para a faixa D1 estão sempre inferiores ao nível de alerta definido pela EN 13848 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2017).

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

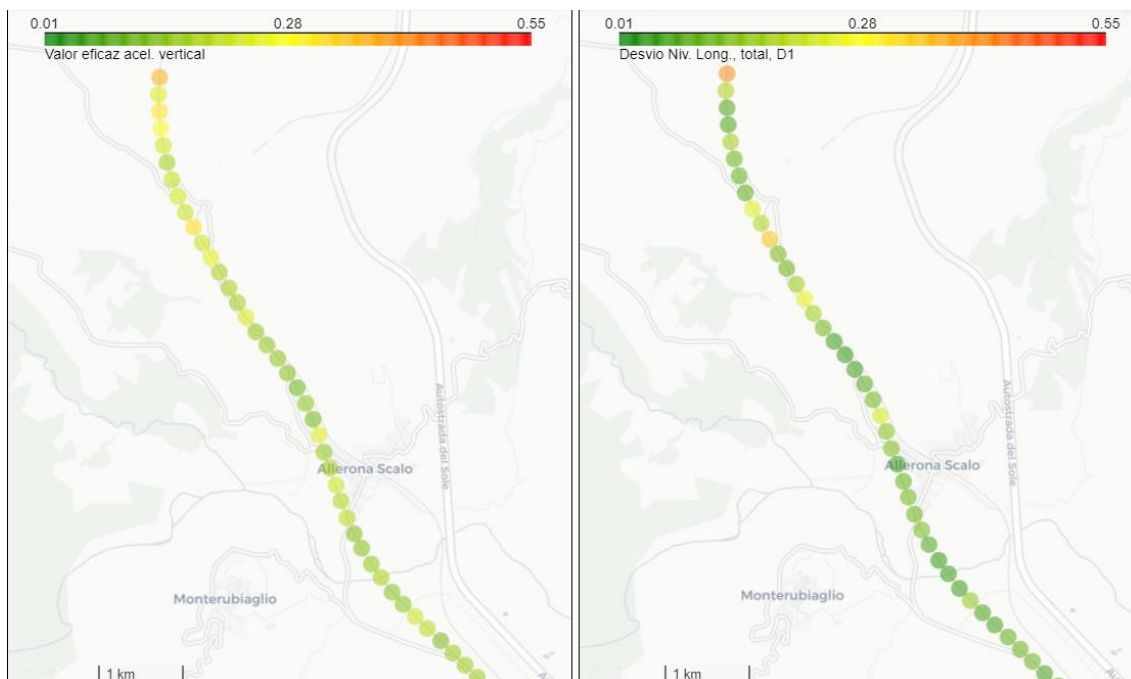


Figura 12. Mapeamento do conforto (valor eficaz da aceleração vertical ponderada segundo a ISO-2631 para o sinal médio, em trechos de 200 m), à esquerda, e valores de desvio padrão do nivelamento longitudinal (faixa D1, também em trechos de 200 m), à direita. Trecho do quarto dia de testes na ferrovia italiana.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Magnitude das vibrações

Inicialmente discute-se o resultado em termos das magnitudes de vibração observadas nos testes nos diferentes cenários propostos. Nos testes italianos, não foi possível identificar uma correlação clara entre a posição do sensor e possível maior ou menor magnitude de vibração. A magnitude da variação entre os sensores é similar, para todos



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

os dias, àquela apresentada no primeiro dia, em que os sensores são redundantes e estão instalados em uma mesma posição. As diferenças identificadas entre sensores são, portanto, principalmente devidas às características dos sensores. Por exemplo, o sensor 5 apresenta, para ambos os trechos no segundo dia, a menor ou a segunda menor magnitude em aceleração vertical, o que é um comportamento esperado para um sensor colocado no centro do vagão. No entanto, seu vizinho mais próximo não apresenta o mesmo comportamento, contrariando a influência esperada da posição do sensor na magnitude obtida. Para o terceiro dia, os sensores 7 e 2 apresentam a maior vibração para ambos os trechos, mas a magnitude da diferença também pode ser explicada pela variação dos sensores em vez de uma possível variação da suspensão de um vagão para outro. O mesmo se aplica à maior aceleração registrada pelo sensor 9 no quarto dia, decorrente de variação do sinal como demonstrado pela sua menor correlação com os parâmetros de via. Essas observações contribuem para a conclusão de que a variabilidade sensor-a-sensor (relacionada à repetibilidade entre sensores) tem uma influência pelo menos da mesma magnitude que a variabilidade causada pela variação de posição para esse conjunto de dados.

Em contrapartida, verificou-se nos resultados brasileiros uma maior vibração nos extremos do veículo, esperada em teoria. Os resultados para os sensores posicionados aproximadamente na seção central apresentam gráfico de forma semelhante à apresentada nas posições extremas, mas com magnitudes notavelmente inferiores para



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ida e volta. Assim, pode-se inferir que o sensor empregado possui sensibilidade adequada para descrição dessa diferença em um contexto de maiores vibrações, conclusão não obtida quando da análise dos testes na ferrovia italiana. Essa diferença pode ser explicada pelas diferenças em termos de magnitudes médias: ainda que as velocidades sejam menores nos testes brasileiros, os níveis de desconforto identificados são consideravelmente maiores que aqueles identificados nos testes italianos. Enquanto o valor eficaz da aceleração ponderada, para as mesmas seções de 200 m, variou majoritariamente na faixa entre 0,2 e 0,6 m/s^2 nos testes italianos, o valor para os testes brasileiros está na faixa de 0,2 a 1,2 m/s^2 , resultado da diferença de classe entre as vias analisadas.

Além disso, como já verificado nos testes italianos, os dados dos sinais médios de sensores redundantes são usualmente inferiores em magnitude aos dos sensores individuais e preservam aproximadamente mesma forma gráfica, evidenciando redução de ruído conforme o Teorema do Limite Central sem perda considerável de informação associada ao conforto.

Correlação entre vibrações e parâmetros da geometria

De forma geral, quanto à correlação entre vibrações verticais e irregularidades de via verticais (nivelamento longitudinal), verificou-se que os sensores apresentam maior sensibilidade (maior correlação entre vibração e parâmetros da via) aos desvios



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ocorridos em comprimentos de onda menores e menor sensibilidade (menor correlação) aos desvios ocorridos em maiores comprimentos de onda. De forma específica, os testes italianos permitiram a identificação de correlação de moderada a forte entre acelerações verticais e nivelamento longitudinal na faixa D1 (máximo de 0,91 para a relação entre o sinal médio e o nivelamento longitudinal, faixa D1 de comprimento de onda no quarto dia de testes). Ressalta-se, contudo, que foram consideradas apenas seções de velocidade constante (e todas superiores a 150 km/h).

Nos testes brasileiros, idealmente, seriam selecionados apenas trechos com velocidade aproximadamente constante, mas o perfil de velocidade desenvolvido durante os testes na CPTM não possibilitou tal recorte com a preservação de um número mínimo de seções para representatividade estatística. A partir dessa constatação e da tentativa de reduzir a influência da variação da velocidade nos resultados, optou-se por conduzir a análise de correlação excluindo-se seções com velocidade média inferior a 50 km/h. Com esse seccionamento dos dados, verificou-se correlação de moderada a forte (superior a 0,5) entre as acelerações ponderadas e o nível longitudinal em seus menores comprimentos de onda (máximo de 0,84 para a relação entre o sinal médio e o nivelamento longitudinal, corda de 10 m).

Desempenho dos indicadores médios – sinal médio e média dos valores eficazes



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Quando considerados os sinais médios de sensores redundantes (sensores instalados em uma mesma posição, dias 1 e 4 dos testes italianos), a validação permitiu identificar aumento na correlação entre as vibrações verticais e o nivelamento longitudinal; isto é, os valores de correlação são superiores à média das correlações individuais. Comportamento similar ocorre quando os sinais não são perfeitamente redundantes, mas estão embarcados em um mesmo carro, caso do dia 2 dos testes italianos e do teste a bordo do carro controle da CPTM). Os resultados permitem, portanto, estabelecer o ganho em acurácia derivado da abordagem coletiva e, mais precisamente, do cálculo do sinal médio representativo de uma população de sensores ou de sucessivas passagens de um sensor por uma mesma via.

Contudo, quando os sinais são não redundantes e os sensores estão em carros distintos de uma composição (casos do dia 3 dos testes italianos), verifica-se perda de desempenho do sinal médio. Em outras palavras, o sinal médio tem valores de correlação inferiores à média das correlações individuais. Esse decréscimo de desempenho decorre da diferença em termos de formato dos sinais brutos (ainda que de magnitude similar) a depender da diferença em posição entre os sensores e da decorrente interferência destrutiva na soma desses sinais. Nesses casos de não redundância, o uso do valor médio em vez do sinal médio é recomendado.



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

CONCLUSÕES

A presente pesquisa buscou investigar o comportamento individual e coletivo de sensores de muito baixo custo em aplicações de monitoramento de vibração de trens para avaliação de conforto e, indiretamente, para caracterização da qualidade da pista.

A hipótese central foi que o **uso coletivo** de sensores de baixo custo superaria as limitações intrínsecas desses instrumentos em termos de confiabilidade e nível de ruído.

Inicialmente, a abordagem coletiva aumenta a confiabilidade, permitindo identificar discrepâncias no comportamento do grupo. Além disso, a combinação de sensores semelhantes sujeitos à mesma vibração reduz o ruído comparado aos sinais individuais.

A tese confirma que os sensores têm uma adesão mínima ao fenômeno monitorado, como a vibração do trem e, em situações específicas, a qualidade da pista.

A abordagem coletiva permite o cálculo de um resultado combinado representativo da coletividade dos sensores. Para o sinal médio, é necessária a correção de sincronização por meio da correlação cruzada com atraso para evitar interferência destrutiva. Em contexto de sinais redundantes, o sinal médio reduz o ruído teórico sem perda de informação e permite o aumento da acurácia. Como consequência, há melhora na correlação com os dados de referência da geometria viária (coletados pelo veículo de inspeção da companhia ferroviária) e no desempenho da vibração enquanto indicador indireto das irregularidades de via. Para sensores não redundantes (isto é, instalados em



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

diferentes posições do trem de forma a gerar diferenças significativas em termos de sinal), as diferenças em posição e as variações de velocidade reduzem a similaridade entre os sinais, por conseguinte, o desempenho do sinal médio. Ao se calcular o sinal médio, as diferenças em forma do sinal geram interferência destrutiva que reduz a acurácia do indicador proposto. Nesse último caso, recomenda-se o uso dos valores médios eficazes ainda que se saiba que este cálculo não tem o potencial de redução de ruídos.

Com o alcance dos objetivos estabelecidos para este artigo, foi definido um conjunto inicial de instrumentos e técnicas para o monitoramento de conforto sob o conceito coletivo, lidando com limitações dos sensores de baixo custo e oferecendo resultados mais precisos e robustos. Pesquisas futuras devem incluir o uso de dados coletados por *smartphones* em situações reais, isto é, com orientação livre e não necessariamente solidários ao corpo do veículo. Como outro problema a ser abordado na continuidade da pesquisa, destaca-se a necessidade de considerar a eventual normalização das acelerações com relação à velocidade para viabilização da caracterização indireta da qualidade do pavimento.

Por fim, como evolução do conceito coletivo aqui testado a partir de múltiplos sensores em um mesmo veículo, deve-se considerar a possibilidade de fusão de sinais coletados em viagens sucessivas por um mesmo trecho. O cálculo do sinal médio mesmo de



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

diferentes viagens teria o potencial de redução dos ruídos do sinal a depender da possibilidade de comparação no domínio do espaço entre os sinais. Isto é, em um contexto em que os erros em posição são minimizados e a velocidade de deslocamento é relativamente próxima entre viagens sucessivas (exemplo: linhas com *Automatic Train Operation*), a fusão entre os sinais brutos mesmo de sinais coletados em viagens diferentes e sucessivas seria possibilitada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAAM, M. **Python3 Gpsd client - a library for polling gpsd in Python3**. Disponível em: <<https://github.com/MartijnBraam/gpsd-py3>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 13803-1 - Railway applications - Track - Track alignment design parameters - Track gauges 1435 mm and wider - Part 1: Plain line**. Brussels, Comité Européen de Normalisation, 2010.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 13848-5 - 2017 - Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 5: Geometric quality levels - Plain line, switches and crossings**. Brussels, Comité Européen de Normalisation, 2017.

(Omitido para revisão cega)

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2631-1 - Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1:**



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

General requirements. Genève, CH, 1997.

INVENSENSE. **MPU-9250 Product Specification Revision 1.1** San Jose, CA InvenSense Inc., 2019.

MATHEWS, J. **Guide to adhesively mounting accelerometers.** ENDEVCO, 2022.

MOLODOVA, M.; LI, Z.; NÚÑEZ, A.; DOLLEVOE, R. Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 1, p. 1980–1990, 2014.

MONGIÒ, O. **Diagnóstico Integrado - Instrumento de melhoramento e desenvolvimento do transporte ferroviário.** Brasília, Brasil. Perotti Internacional Tecnologias Ferroviárias Ltda., 2014.

NETIRAIL-INFRA. **Deliverable D4.6 Low cost smartphone based track and ride quality monitoring technology.** University of Sheffield, USFD, 2017.

NIELSEN, J.; BERGGREN, E. G.; LÖLGEN, T.; MÜLLER, R.; STALLAERT, B.; PESQUEUX, L. **Overview of Methods for Measurement of Track Irregularities for Ground-Borne Vibration - Deliverable D2.5.** Chalmers University of Technology, Trafikverket, DB, SBB, D2S International, Alstom, p. 1–49, 2013.

PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R. Smartphone's Sensing Capabilities for On-Board Railway Track Monitoring: Structural Performance and Geometrical Degradation



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

Assessment. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

PITA, A. L. **Infraestructuras Ferroviarias**. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.

RICHARDS TECH. **RTIMULib2 - a versatile C++ and Python 9-dof, 10-dof and 11-dof IMU library**. Disponível em: <<https://github.com/RTIMULib/RTIMULib2>>. Acesso em: 22 set. 2021.

SALVADOR, P.; NARANJO, V.; INSA, R.; TEIXEIRA, P. Axlebox accelerations: Their acquisition and time-frequency characterisation for railway track monitoring purposes. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 82, n. 518, p. 301–312, 2016.

SERAJ, F.; MERATNIA, N.; HAVINGA, P. J. M. RoVi: Continuous transport infrastructure monitoring framework for preventive maintenance. **2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2017**, p. 217–226, 2017.

STOW, J.; ANDERSSON, E. Field testing and instrumentation of railway vehicles. In: IWNIICKI, S. (Ed.). **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. London, UK: Taylor & Francis Group, 2006.

U-BLOX. **NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Datasheet**. U-blox Holding AG, 2011. Disponível em: <[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf)>.



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

WESTON, P.; ROBERTS, C.; YEO, G.; STEWART, E. Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles. **Vehicle System Dynamics**, v. 53, n. 7, p. 1063–1091, 2015.