

Reestruturação de programa de monitoramento de ruídos para ferrovias: hierarquização e modelagem piloto

Bruno da Silveira Pinheiro^{1*}, Cássio Scarpelli Cabral de Bragança², Frederico Silva Horta², Marco Antônio Vecci³, Isabella Mendes¹, Fábio Morelli Vieira¹

¹MRS Logística S. A., Av. Brasil, 2001 - Centro - CEP: 36.060-010, Juiz de Fora/ MG

²Oppus Acústica Ltda., Rua Francisco Deslandes, 971 / 407 - Anchieta - CEP: 30.310-530, Belo Horizonte/ MG

³Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - CEP: 31.270-901, Belo Horizonte/ MG

e-mail: bruno.pinheiro@mrs.com.br, cassio@opusacustica.com, frederico@opusacustica.com, vecci@dees.ufmg.br, isabella.mendes@mrs.com.br, fabio.morelli@mrs.com.br

RESUMO

Os ruídos emitidos pela operação ferroviária representam um dos principais impactos ambientais desta atividade e são uma fonte de incômodo à população que vive no entorno das ferrovias. Devido a isso torna-se premente realizar o monitoramento deste impacto de maneira eficaz, para que sejam direcionadas adequadas ações de controle e mitigação ambiental. No entanto não havia até há pouco no país um marco normativo que permitia sequer medir os ruídos oriundos do transporte ferroviário. Dado este contexto a MRS Logística está reformulando seu programa de monitoramento de ruídos por meio de um termo de referência (TR) orientado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

A reformulação do programa de monitoramento consiste no desenvolvimento de 4 etapas bem definidas: (1) hierarquização dos segmentos de estudo, (2) a realização de modelagem de ruído para os segmentos de estudo selecionados, (3) proposição de medidas de mitigação e (4) monitoramento e controle. O presente trabalho visa dissertar sobre as etapas (1) e (2) do supracitado termo, uma vez que foram desenvolvidos os estudos técnicos para subsidiar tais partes do TR.

A hierarquização dos segmentos de estudo consistiu na divisão da malha ferroviária da MRS em diversas partes com características similares, para que cada trecho fosse estudado sob suas particularidades, o que resultou em 37 segmentos de interesse. Estes trechos da malha foram classificados de acordo com uma matriz de avaliação multicritério, onde foram atribuídos pesos para determinados atributos, como uso e ocupação do solo, distância média mínima das residências ao eixo da linha férrea e o número de reclamações existentes naquele segmento. Dessa forma determinou-se os segmentos mais críticos no que tange aos impactos causados pela emissão de ruídos da ferrovia.

Após a hierarquização iniciou-se o desenvolvimento da modelagem piloto de um dos segmentos de interesse. Optou-se por realizar a modelagem num dos trechos mais críticos, notoriamente conhecido por possuir muitas reclamações de ruído. Foi necessário então realizar um estudo de identificação das fontes sonoras da operação ferroviária, onde mediu-se as composições em diversas condições operacionais: aclives, declives, trem carregado, trem vazio, dentre outras. Assim pode-se caracterizar a influência de cada uma das situações avaliadas para a emissão de ruídos da operação ferroviária. A modelagem culminou na elaboração do mapa acústico do trecho avaliado com a representação das isolinhas de ruído. Dessa forma criou-se uma fundamentação teórica e prática para desenvolvimento das próximas etapas do programa de monitoramento.

Palavras-Chaves: Meio Ambiente; Licenciamento e impactos ambientais; Ruído ferroviário.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil o modelo regulatório das ferrovias é disciplinado por meio de concessões. Atualmente existem quase 30.000 quilômetros de ferrovias concedidas ao longo das 5 regiões do país [1].

É de se notar que a atividade ferroviária traz consigo alguns impactos, sejam eles positivos (em sua grande maioria) e também impactos negativos, como os ruídos desta operação.

As locomotivas e vagões (material rodante) emitem sons característicos durante a movimentação pelos trilhos ferroviários (via permanente). Estes ruídos podem em maior ou menor medida gerar incômodos à população que habita as áreas ao redor das ferrovias.

Os impactos ambientais em geral devem ser monitorados para que ações de controle e correção possam ser desenvolvidas. Mas, para que isso ocorra há de existir técnicas adequadas para realizar o monitoramento de impacto ambiental.

Até o ano de 2020 inexistia no Brasil uma norma adequada para realizar o monitoramento de sons provenientes da operação ferroviária, o que dificultava a orientação de medidas efetivas para o controle deste impacto ambiental. Somente após a publicação da norma ABNT NBR 16.425 Parte 4, intitulada "*Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes Parte 4: Sistema ferroviário*" [2] passou a se ter um documento técnico de referência para caracterização adequada dos sons provenientes do sistema de transporte ferroviário [3].

Neste contexto a MRS Logística desenvolveu estudos técnicos em atendimento à diretriz do órgão ambiental para a reformulação do programa de monitoramento de ruídos para a ferrovia (termo de referência), no âmbito da Licença de Operação da malha ferroviária, emitida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Estes estudos foram segregados em 4 etapas distintas: (1) hierarquização dos segmentos de estudo, (2) a realização de modelagem de

ruído para os segmentos de estudo selecionados, (3) proposição de medidas de mitigação e (4) monitoramento e controle.

Assim, o presente trabalho visa dissertar sobre as etapas (1) e (2) do supracitado termo, uma vez que foram desenvolvidos os estudos técnicos para subsidiar tais partes da diretriz.

Há de se indicar que tais estudos foram iniciados antes da publicação da supracitada norma. O que não se constituiu num óbice tão logo a norma foi publicada, uma vez que o atendimento à diretriz estava consonante com as práticas esperadas para a monitoração dos ruídos em ferrovias.

2 HIERARQUIZAÇÃO DOS SEGMENTOS DE ESTUDO

2.1 Considerações iniciais

A Etapa 1 – Hierarquização dos Segmentos de Estudo analisou o entorno da malha ferroviária da MRS com aproximadamente 1.700 km de extensão, distribuída entre os Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. A área de estudo foi estabelecida a partir de uma faixa de 500 m de cada lado do eixo ferroviário, totalizando 1.700 km² de abrangência.

2.2 Segmentação da malha

Buscando levar em conta as especificidades de cada trecho da malha ferroviária da MRS 20 segmentos da malha foram divididos com base em dois critérios: i) trechos em áreas urbanas edificadas contínuas e ii) trechos em áreas rurais com significativo adensamento populacional, para o qual optou-se como densidade populacional mínima a média do sudeste do Brasil, que é de 92 habitantes / km² [4]. Desta forma, as áreas da extensão da malha ferroviária que não atenderam um dos dois critérios citados não foram incluídas em nenhum subsegmento.

Além disso, foram consideradas todas as áreas contínuas que atendessem a um dos dois critérios adotados como pertencente a um mesmo subsegmento, independentemente da extensão da malha ferroviária abrangida, o que resultou em subsegmentos de extensão da linha férrea de 2 km a 130 km.

A Figura 1 a seguir apresenta em linhas azuis

a localização dos 37 subsegmentos selecionados.

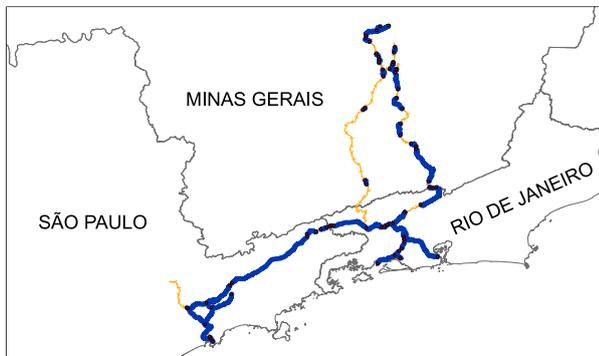


Figura 1 – Subsegmentos selecionados

2.3 Classificação dos subsegmentos

Para cada um dos 37 subsegmentos foi feito um levantamento de informações gerais sobre o subsegmento, sobre o potencial de ruído e reclamações de ruído. O levantamento destas informações visa a posterior hierarquização destes subsegmentos com base no potencial de incomodo à comunidade que cada um pode causar a ser apresentado no item 2.4.

As informações foram levantadas com base em banco de dados geográficos composto por dados da MRS Logística, por dados secundários disponíveis em bancos de dados governamentais gratuitos e por imagens de satélite fornecidas por programas SIG - Sistemas de Informações Geográficas.

2.3.1 Informações sobre o subsegmento

Visando uma melhor compreensão da ocupação no entorno do subsegmento foram feitos levantamentos: i) quanto à presença de hospitais, instituições de ensino, creches, igrejas/templos e áreas de lazer, ii) quanto à distância média entre a mancha urbana edificada e o eixo da linha férrea e iii) quanto ao número de habitantes por extensão da linha férrea.

2.3.2 Potencial de ruído

A caracterização dos segmentos com base em seu potencial de ruído foi feita tomando como base: i) nível de manutenção da linha férrea, ii) declividade do relevo, iii) raio das curvas, iv) ano de fabricação das locomotivas, v) velocidade das composições, vi) presença

de passagens em nível e vii) fluxo médio de composições por dia.

2.3.3 Reclamações de ruído

As reclamações, relacionadas a ruído, registradas no canal de atendimento da MRS foram georreferenciadas e divididas entre os subsegmentos.

2.4 Composição da matriz multicritério

Com as informações indicadas nos itens 2.3.1 a 2.3.3 deste trabalho foi considerada uma matriz para avaliação, conforme Tabela 1, para cada um dos 37 subsegmentos considerados no estudo. O objetivo dessa matriz de avaliação é ponderar os critérios adotados e, por fim, auxiliar na hierarquização por meio de uma nota geral (de zero a 100) atribuída a cada um dos subsegmentos.

Tabela 1. Critérios de avaliação da matriz

Tema	Critério de avaliação
Informações sobre o subsegmento	Presença de hospitais
	Presença de instituições de ensino
	Presença de creches
	Presença de igrejas e/ou templos
	Presença de áreas de lazer
	Distancia média mínima das residências ao eixo da linha férrea [m]
	Estimativa de número de pessoas afetadas por km
Potencial de ruído	Nível de manutenção da linha férrea no segmento
	Declividade do relevo
	Presença de curvas leves ou fechadas
	Tipo de locomotiva (novas ou antigas)
	Velocidade máxima autorizada - VMA [km/h]
	Presença de passagem em nível (com ou sem sonorização fixa)
Reclamação	Fluxo médio de composições ferroviárias [1/dia]
	Número de reclamações de ruído

A matriz multicritério (Tabela 1) estabelece 15 (quinze) critérios de avaliação, separados

entre os temas “informações sobre o subsegmento”, “potencial de ruído” e “reclamações de ruído”. Além disso, a cada critério de avaliação foi atribuída uma nota, de zero a um, e um peso conforme a importância de cada critério. A nota final consiste na soma entre os produtos das notas por seus respectivos pesos. Os pesos de cada critério de avaliação foram distribuídos de forma que cada subsegmento possua nota geral compreendida entre zero e 100.

As informações sobre “distância média mínima das residências ao eixo da linha férrea”, “estimativa do número de pessoas afetadas por quilometro de ferrovia”, “velocidade máxima autorizada (VMA)” e “fluxo médio de composições ferroviárias” foram analisadas de modo quantitativo. A cada um destes critérios foi atribuída a nota máxima ao subsegmento com situação mais desfavorável e aos demais foram atribuídas notas proporcionais em relação ao subsegmento mais crítico naquele aspecto.

As demais informações foram analisadas de modo qualitativo.

2.5 A hierarquização

A hierarquização dos subsegmentos da malha ferroviária da MRS - Logística é dada em função das notas gerais dos subsegmentos nas matrizes de avaliação multicritério (item 2.4). Os subsegmentos foram hierarquizados em ordem decrescente da nota geral.

Desta forma foi possível classificar toda a malha ferroviária da MRS em subsegmentos de maior ou menor relevância para os impactos dos ruídos da operação ferroviária. Um dos segmentos com a maior nota foi o intitulado segmento 7C, no estado do Rio de Janeiro cruzando os municípios de Barra do Pirai, Vassouras e Valença. O traçado do subsegmento 7C é apresentado na Figura 2 a seguir.

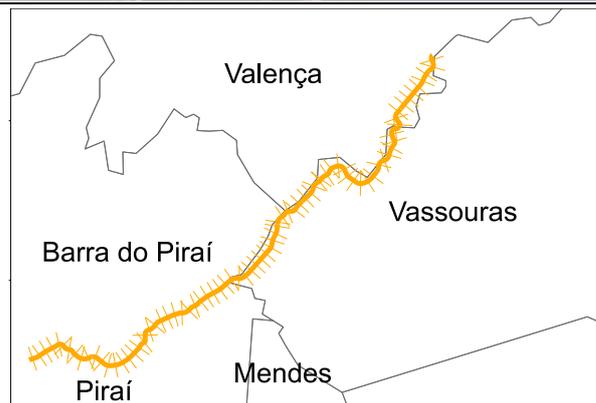


Figura 2 – Subsegmento 7C

Este foi o segmento selecionado como piloto para se realizar uma modelagem computacional de ruídos. A ser apresentada no item 3.

3 MODELAGEM DO SUBSEGMENTO PILOTO

Na Etapa 2 o modelo utilizado na simulação é constituído de uma representação espacial do ambiente onde ocorrerá a propagação do som, juntamente com as propriedades acústicas das fontes de emissão de som nele inseridos.

A representação espacial do ambiente é composta pelas dimensões físicas das edificações existentes, da topografia local, da temperatura, da direção dos ventos predominantes e dos tipos de cobertura do solo, dentre outros itens. Em geral, a representação desses itens no modelo de simulação só depende das propriedades do meio físico. A Figura 3 a seguir ilustra o modelo numérico do ambiente físico desenvolvido para o subsegmento 7C conforme a norma ISO 9613 [5,6].

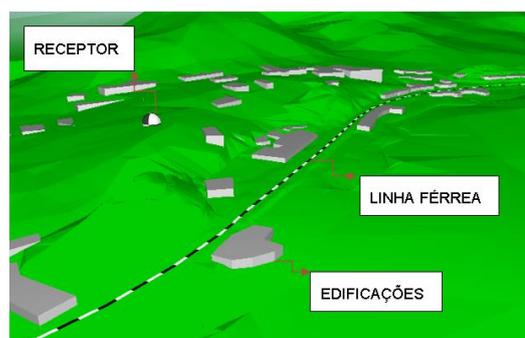


Figura 3 – Modelo do ambiente físico utilizado nas simulações sonoras

No modelo numérico foi considerada uma temperatura de 22 °C e umidade relativa de 76 % com base em dados médios da Normal Climatológica Brasileira para a estação 83738 situada em RESENDE – RJ. Além disso, foi considerada a direção sul como predominante dos ventos com base em dados do INMET ESTAÇÃO 83049 AVELAR (P. DO ALFERES) – RJ [7].

Para o presente trabalho optou-se pelo método estabelecido na norma ISO 9613 [5,6], que pode ser aplicado de forma geral a todas as fontes sonoras. Destaca-se que no método estabelecido na norma ISO 9613 [5,6] existe a possibilidade de serem inseridas as particularidades do sistema ferroviário brasileiro, como as potências sonoras das composições ferroviárias, a serem detalhadas no item 3.1 do presente trabalho.

3.1 Fontes sonoras

As fontes emissoras de som são representadas pelas suas potências sonoras (níveis e espectros sonoros), suas geometrias, dimensões físicas e posicionamentos exatos no modelo computacional. Em geral, as potências das fontes são determinadas por meio de medições sonoras.

3.1.1 Potências sonoras dos trens da MRS

Visando subsidiar a modelagem de ruídos foi realizado um estudo prévio para caracterização das fontes sonoras. Este estudo teve por objetivo o levantamento de informações sonoras das distintas condições da operação ferroviária.

Dada a especificidade de cada uma das ferrovias e da inexistência de trabalhos ou normas acerca dos sons da operação ferroviária no Brasil, foram realizadas pelo menos 5 medições sonoras para cada uma das condições apresentadas na Tabela 2, em pontos selecionados ao longo da malha ferroviária da MRS, entre novembro de 2018 e abril de 2019, totalizando 130 medições.

Tabela 2. Parâmetros operacionais avaliados

Critério de avaliação	Quantificação
Velocidade	Baixa
	Média
	Alta
Aceleração, com diferenciação para os trens vazios e para os carregados	Baixa
	Média
	Alta
Aclive (inclinação), com diferenciação para os trens vazios e para os carregados	Baixo
	Médio
	Alto
Declive	Baixo
	Médio
	Alto
Passagem de nível	Sem sonorização fixa – PN de veículo
	Com sonorização fixa – PN de veículo
	Com sonorização fixa – PN de pedestre
Dormente	Madeira
	Aço
Raio de curva, com diferenciação para os trens vazios e para os carregados	Pequeno
	Médio
	Grande

Tomando como base estas campanhas experimentais foram calculadas as potências sonoras das passagens de composições ferroviárias (L_w/m).

No entanto, como a passagem de composição ferroviária é uma fonte sonora não contínua, intermitente, com duração curta em relação as 24h diárias, optou-se por representar as potências sonoras pelo descritor nível de exposição sonora SEL (*Sound Exposure Level*), uma vez que este descritor representa a energia da fonte sonora, medida em um intervalo de tempo T, no tempo de um segundo. A Figura 4 a seguir ilustra de maneira gráfica o conceito do descritor SEL.

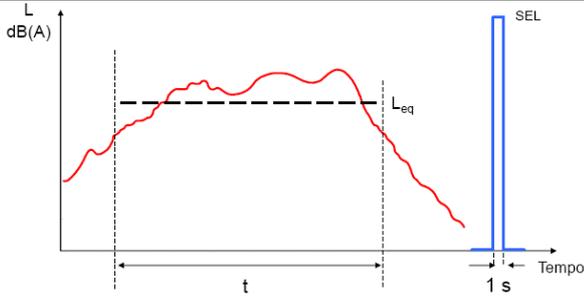


Figura 4 – Representação do SEL para a passagem de uma composição ferroviária. Adaptado de [8].

Como resultado deste trabalho foi construído um banco de dados contendo as potências sonoras das composições tipo da malha ferroviária da MRS em função de parâmetros operacionais das passagens de composições.

3.1.2 Fontes sonoras do subsegmento

Para inserção das potências sonoras no modelo computacional de forma a simular o ruído no subsegmento 7C este foi dividido em 32 trechos tomando como base as características operacionais apresentadas na Tabela 2. A cada um destes trechos foi atribuída a potência sonora calculada correspondente aos mesmos parâmetros operacionais daquele trecho.

3.2 Validação do modelo

A validação do modelo numérico desenvolvido foi realizada por meio da comparação direta entre os valores de SEL simulados com valores medidos em 13 receptores selecionados no entorno da linha férrea, durante o mês de setembro de 2019. Em cada um dos 13 receptores foram realizadas medições de três composições ferroviárias tipo, visando a adequada caracterização do som proveniente da passagem por meio do valor médio entre estas medições.

Os resultados simulados foram comparados aos valores medidos experimentalmente. Assim, pode-se constatar que o modelo computacional representa de maneira bastante fiel a realidade, uma vez que as diferenças entre os valores de SEL medidos e simulados estão inferiores à incerteza combinada de medição e simulação.

4 ANÁLISE DE IMPACTO SONORO

4.1 Critério de avaliação

Devido à ausência de critérios coerentes para a avaliação do incômodo proveniente do ruído oriundo das passagens das composições ferroviárias disponíveis em legislações e normas brasileiras, no presente trabalho adotou-se o critério utilizado nos Estados Unidos da América (EUA), baseado no nível de pressão sonora representativo do dia completo (L_{dn}), para o limite de “impacto severo”, $L_{dn} \leq 65$ dB.

A escolha do descritor L_{dn} como critério baseia-se na existência de estudos amplos correlacionando este descritor com os níveis de incômodo da comunidade. Shultz, T. J [9] realizou uma extensa análise de correlação entre o valor de L_{dn} e o nível de incômodo da população para diversos tipos fontes de poluição sonora do meio urbano, como tráfego, aeronaves e trens.

O descritor sonoro L_{dn} é calculado conforme a norma ABNT NBR 16.425-4:2020 [2], ou pela expressão a seguir:

$$L_{dn} = 10 \log \left(\frac{d \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + n \cdot 10^{\frac{L_n + 10}{10}}}{24 \times 60 \times 60} \right) \quad (1)$$

onde d e n são os números de segundos durante o período diurno e noturno respectivamente e L_d e L_n são dados pelas Equações (2) e (3) a seguir:

$$L_d = 10 \log \left\{ \frac{1}{d} \left[N_d T_m \left(10^{\left(\frac{L_{Aeq,T,PCF}}{10} \right)} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$L_n = 10 \log \left\{ \frac{1}{n} \left[N_n T_m \left(10^{\left(\frac{L_{Aeq,T,PCF}}{10} \right)} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

onde N_d e N_n são os números de passagens de composições durante o período diurno e noturno respectivamente, T_m é o tempo médio de passagem das composições e $L_{Aeq,T,PCF}$ a média dos níveis de pressão sonora continuo equivalentes, ponderada em A, dos sons provenientes de passagens de

composições ferroviárias.

4.2 Simulações computacionais

Por meio do modelo numérico desenvolvido e validado experimentalmente, apresentado no item 3, foram efetuadas simulações do L_{dn} . A Figura 5 a seguir ilustra os resultados de L_{dn} , para o trecho do subsegmento 7C que cruza o centro de Barra do Piraí, em forma de mapa sonoro.

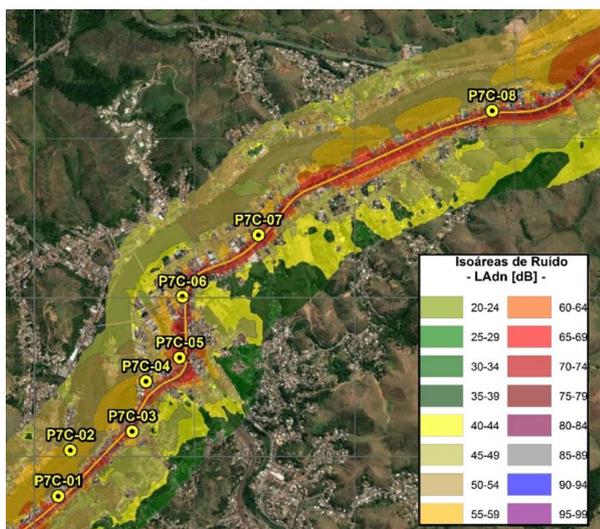


Figura 5 – Resultados das simulações sonoras do Subsegmento 7C: Mapa Acústico do L_{dn}

O mapa sonoro possibilita a realização de estudos para quantificação das áreas e populações mais afetadas pelos ruídos. A Tabela 3 a seguir apresenta de forma proporcional a área, número de reclamações de ruído e estimativa da população que se encontram dentro e fora da área com L_{dn} maior que 65 dB.

Tabela 3. Resultado da avaliação ambiental.

ITEM	$L_{dn} \leq 65 \text{ dB}$	$L_{dn} > 65 \text{ dB}$
Área Subsegmento 7C (500m para cada lado da linha férrea)	(89 %)	(11 %)
Reclamações de Ruído	(44 %)	(56 %)
População Estimada	(89 %)	(11 %)

Pelos resultados da Tabela 3 percebe-se a nítida correlação dos valores de L_{dn} maiores que 65 dB com o incômodo da população, já que a pequena parcela da população (apenas 11%) exposta a valores superiores a 65 dB é responsável por 56 % das reclamações de ruído deste trecho.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas as duas primeiras etapas de um total de 4 etapas da reformulação do programa de monitoramento de ruídos da MRS logística.

A primeira etapa constituiu-se de uma segmentação de toda a malha da MRS e posterior hierarquização dos subsegmentos obtidos. O processo de hierarquização foi feito com base na composição de uma matriz multicritério considerando aspectos relativos à ocupação no entorno do subsegmento, ao potencial de ruído e ao número de reclamações da população.

A segunda etapa constituiu-se da modelagem computacional de um dos subsegmentos críticos. Para dar suporte a essa modelagem, primeiramente, um amplo trabalho de caracterização das fontes sonoras dos trens da MRS foi realizado, medindo passagens de composição em diversas condições operacionais. Feito isso o subsegmento piloto foi partido em diversos trechos e a cada um deles foi atribuída a potência sonora medida, com condições mais semelhantes às daquele trecho.

A validação do modelo foi realizada com base em uma campanha experimental registrando três passagens de composição em 13 receptores. Comparando os resultados simulados com os medidos constatou-se que o modelo representava de maneira fiel a realidade com todos os erros, dentro da incerteza esperada.

Com o modelo validado foram gerados mapas acústicos possibilitando a realização de estudos do nível de impacto que os sons da ferrovia geram em comunidades no seu entorno. Devido à falta de critérios de avaliação coerentes em legislações brasileiras os estudos foram conduzidos com base no critério adotado nos Estados Unidos, com base no descritor sonoro L_{dn} que se mostrou bastante coerente e relacionado com

as reclamações da população.

Para trabalhos futuros sugere-se a continuidade de programas de monitoramento de ruído estruturados desta forma, com a proposição de medidas de monitoramento, controle e mitigação de ruídos para as ferrovias.

6 AGRADECIMENTOS

À MRS Logística e seus colaboradores pelas práticas da empresa que contribuem para a manutenção de sua atividade e a preservação do meio ambiente, e também pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À empresa Oppus Acústica Ltda. que desenvolveu esta metodologia em conjunto com a MRS.

7 REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT. Assuntos Ferrovias. Concessões ferroviárias. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/concessoes-ferroviarias>. Acesso em: 18/07/2021.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16425-4:2020 - Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes Parte 4: Sistema ferroviário. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [3] PINHEIRO, Bruno da Silveira. A nova norma ABNT NBR 16.425-4 e as consequências no ordenamento normativo acerca da monitoração de ruídos da operação ferroviária. Orientador: Vania Maria de Alcântara. TCC Pós-graduação – Direito Ambiental, Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro. 2021
- [4] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Censo Demográfico 2010.
- [5] International Organization for Standardization. ISO 9613-1:1993 - Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Geneva, Suíça. 1993.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 9613-2:1996 - Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation. Geneva, Suíça. 1996.
- [7] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas 1981-2010.
- [8] Brüel & Kjær. Princípios de Acústica. 2015. 155 slides.
- [9] SCHULTZ, Theodore J. Synthesis of social surveys on noise annoyance. Journal of the Acoustical Society of America, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 377–405, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.382013>.