



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Modelagem e predição do ruído de tráfego em corredores de ônibus, por meio de caminhos diretos, especulares e difusos

Estercio, D. C. L.¹; Romanichen, C. M.²; Soares, P. F.³

¹ Arquitetura, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil, esterciodayane@gmail.com

² Engenharia Urbana, Maringá, PR, Brasil, pfsoares@uem.br

³ Engenharia Urbana, Maringá, PR, Brasil, camilaromanichen@hotmail.com

Resumo

Os corredores de ônibus dos sistemas de transporte público são importantes equipamentos urbanos e abrigam inúmeros usuários. Estes estão expostos a níveis intensos de ruído, sendo pouco avaliados em pesquisas. Com o crescimento da poluição sonora em ambiente urbano, métodos preditivos vêm sendo desenvolvidos como ferramenta de avaliação ambiental. Dito isso, o objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de um modelo matemático de previsão de ruído em corredores de ônibus, baseado nos caminhos diretos e reflexões especulares e difusas, no qual busca contribuir para a caracterização do nível de ruído do tráfego de veículos que atinge usuários dos sistemas de transporte público. Para a aplicação do modelo, foi escolhido um trecho na Avenida Morangueira, localizada na cidade de Maringá - PR. O trecho tem 300 metros de comprimento e 100 metros de largura. A avenida é um corredor municipal de ônibus, composto por seis faixas, duas exclusivas para ônibus. No modelo foram simulados dois cenários, um para o usuário em pé e outro para o usuário sentado. A fonte sonora foi posicionada no eixo de cada faixa, no total, foram calculados 2196 das posições da fonte e 10980 caminhos. Para validar o modelo desenvolvido, foram aplicados os modelos de Kurze e Anderson, Kang Yang e Zhang e, posteriormente, o teste t-Student. Os resultados do modelo mostraram correspondência entre o modelo desenvolvido e os dados das medições *in loco* e os modelos de referência. Conclui-se, com base nos resultados, que a similaridade é superior a 95% e que a metodologia proposta pode contribuir para pesquisas futuras no sentido de representação e opção de modelagem e simulação para avaliação de ruído em pontos de ônibus.

Palavras-chave: Modelo preditivo, ruído urbano, sistema de transporte coletivo, modelagem matemática.

PACS: 05.40.Ca; 43.50.+y; 43.58.+z; 44.05.+e;

Abstract

The bus corridors of public transport systems are important urban equipment and are home to numerous users. These are exposed to intense noise levels, being poorly evaluated in research. With the growth of noise pollution in an urban environment, predictive methods have been developed as an environmental assessment tool. That said, the objective of this research is the development of a mathematical model of noise prediction in bus corridors, based on direct paths and specular and diffuse reflections, in which it seeks to contribute to the characterization of the noise level of vehicular traffic that reaches users of public transport systems. For the application of the model, a stretch was chosen on Avenue Morangueira, located in the city of Maringá - PR. The section has 300 meters long and 100 meters wide. The avenue is a municipal bus corridor, which consists of six lanes, two exclusives to the bus. In the model, two scenarios were simulated, one for the standing user and the other for the seated user. The sound source was positioned on the axis of each strip, in total, 2196 of the source positions and 10980 paths were calculated. To validate the developed model, the models by Kurze and Anderson, Kang Yang and Zhang were applied, and, subsequently, the t-Student test. The results of the model showed correspondence between the developed model and the data of the measurements *in loco* and the reference models. It is concluded, based on the results, that the similarity is greater than 95% and that the proposed methodology can contribute to future research in the sense of representation and option of modeling and simulation for the evaluation of noise in bus stops.

Keywords: Predictive model, urban noise, public transport system, mathematical modeling.



1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos níveis sonoros é uma importante ferramenta que permite analisar as informações de uma determinada área e a partir dela é possível avaliar os pontos críticos e elaborar tomadas de decisões para o controle da poluição sonora. As pesquisas podem ser realizadas por meio de aferições *in loco* ou por simulações. As simulações podem ser realizadas por modelos matemáticos ou também por *softwares*.

As duas técnicas permitem prever os níveis sonoros a partir de dados de entrada. Dentre os parâmetros de entrada estão: fluxo de veículos, condicionantes locais e as fontes sonoras. A escolha entre as duas ferramentas depende da finalidade do estudo, orçamento, tempo de execução, entre outros fatores. Estas ferramentas permitem avaliar tanto cenários reais quanto futuros (com ou sem medidas de atenuação do ruído). Estas ferramentas podem auxiliar pesquisas em que não há possibilidade de uso de *software*.

O presente estudo busca avaliar os corredores de ônibus. A partir do desenvolvimento de um modelo matemático de previsão de ruído em corredores de ônibus, baseado nos caminhos diretos e reflexões especulares e difusas.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Para a caracterização dos raios sonoros nos corredores de ônibus, foi adotado o cálculo dos raios sonoros onde avalia o ruído de tráfego veicular a partir do cálculo dos caminhos diretos, especulares e difusos. Na análise, os raios especulares utilizaram-se a método fonte-imagem e para os raios difusos o método de radiosidade.

O objeto da pesquisa são os corredores de ônibus, para isso foi realizado um monitoramento em um trecho no corredor de ônibus da Avenida Morangueira, localizado na cidade de Maringá, interior do estado do Paraná, Brasil, como mostra a Figura 01.

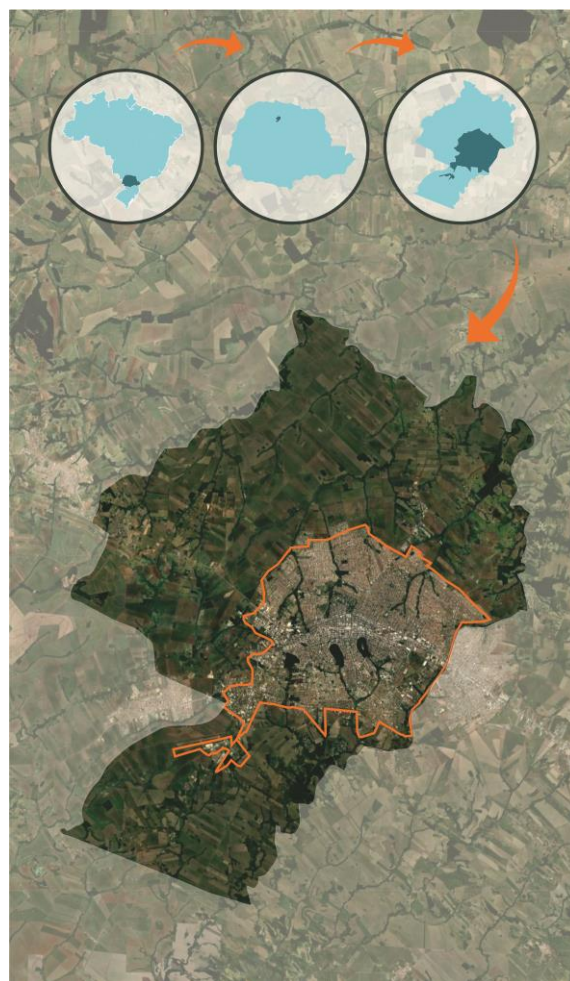


Figura 1: Localização da área de estudo.

O trecho classifica-se de acordo com a Lei Complementar nº 888/2011 [2], que dispõe sobre o uso e ocupação do solo do Município de Maringá e dá outras providências, como Zona de Residencial II, segundo o zoneamento municipal limite diurno é de 55 dB, e noturno de 40 dB.

A avenida apresenta um fluxo de veículos intermediário. Apresenta seis faixas, duas são destinadas exclusivamente para os ônibus do transporte coletivo, como mostra a Figura 2.



Figura 2: Trecho Avenida Morangueira

As medições foram realizadas em cada ponto de ônibus do trecho analisado. Em cada abrigo foi aferida duas leituras, como mostra Figura 3. A primeira na altura do usuário em pé (1,6m) e a segunda na altura do usuário sentado (1,25m). No total foram medidos 8 pontos por dia. O monitoramento foi realizado em três dias, terça-feira, quarta-feira e quinta-feira respectivamente, às 13:00. Cada leitura teve a duração de 5 minutos.

Para ter mais precisam na análise dos níveis sonoros em corredores de ônibus, os resultados aferidos foram comparados com os modelos de Anderson e kurze [3] e Kang, Yang e Zhang [4].

Posteriormente aplicou-se o teste *T-student*, a finde analisar a porcentagem de correlação com os dados aferidos e os modelos matemáticos. O teste avalia o grau de similaridade entre os dados.

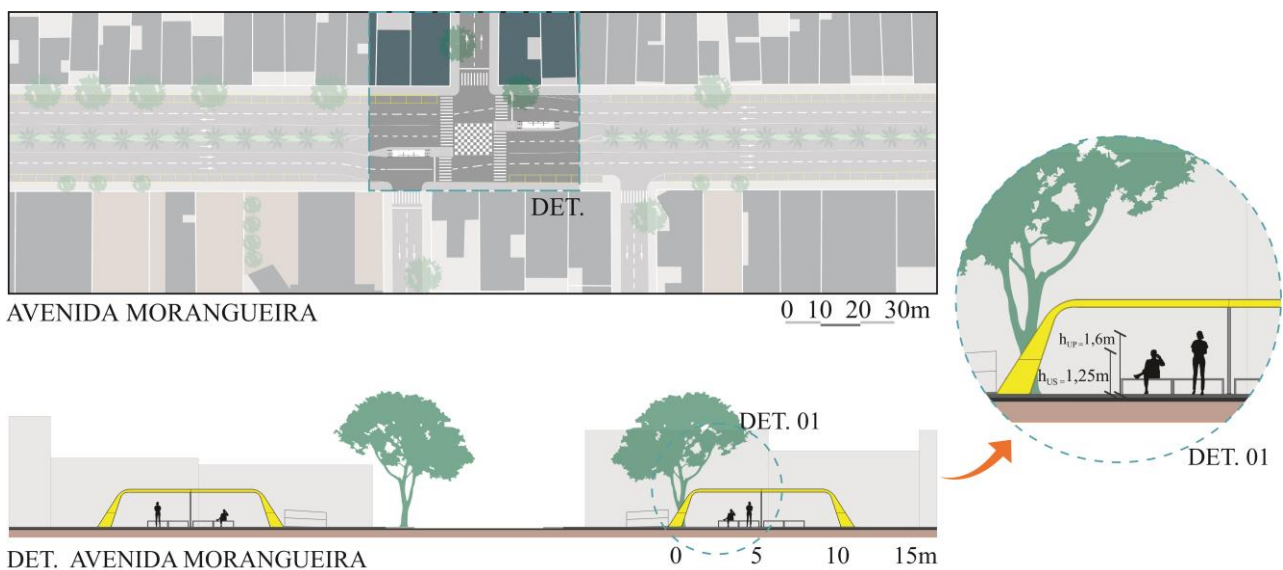


Figura 3: Detalhamento dos Pontos de medição.



Finalizando a pesquisa foi realizado a análise dos dados com os limites estipulados pela legislação vigente.

3.1 Modelos matemáticos

Os modelos de predição variam de acordo com os parâmetros de entrada. Os modelos iniciais incorporavam elementos como volume de tráfego e níveis sonoros. Com o desenvolvimento dos modelos outros parâmetros foram incorporados, como a velocidade média, porcentagem de veículos pesados, potência sonora, configuração das vias e edificações de entorno, entre outros [5-9].

Pesquisas mais complexas avaliam outros fenômenos como a reflexão dos raios sonoros. Estes modelos são calculados por meio de métodos como o de fonte imagem, para as reflexões especulares ou adotam os métodos de radiosidade para a avaliação dos efeitos de difusão e espalhamento [10-14].

O modelo desenvolvido na pesquisa analisa a geometria das ondas sonoras por meio das reflexões especulares e difusas.

O nível sonoro é obtido por meio das somatórias dos raios sonoros. A fração de energia que chega diretamente no receptor é calculado pelo caminho direto (I_d), expresso pela Equação 1.

$$I_d = W_e + 10 \log \left(\frac{\Omega}{4\pi d_T^2} \right) + e \left(\frac{4}{-\psi d_T} \right) \quad (1)$$

Onde W_e é a potência sonora emitidas pelos veículos e calculada com base na Norma ISO 3746:2010 *Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane* [5]; Ω é o fator de direcionalidade; ψ são as perdas devido a absorção do ar, calculadas utilizando a metodologia ISO 9613-1:2014: *Acoustics: Attenuation of Sound during Propagation*

Outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere [16]; d_t é a distância entre a fonte e o receptor.

As ondas sonoras que apresentam reflexões no meio de propagação entre a fonte e o receptor, são calculadas de acordo com o tipo de reflexão. As reflexões especulares, são calculadas nos caminhos especulares (Equação 2) adotando o método de fonte imagem.

$$I_e = W_e + 10 \log \left(\frac{\Omega}{4\pi d_T^2} \right) + e \left(\frac{4}{-\psi d_T} \right) \sum_{\alpha=1}^{10} [(1 - (\alpha_\alpha + \zeta_\alpha))] \quad (2)$$

Neste cálculo são incorporados os parâmetros como coeficientes de absorção (α) e espalhamento (ζ).

As ondas sonoras que apresentam reflexões difusas, são calculadas nos caminhos difusos. Este caminho é calculado com base no método de radiosidade, e é dividido em primeira ordem (Equação 3), quando há apenas uma reflexão no meio de propagação ou de segunda ordem (Equação 4) quando há duas ou mais reflexões.

$$I_1 = W_p + 10 \log \left(\frac{\Omega}{4\pi d_{pr}^2} \right) + e \left(\frac{4}{-\psi d_{pr}} \right) \quad (3)$$

$$I_2 = W_{pi} + 10 \log \left(\frac{\Omega FF_{ji} e^{-\psi d_{ij}}}{4\pi d_{jr}^2} \right) + e \left(\frac{4}{-\psi d_{jr}} \right) \quad (4)$$

Onde W_p é a potência sonora emitida pela superfície onde há a primeira reflexão (Equação 5); FF é o fator de forma. Na equação adotou-se o FF do hemecubo.

$$W_p = W_e + 10 \log \left(\frac{\Omega}{4\pi d_{ep}^2} \right) + e \left(\frac{4}{-\psi d_{ep}} \right) \zeta_p A_p \quad (5)$$

Onde A_p é a área do trecho onde houve a reflexão. Para finalizar é calculado a somatória dos caminhos, obtendo assim a intensidade total (I_t) que chega ao receptor (Equação 6).

$$I_t = I_d + \sum I_e + \sum I_1 + \sum I_2 \quad (6)$$

Para comparação com o modelo foi realizado comparações com outras metodologias. Foram aplicados os métodos de Anderson e Kurze [17] e o modelo de Kang, Yang e Zhang [4].

O modelo de Anderson e Kurze (Equação 7) calcula a propagação sonora ao ar livre.

$$L_p(r, \theta) = L_w - 20 \log r + DI_\theta - 10 \log \frac{\Omega}{4\pi} - A_{combinada} - 11dB \quad (7)$$

Onde Ω é o ângulo sólido disponibilizado para a fonte de livre propagação; DI_θ é a direcionalidade e $A_{combinada}$, correspondem à combinação de todos os mecanismos significativos de atenuação sonora entre a fonte e o receptor.

O modelo de Kang, Yang e Zhang [4] descrito na Equação 8, descreve a distribuição do som emitido por uma fonte sonora em praças.

$$L = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{3H}{W+L} \frac{4}{R} \right) \quad (8)$$

Onde L_w é a potência sonora da fonte; Q é o fator de direcionalidade da fonte; r é a distância fonte-receptor e a variável R , obtida por meio da Equação 9.

$$R = S\alpha_T / (1 - \alpha_T) \quad (9)$$

Onde α_T é o coeficiente de absorção dos materiais e é dado pela Equação 10.

$$\alpha_T = \alpha + 4mV/S \quad (10)$$

3.2 Teste T-student

O *test T* de *Student* é um método de análise estatística que avalia similaridade entre amostras. Dessa forma foi adotado para avaliar a consistência do modelo comparando-o com os dados aferidos *in locu* e demais modelos preditivos adotados. O tamanho de cada amostra avaliada, corresponde ao número de elementos de cada grupo.

Para o cálculo, obtém-se o valor t-crítico, com base no nível de significância e os graus de liberdade. Se o valor de t-crítico for igual ou superior ao calculado t (Equação 4), aceita-se a hipótese H_0 , que significando que não há variância significativa entre as amostras [18].

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{(s_1^2/n_1) + (s_2^2/n_2)}}, \quad (4)$$

Onde $\bar{X}_1$ e $\bar{X}_2$ correspondem as médias de cada amostra, S_1 e S_2 correspondem aos desvios padrão dos respectivos grupos e n_1 e n_2 são os números de amostra de cada amostra.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados calculados apresentaram valores acima do recomendado pela legislação, em ambos os cenários, como mostram os Gráficos 1 e 2.

O valor limite segundo a Norma é de 55 dB para períodos diurnos.

Os níveis calculados variam de 68,9 dB a 75,3 dB para os usuários em pé e para os usuários em pé e 69,5 dB a 79,3 dB para os usuários sentados.

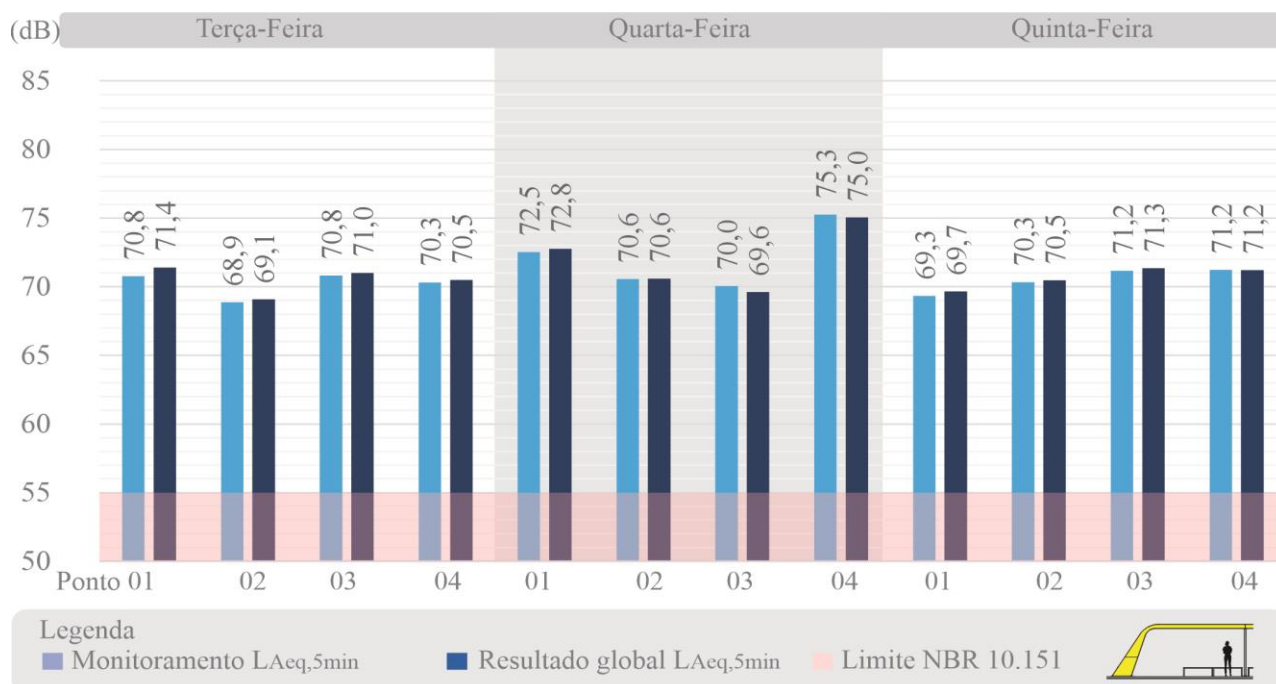


Gráfico 1: Resultado global usuário em pé

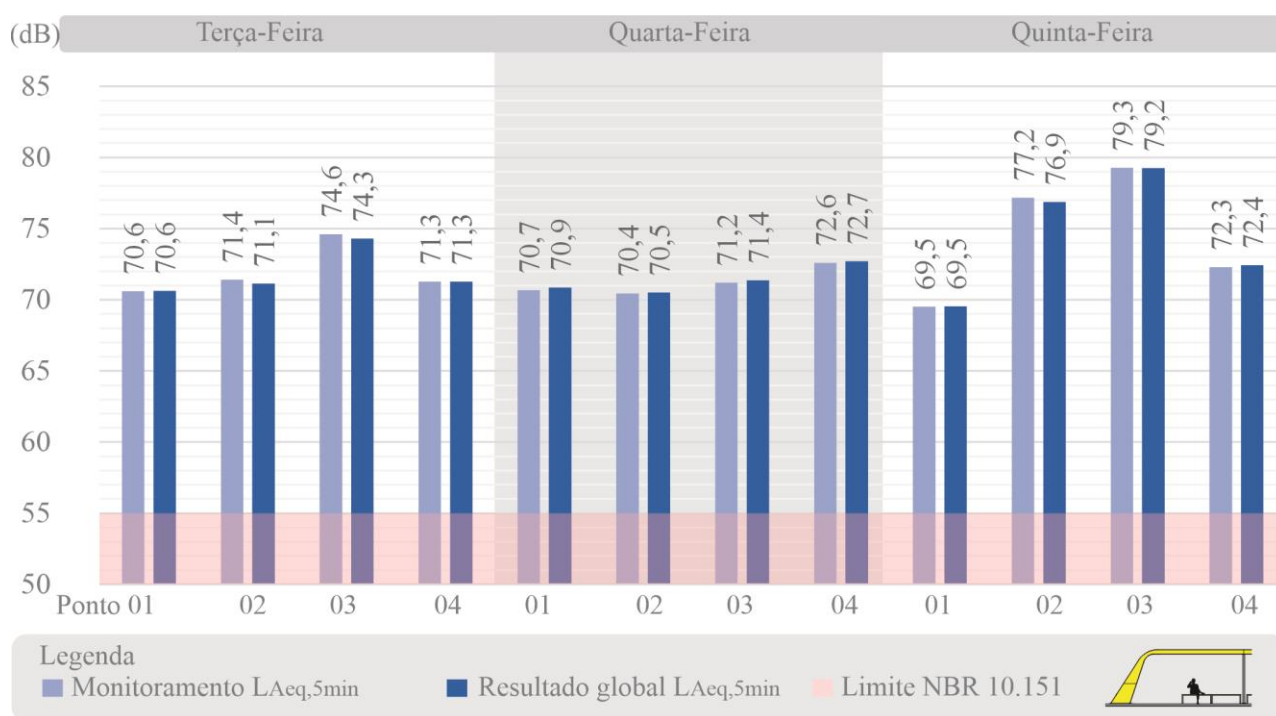


Gráfico 5: Resultado global usuário sentado

Os níveis aferidos in loco por sua vez apresentaram valores entre 69,1 dB a 75 dB e 69,5 dB a 79,2 dB respectivamente. Já entre o modelo e a medição a variação máxima foi de 0,6 dB para usuários em pé e 0,3 dB para os usuários sentados.

O resultado global consiste na somatória dos raios sonoros. No trecho foram calculados 4 raios sonoros, são eles: os caminhos diretos, especulares 1 e 3 e o difuso de segunda ordem, como mostram os Gráficos 3, 4 e 5.

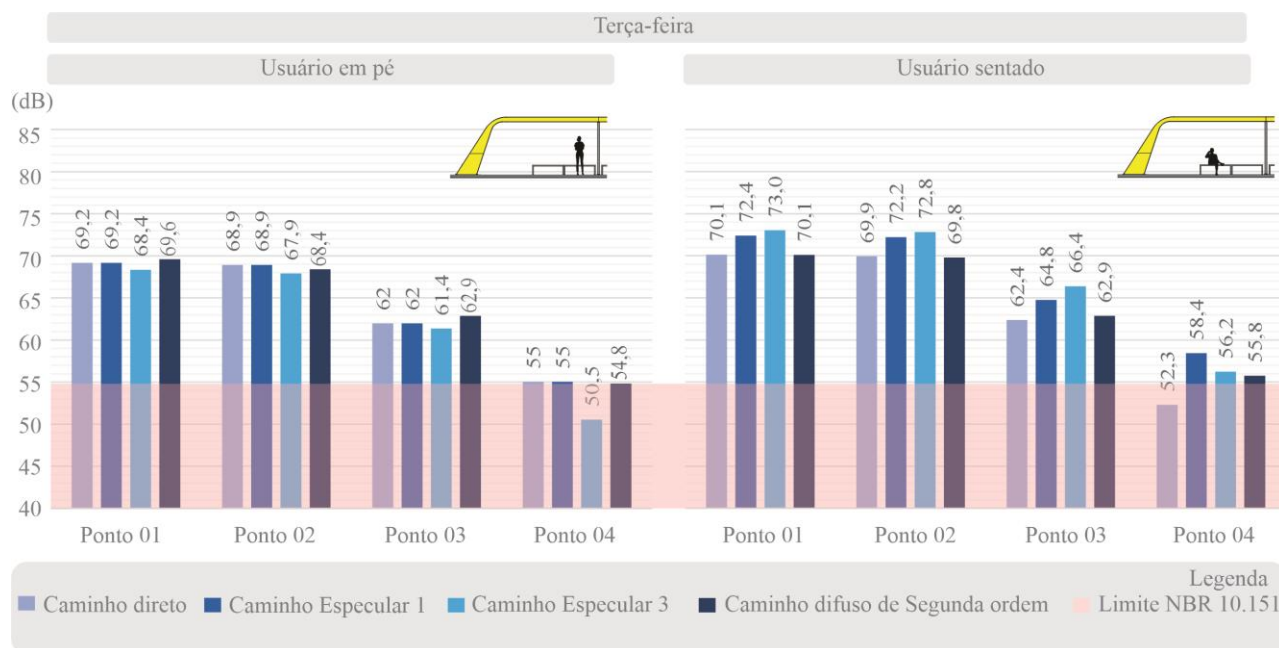


Gráfico 3:Raios sonoros de terça-feira.

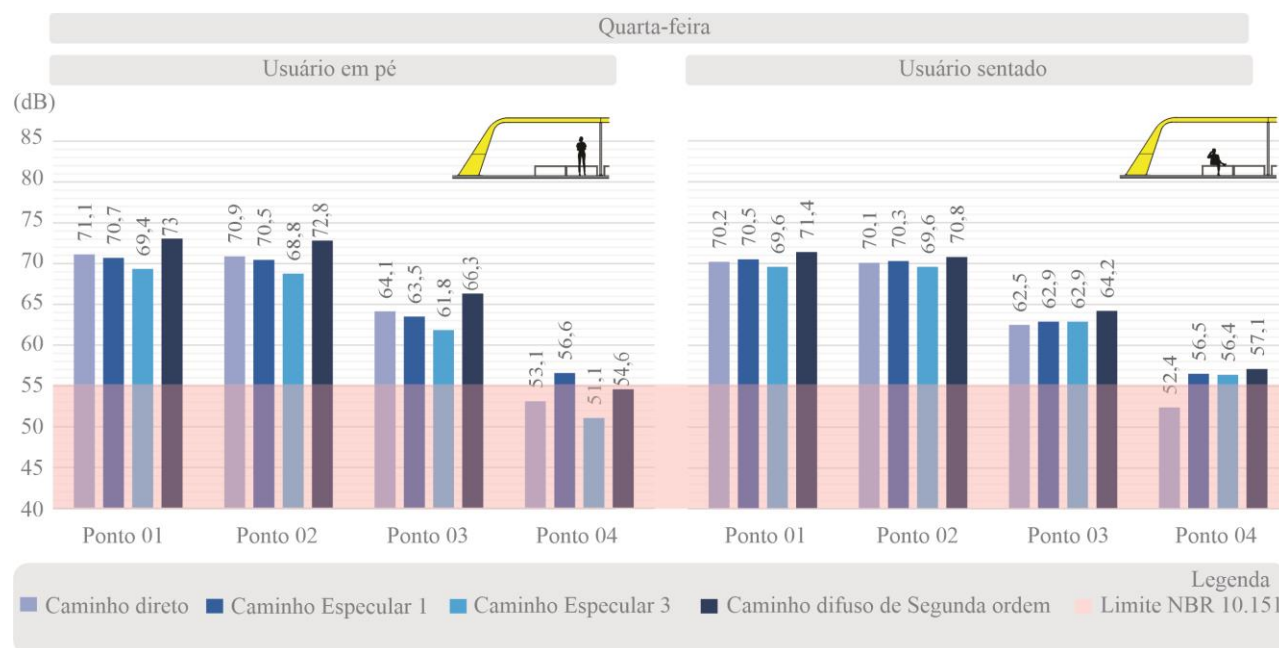


Gráfico 4:Raios sonoros de quarta-feira.

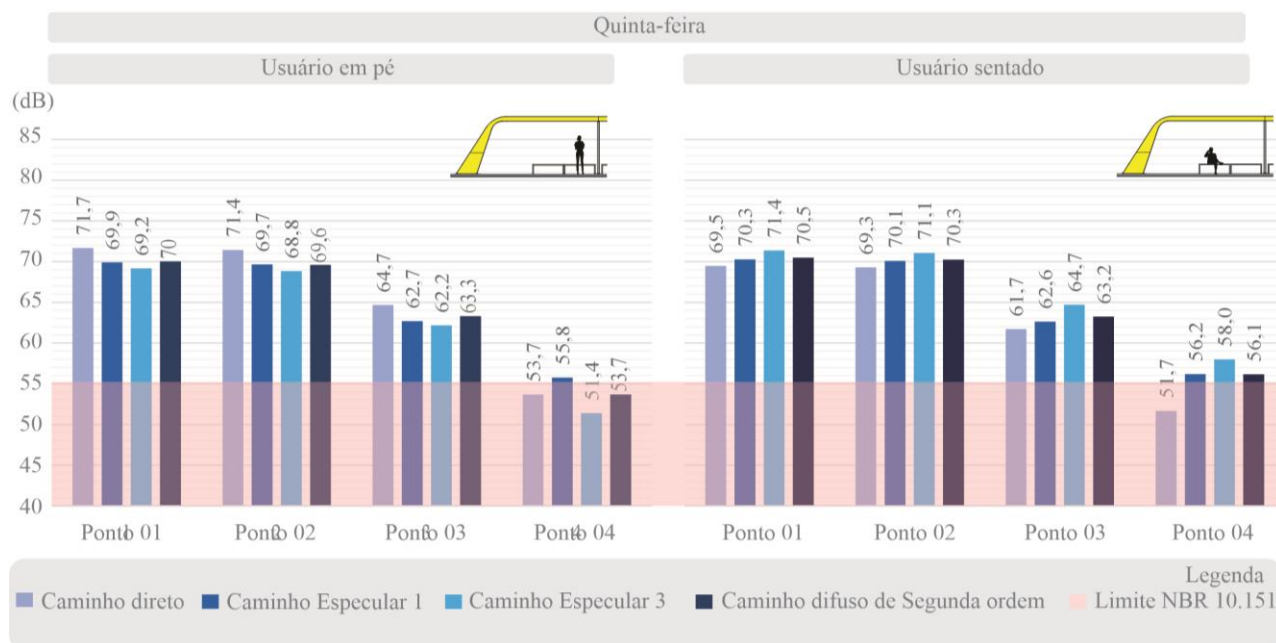


Gráfico 5: Raios sonoros de Quinta-feira.

O caminho especular 2 e difuso 01 não foram calculados devido ao modelo do ponto de ônibus não apresentar superfície posterior para o cálculo da reflexão nesta superfície. Já para o caminho difuso de primeira ordem foi devido a cobertura ser plana. Foram desconsiderados os caminhos que apresentavam no meio de propagação obstáculos (árvores ou postes) e quando o caminho se propagava além dos limites da área de estudo.

A análise dos modelos de referência de Anderson e Kurze [3] e Kang, Yang e Zhang [4] (Gráficos 6, 7 e 8), mostram a diferença dos níveis calculados de cada trecho e dia aferido. O modelo que apresentou maior similaridade com os dados do monitoramento foi o modelo desenvolvido, seguido pelo modelo de Anderson e Kurze [3] e Kang, Yang e Zhang [4].

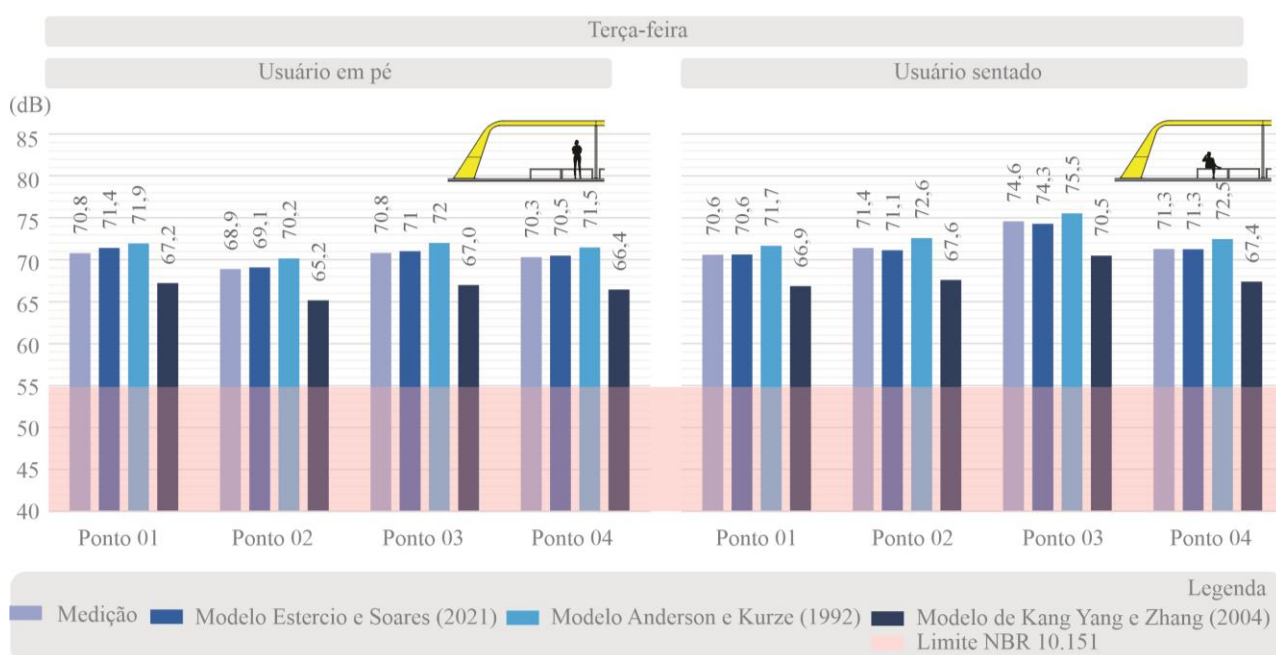


Gráfico 6: Comparação dos modelos preditivos – terça-feira

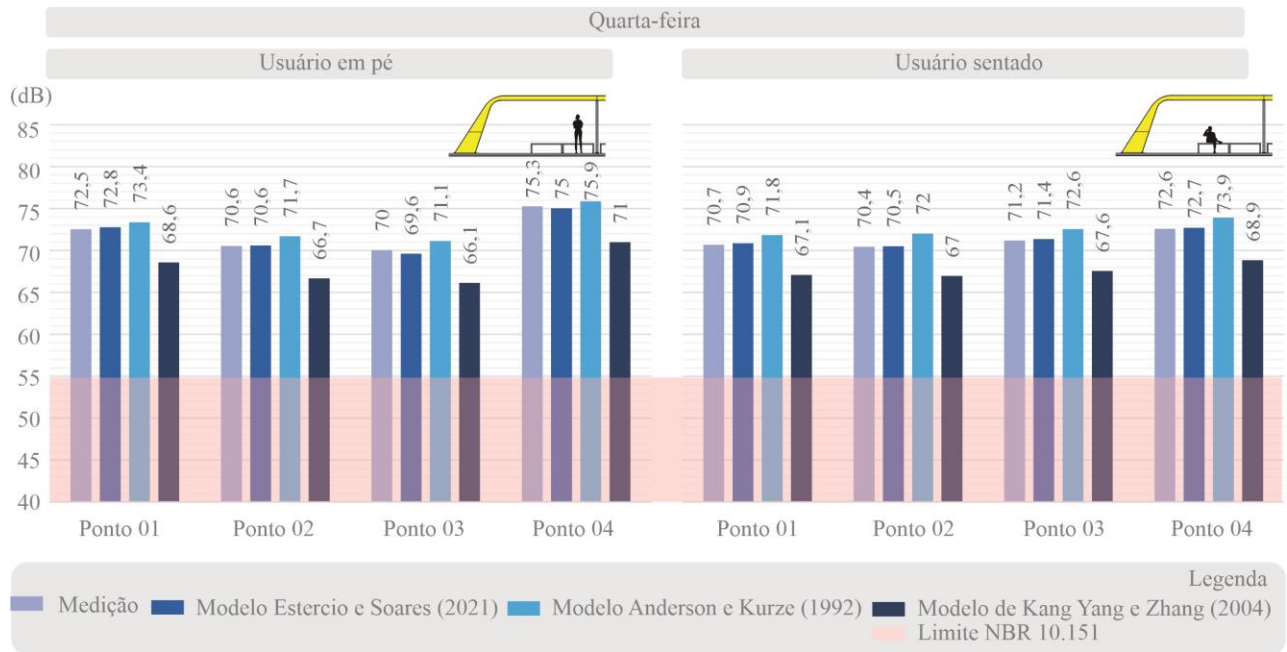


Gráfico 7: Comparação dos modelos preditivos – quarta-feira

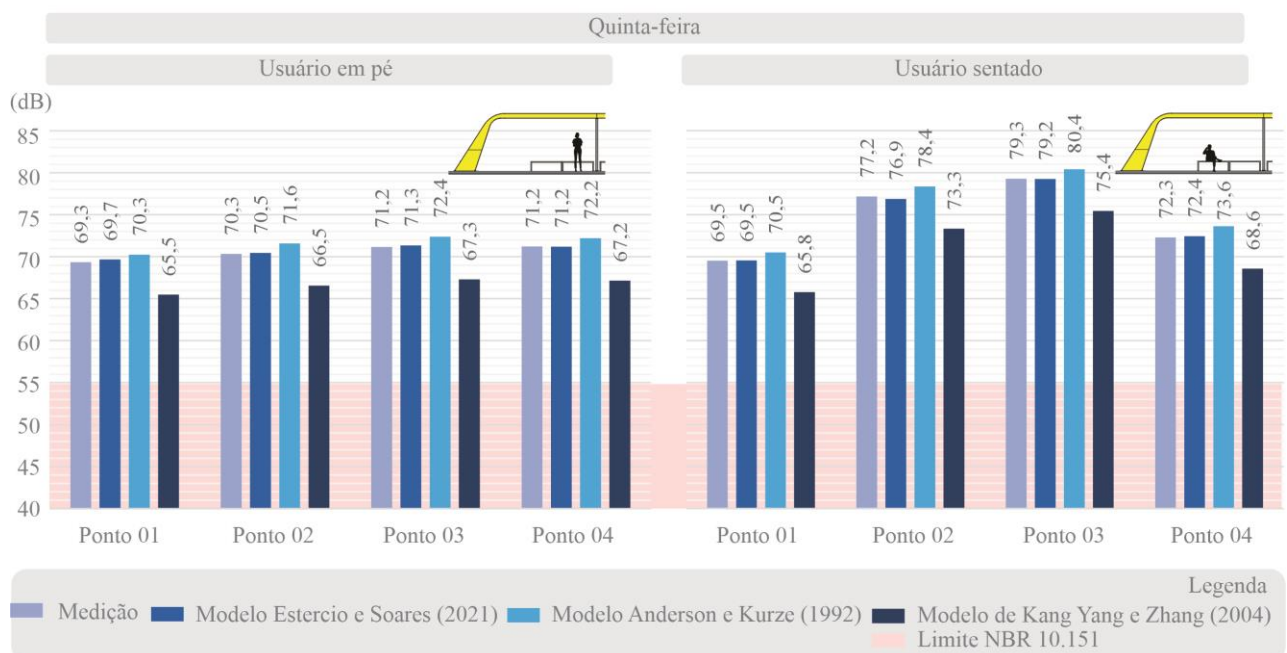


Gráfico 8: Comparação dos modelos preditivos – quinta-feira

Para a correlação entre os modelos foi aplicado o teste *T-student*. De acordo com o teste a similaridade entre os modelos e aos dados aferidos *in loco* foram inferiores ao t-crítico de 2,44691.

O modelo que apresentou maior similaridade com os dados aferidos *in loco* foi o modelo desenvolvido, seguido pelo de Anderson e Kurze e por último o de Kang, Yang e Zhang.



8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados, conclui-se que o modelo desenvolvido teve melhor correspondência com os dados dos trechos analisados. O uso de modelos preditivos, são uma alternativa para avaliar áreas com problemas com o ruído, como a do trecho analisado.

O trecho apresentou níveis superiores aos estipulados pela norma. As pessoas que utilizam diariamente estes espaços estão expostos a níveis intensos de ruído que causam além de desconforto, problemas a saúde. Dessa forma, seria necessário aplicação de medidas mitigatórias.

9. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), durante o mestrado na Universidade Estadual de Maringá-Pr.

REFERÊNCIAS

- [1] Estercio, D. C. L.; Soares, P. F. Acoustic prediction modeling and sound mapping of public transport users' exposure at a bus stop. *Proceedings of INTER-NOISE 2021*, Washington, DC, August (2021).doi: <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2591>.
- [2] Maringá. Prefeitura do Município de Maringá. Lei complementar nº 888/2011.
- [3] Anderson, G. S.; Kurze, U. J. Outdoor sound propagation, in: BERANEK, L. L.; VÉR, I. L. *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. New York: John Wiley and Sons, 1992. 976p.
- [4] Kang, J.; Yang, W.; Zhang, M. Sound Environment and Acoustic Comfort in Urban Spaces. In: *Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces (RUROS)*. 2004. Centre for Renewable Energy Sources, Department of Buildings. 56p. Disponível em: <http://alpha.cres.gr/ruros/>
- [5] Galloway, W. J.; Clark, W. E.; Kerrick, J. S. Highway noise: measurement, simulation and mixed reactions, NCHRP report, v. 78, 1969. Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_78.pdf
- [6] Burgess, M. A., Noise prediction for Urban Traffic Conditions: Related to Measurement in Sydney Metropolitan Area. *Applied Acoustics*, v. 10, n.1, p. 1-7, 1977. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(77\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0003-682X(77)90002-0).
- [7] Fagotti, C.; Poggi, A. Traffic Noise Abatement Strategies. The Analysis of Real Case not Really Effective, In: *International Congress for Noise Abatement*, 18, 1995. Bolobna. Anais.... Bologna, Italy, 1995. p. 223-233.
- [8] Arana, M.; Martínez De Vígala, A.; Aleixandre, A.; San Martín, M. L.; Vela, A. Modelos de predicción del ruido de tráfico rodado. Comparación de diferentes standards europeos. *Tecni Acústica*. Madrid 2000. P. 1-7. Disponível em: http://seaacustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4350ba015.pdf.
- [9] Janczur, R.; Walerian, E.; Czechowicz, M. Influence of vehicle noise emission directivity on sound level distribution in a canyon street. Part I: Simulation program test. *Applied Acoustics*, v. 67, n. 7, p.643–58, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.12.004>
- [10] Schlatter, W. R. Sound Power Measurement in a Semi-Confined Space. 1971. 63f. Thesis (Master of Science) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1971. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/44687/28187230-MIT.pdf;sequence=2>
- [11] Lyon, R. H. Role of Multiple Reflections and Reverberation in Urban Noise Propagation, *J. Acoust. Soc. Am*, v.55, p.493–503, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.1914527>.
- [12] Donovan, P. R. Sound Propagation in Urban Space. 1976. 266f. Thesis (Doctor of Science) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1971. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/27489>.
- [13] Lee, K. P.; Davies, H. G. Nomogram for estimating noise propagation in urban areas, *J. Acoust. Soc. Am*, v. 57, p. 1477–1480. 1975. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.380587>.
- [14] Clayden, A. D.; Culley, R. W. D.; Marsh, P. S. Modelling traffic noise mathematically. *Applied Acoustics*, v. 8, n. 1, p.1-12, 1975. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(75\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0003-682X(75)90002-X).
- [15] International Organization For Standardization ISO 3746:2010 - Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane, Suíça, 2010.
- [16] International Organization For Standardization. ISO 9613-1: Acoustics: Attenuation of Sound during Propagation Outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 9613/1. Suíça, 2014a.
- [17] Wilcox R. R. *Fundamentals of Modern Statistical Methods: Substantially Improving Power and Accuracy*. 2 ed. New York: Springer. 2010. 249 p.