

Impacto da Mobilidade Sustentável na Qualidade Sonora do Campus do IPB: Uma Abordagem de Modelação Acústica

Pedro Henrique Zanini

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de
Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia
Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira.*

Orientado por

Manuel Feliciano

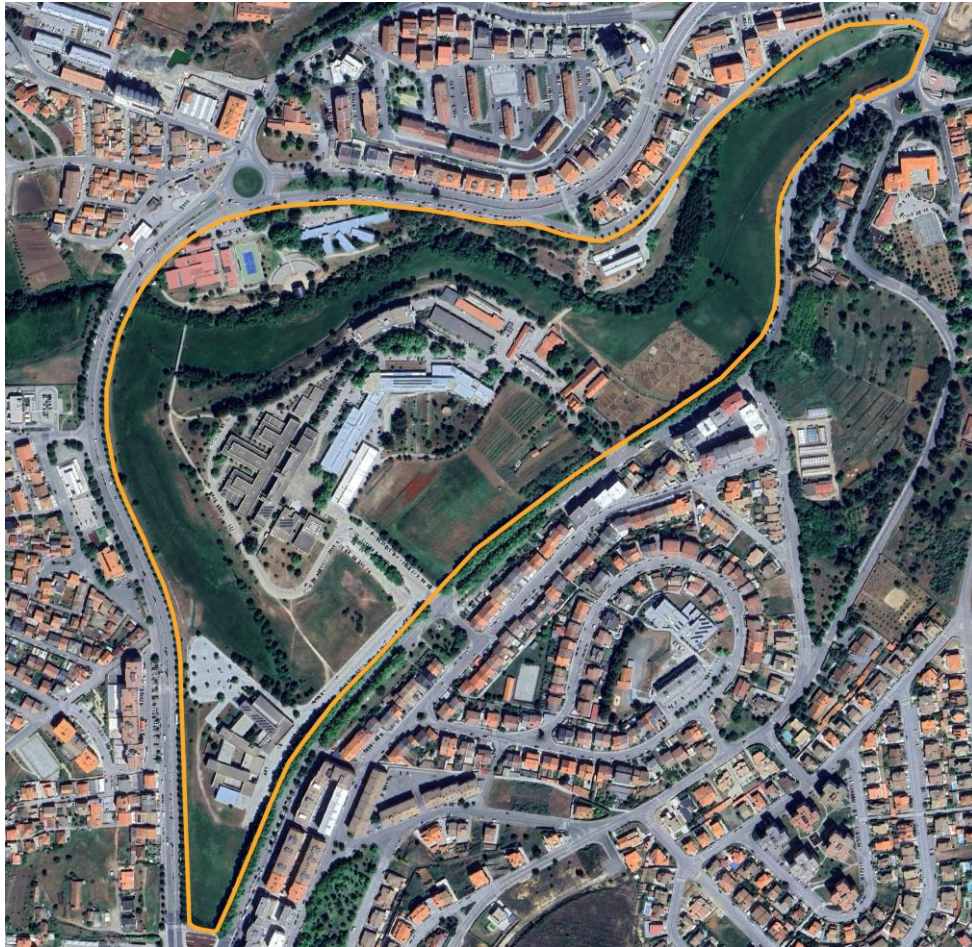
Laercio Mantovani Frare

Bragança

2025

Impacto da Mobilidade Sustentável na Qualidade Sonora do Campus do IPB: Uma Abordagem de Modelação Acústica

Pedro Henrique Zanini



Orientado por

Manuel Feliciano

Laercio Mantovani Frare

Bragança

2025

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta etapa tão importante da minha vida, gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas e instituições que contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço profundamente aos meus orientadores, Prof. Manuel Feliciano e Prof. Laércio Frare, pelo apoio técnico, pelas orientações valiosas e pela disponibilidade constante ao longo de todo o processo. Em especial, agradeço ao Prof. Feliciano, por acreditar em mim desde o início e por me incentivar mesmo nos momentos em que as dificuldades pareciam maiores. Sua confiança foi essencial para que eu não desistisse.

Sou igualmente grato ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), instituições às quais pertencço com orgulho. Ambas me proporcionaram oportunidades de crescimento acadêmico e pessoal, e foram essenciais para minha formação como engenheiro e pesquisador.

Este trabalho não foi fácil. Enfrentei desafios técnicos, pessoais e emocionais ao longo do caminho, mas em nenhum momento estive sozinho. Quero agradecer profundamente à minha família, em especial à minha tia e à minha avó, que sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu mesmo duvidava. Foram a base de tudo, meu porto seguro em todas as fases.

Mudar-me do Brasil para Portugal foi uma decisão corajosa e transformadora. Trouxe comigo sonhos, medos e expectativas, e encontrei aqui um novo lar, que me acolheu com generosidade. Agradeço aos amigos que fiz durante essa jornada, pela companhia, apoio e amizade sincera. Cada conversa, cada risada, cada momento partilhado ajudou-me a manter o foco e a chegar até aqui.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, deixo meu mais sincero agradecimento.

Muito obrigado.

Resumo

A poluição sonora representa um desafio ambiental significativo, com efeitos comprovados sobre a saúde e o bem-estar humanos. As instituições de ensino são particularmente sensíveis a esse tipo de impacto, pois o ruído pode prejudicar o aprendizado e a concentração dos estudantes. No Campus de Santa Apolónia do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), o tráfego de veículos, tanto interno quanto externo, foi identificado como uma das principais fontes de ruído. Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o impacto do plano de reestruturação do campus nos níveis sonoros, utilizando a modelação acústica como ferramenta de análise. A metodologia incluiu a caracterização da área de estudo, medições experimentais com um sonómetro da *Bruel & Kjaer* (modelo 2260), e a construção de um modelo acústico no software *NoiseModelling*, validado com base nos dados medidos e posteriormente aplicado a diferentes cenários. O modelo incorporou dados geográficos, características do tráfego (volume e tipo de veículos), estruturas físicas e o Modelo Digital de Terreno para representar a topografia do campus. Foram simulados vários cenários com o modelo de propagação sonora, previamente validado com base em medições acústicas *in situ* realizadas no cenário de referência (situação atual do campus). Os resultados permitiram quantificar a redução dos níveis de ruído associada a diferentes medidas, como alterações no tráfego rodoviário ou reorganização espacial. As simulações indicaram reduções médias entre 1 e 5 dB(A), sendo os cenários combinados, que integraram restrição do tráfego interno, redução de velocidade, pavimento poroso e diminuição do fluxo externo, os únicos capazes de garantir a conformidade legal nas zonas mais sensíveis. O estudo sustenta recomendações direcionadas à gestão da mobilidade interna e externa ao campus e à implementação de estratégias complementares de controlo de ruído, visando a melhoria do conforto acústico no ambiente universitário.

Palavras-chave: Poluição Sonora, Tráfego, Modelação Acústica, Campus Universitário, *NoiseModelling*, Restrição de Veículos.

Abstract

Noise pollution represents a significant environmental challenge, with proven effects on human health and well-being. Educational institutions are particularly sensitive to this issue, as noise can hinder students' learning and concentration. At the Santa Apolónia Campus of the Polytechnic Institute of Bragança (IPB), vehicular traffic, both internal and external, has been identified as one of the main sources of noise. In this context, the aim of this study was to assess the impact of the campus restructuring plan on environmental noise levels using acoustic modelling as an analytical tool. The methodology included the characterization of the study area, experimental noise measurements using a Bruel & Kjaer sound level meter (model 2260), and the development of an acoustic model with the NoiseModelling software, which was validated using measured data and then applied to different scenarios. The model incorporated geographic data, traffic characteristics (volume and vehicle types), physical structures, and a Digital Terrain Model to represent the campus topography. Several scenarios were simulated using the validated sound propagation model, based on in situ acoustic measurements from the reference scenario (the current situation of the campus). The results allowed the quantification of noise reduction associated with different interventions, such as changes in traffic flow and spatial reorganization. The simulations indicated average reductions between 1 and 5.2 dB(A), with combined scenarios, integrating internal traffic restrictions, speed reduction, porous pavement, and external traffic reduction, being the only ones capable of ensuring legal compliance in the most sensitive areas. The study supports recommendations for managing both internal and external mobility on campus and for implementing complementary noise control strategies to improve the acoustic comfort of the university environment.

Keywords: Noise Pollution, Traffic, Acoustic Modeling, University Campus, NoiseModelling, Vehicle Restriction

ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Relevância do Estudo	3
1.3	Objetivos	4
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2.	AMBIENTE ACÚSTICO EM CAMPI UNIVERSITÁRIOS: BASES TEÓRICAS, DIAGNÓSTICO E INTERVENÇÃO	6
2.1	Conceitos Acústicos Fundamentais	6
2.1.1	O Som e o Ruído	6
2.1.2	Pressão Sonora e Nível de Pressão Sonora.....	7
2.1.3	Ponderação em Frequência.....	8
2.1.4	Indicadores Acústicos.....	9
2.1.3	Propagação do Som no Meio Exterior	10
2.2	Fontes de Ruído em Campi Universitários.....	12
2.2.1	Tráfego Rodoviário e Transporte Público	13
2.2.2	Infraestruturas e Equipamentos Urbanos	14
2.2.3	Atividades Acadêmicas e Recreativas	14
2.3	Avaliação do Ambiente Sonoro	15
2.3.1	Normas e Regulamentos Aplicáveis ao Ambiente Sonoro em Espaços Urbanos e Educativos	16
2.3.2	Métodos de Medição do Ruído	19
2.3.3	Exemplos de Estudos Sobre Avaliação do Ruído em Universidades e Cidades.	21
2.4	Modelação Acústica em Ambientes Universitários.....	22
2.4.1	Métodos de Modelação Acústica e Simulação de Cenários de Tráfego.....	23
2.4.2	Ferramentas e Softwares Utilizados na Análise Acústica	26
2.4.3	Modelo CNOSSOS-EU e Modelagem no NoiseModelling.....	28

2.4.4	Limitações e Desafios da Modelação Acústica Aplicada a Espaços Universitários	29
2.5	Mobilidade Sustentável e Seus Efeitos na Qualidade Sonora	31
2.5.1	Definição de Qualidade Sonora e Sua Importância em Espaços Urbanos e Acadêmicos	31
2.5.2	Conceito de Mobilidade Sustentável e Sua Aplicação em Campi Universitários	32
2.6	Impactos do Ruído Ambiental na Saúde e no Desempenho Cognitivo dos Utilizadores dos Campi	34
2.7	Estratégias de Mitigação do Ruído em Campis Universitários	35
2.7.1	Planeamento Urbano e Gestão da Mobilidade Sustentável	37
2.7.2	Impacto da Redução do Tráfego Automóvel nos Níveis de Ruído	38
2.7.3	Barreiras Acústicas Naturais e Artificiais	39
2.7.4	Sensibilização da Comunidade Académica para Práticas Sustentáveis que Reduzam o Ruído.	42
3.	METODOLOGIA	44
3.1	Caracterização Geral da Área de Estudo	44
3.1.1	Principais Características Urbanísticas, Funcionais e Acústicas	45
3.1.2	Características fisiográficas	47
3.1.3	Identificação das Fontes Sonoras Predominantes	48
3.2	Avaliação Experimental do Ambiente Sonoro	50
3.2.1	Planeamento e Medições	50
3.2.2	Instrumentação e Procedimentos de Medição	54
3.2.3	Tratamento e Análise dos Dados Experimentais	56
3.2.4	Construção e Validação do Modelo	57
3.2.4.1	Construção do Modelo do Campus	58
3.2.4.2	Limitações da Ferramenta	61
3.2.4.2	Validação do Modelo do Campus	61
3.3	Cenários Simulados	63
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64

4.1	Validação do Modelo	64
4.2	Mapas de Ruído Gerados por Cenário	66
4.2.1	Situação Atual (Cenário de Base).....	66
4.2.2	Cenário de Restrição de Trânsito Interno	67
4.2.3	Cenários de Limitação de Velocidade	68
4.2.4	Cenários de Alterações de Pavimento	72
4.2.5	Cenários de Redução do Fluxo de Tráfego	74
4.2.6	Cenários Combinados.....	76
4.3	Comparação de Resultados por Categorias	81
4.4	Resultados por Cenário	83
5.	CONCLUSÕES	89
5.1	Limitações e Impactos nos Resultados.....	91
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	91
	REFERÊNCIAS	93
	ANEXO I	99
	ANEXO II	101
	ANEXO III	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva de ponderação para ponderação A, B, C e D.....	8
Figura 2: Propagação do som no ambiente.....	11
Figura 3: Comparação entre mapas gerados pelo CadnaA (A) e NoiseModelling (B).	26
Figura 4: Correlação entre CadnaA e NoiseModelling para os resultados de Lden.....	27
Figura 5: Localização do Campus Santa Apolónia do IPB.	45
Figura 6: Declividade e hidrografia do terreno do campus	47
Figura 7: Área interna construída do Campus Santa Apolónia do IPB.	48
Figura 8: Fontes de ruído identificadas no campus Santa Apolónia do IPB.	49
Figura 9: Pontos de medição internos e externos no terreno do campus Santa Apolónia do IPB.	51
Figura 10: Pontos de medição no IPB. (A) PI8, (B) PE4, (C) PI11, (D) PE7, (E) PI2, (F) PI1.	53
Figura 11: Sonómetro BK 2260 (A), protetor de vento de 90 mm (B), calibrador BK 4231 (C) .	55
Figura 12: Áreas que serão consideradas para a análise dos indicadores de ruído.	57
Figura 13: Camadas utilizadas na construção do cenário base do IPB.	59
Figura 14: Modelo Digital de Elevação do Câmpus Santa Apolónia do Instituto Politécnico de Bragança do AW3D30 DSM data map.....	60
Figura 15: Camadas utilizadas na construção do cenário de restrição do IPB.	60
Figura 16: Linha de tendência e R^2 para o Lden (A), Linha de tendência e R^2 para o Ld (B), Linha de tendência e R^2 para o Le (C), Linha de tendência e R^2 para o Ln (D).	64
Figura 17: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário base representando os períodos de avaliação.....	67
Figura 18: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da restrição de trânsito interno representando os períodos de avaliação.	68
Figura 19: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do trânsito externo para 40km/h representando os períodos de avaliação.	69
Figura 20: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do trânsito externo para 40km/h com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.	70
Figura 21: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do trânsito externo para 30km/h representando os períodos de avaliação.	71

Figura 22: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do transito externo para 30km/h com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.	72
Figura 23: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário mudança de pavimento nas vias externas para asfalto poroso de duas camadas representando os períodos de avaliação.....	73
Figura 24: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário mudança de pavimento nas vias externas para asfalto poroso de duas camadas com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.....	74
Figura 25: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução do fluxo trânsito externo em 20% representando os períodos de avaliação.	75
Figura 26: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução do fluxo de transito externo em 20% com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.....	76
Figura 27: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 40km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, e com redução do fluxo de transito externo em 20% representando os períodos de avaliação.	77
Figura 28: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 40km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, com redução do fluxo de transito externo em 20% e com restrição de transito interno representando os períodos de avaliação.	78
Figura 29: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 30km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, e com redução do fluxo de transito externo em 20% representando os períodos de avaliação.	79
Figura 30: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 30km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, com redução do fluxo de transito externo em 20% e com restrição de transito interno representando os períodos de avaliação.	80
Figura 31: Comparação dos resultados médios de Lden por categorias para o Campus do IPB. .	81
Figura 32: Comparação dos resultados médios de Ln por categorias para o Campus do IPB.	82
Figura 33: Filtro de calibração de ponderação A por frequência.....	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Principais indicadores acústicos utilizados na avaliação do ruído ambiente e suas fórmulas, quando aplicáveis.	10
Tabela 2: Principais normas aplicáveis na avaliação do ruído em Portugal.	17
Tabela 3: Cenários simulados para o campi Santa Apolónia do IPB.	63
Tabela 4: Raiz quadrada do erro médio dos valores modelados e medidos.	65
Tabela 5: Resultados do Lden por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.	84
Tabela 6: Resultados para o Ln por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.	86
Tabela 7: Coeficientes para veículos leves rápidos (m=1).	99
Tabela 8: Coeficientes para veículos médios pesados (m=2)	99
Tabela 9: Coeficientes para veículos pesados (m=3).	100
Tabela 10: Coeficientes para vínculos de duas rodas de menos de 50 cilindradas (m=4a).	100
Tabela 11: Coeficientes para vínculos de duas rodas de mais de 50 cilindradas (m=4b).	100
Tabela 12: Resultados do Período Ld por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.	102
Tabela 13: Resultados do Período do Le por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.	103

ÍNDICE DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

3D – Três Dimensões

CIMO – Centro de Investigação de Montanha

CNOSSOS-EU – Método Europeu de Avaliação de Ruído (*Common Noise Assessment Methods in Europe*)

dB – Decibel

dB(A) – Decibel ponderado A

DL – Decreto-Lei

EC – Comissão Europeia (*European Commission*)

ESA – Escola Superior Agrária

ESSE – Escola Superior de Educação

ESTiG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão

EU – União Europeia

FHWA – Administração Rodoviária Federal dos EUA (*Federal Highway Administration*)

GIS – *Geographic Information System* (Sistema de Informação Geográfica)

HVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*)

ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

IPB – Instituto Politécnico de Bragança

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISO – Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization*)

JRC – Centro Comum de Investigação (*Joint Research Centre*)

$L_{Aeq,T}$ – Nível sonoro contínuo equivalente durante um período T

$L_{Aeq,T}$ – Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A, durante um período T

Lar,T – Nível de avaliação, durante um período TLden – Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (*Day-Evening-Night Level*)

Ld – Nível sonoro médio no período diurno

Le – Nível sonoro médio no período entardecer

L_n – Nível sonoro médio no período noturno– Indicador de ruído noturno

LOD – Nível de detalhe (*Level of Detail*)

Lp – Nível de pressão sonora

MATSim – Simulação de Transporte Multi-Agente (*Multi-Agent Transport Simulation*)

MDE – Modelo Digital de Elevação

NEC – Custo de exposição ao ruído (*Noise Exposure Cost*)

OMS – Organização Mundial da Saúde

PMOT – Plano de Mobilidade e Ordenamento do Território

PMRA – Plano Municipal de Redução do Ambiente Sonoro

QGIS – *Quantum Geographic Information System*

RGR – Regulamento Geral do Ruído

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SPL – Nível de pressão sonora (*Sound Pressure Level*)

TNT – Ferramenta de Ruído de Tráfego (*Traffic Noise Tool*)

TNM – Modelo de Ruído de Tráfego (*Traffic Noise Model*)

UAV – Veículo Aéreo Não Tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle*)

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

WHO – Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization*)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A poluição sonora constitui um problema ambiental crescente em muitas áreas urbanas, onde a elevada concentração de fontes sonoras de origem antrópica, aliada à elevada densidade populacional, torna estas zonas particularmente vulneráveis. Este fenómeno pode ter impactos significativos na saúde humana, afetando o bem-estar e reduzindo a produtividade dos indivíduos (Can et al., 2020; de Sousa Faria, 2015). Neste contexto, a preocupação com os efeitos do ruído ambiental tem vindo a aumentar a nível global, impulsionada, em grande parte, pelo crescimento populacional nos centros urbanos e pelas evidências crescentes da sua influência negativa na saúde pública.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) tem publicado diversos relatórios internacionais que evidenciam a associação entre a exposição prolongada ao ruído e o desenvolvimento de várias patologias. Entre os efeitos adversos documentados incluem-se doenças cardiovasculares, distúrbios do sono, perda auditiva, hipertensão arterial e aumento da irritabilidade, refletindo o carácter multifatorial e insidioso desta forma de poluição (Barboza de Souza et al., 2019; Luís et al., 2014). Estes dados reforçam a necessidade de adotar estratégias eficazes de monitorização, avaliação e mitigação do ruído ambiental, sobretudo em contextos urbanos e em espaços sensíveis como os campi universitários.

O tráfego rodoviário constitui uma das principais fontes de poluição sonora em meio urbano, afetando um vasto número de pessoas devido à sua natureza difusa e à capilaridade da malha viária, que expõe simultaneamente diferentes regiões a múltiplas fontes de ruído. Perante este cenário, torna-se cada vez mais prioritário o desenvolvimento e a aplicação de metodologias eficazes para avaliar a exposição sonora e propor medidas de mitigação. Esta necessidade é partilhada por investigadores, decisores políticos e pela sociedade em geral, refletindo uma preocupação transversal com a saúde pública e o bem-estar coletivo. A capacidade de prever os impactos de intervenções preventivas ou corretivas, recorrendo a modelos de simulação e ao mapeamento acústico, revela-se fundamental para a formulação de estratégias que minimizem os efeitos do ruído ambiental e promovam ambientes urbanos mais saudáveis e sustentáveis (Aumond, Bocher, et al., 2021; Baclet et al., 2021, 2022, 2023a; Espadaler-Clapés et al., 2023a; Le Bescond et al., 2021a; Meller et al., 2023; Montenegro et al., 2024; Nygren et al., 2024; Ranpise & Tandel, 2022; Tang et al., 2022).

Em instituições de ensino superior, como universidades e institutos politécnicos, o ambiente acústico assume um papel crucial no suporte às atividades de ensino e aprendizagem. Nestes contextos, níveis reduzidos de ruído são essenciais para garantir a concentração, a comunicação eficaz e o rendimento académico. O excesso de ruído pode comprometer significativamente o desempenho dos estudantes, interferindo nos processos cognitivos e provocando efeitos como distração, irritabilidade e dificuldades de atenção. Diversos estudos têm evidenciado que ambientes ruidosos em espaços educativos não apenas afetam negativamente a assimilação de conteúdos, mas também contribuem para o aumento do stress e da fadiga mental, comprometendo o bem-estar global dos utilizadores destes espaços (Barboza de Souza et al., 2019; Servilha & Delatti, 2014; Zannin et al., 2013).

As implicações da poluição sonora em ambientes de ensino tornam-se particularmente evidentes em situações práticas, como a dificuldade em conduzir aulas próximas a vias de tráfego intenso ou em edifícios com fraco isolamento acústico. Em campus universitários, o ruído pode ter origem tanto em fontes internas como em fontes externas ao campus, propagando-se para salas de aula, bibliotecas e outros espaços educativos. Estes fatores comprometem não apenas o desempenho académico, mas também a qualidade de vida de estudantes, docentes e demais membros da comunidade académica (Barboza de Souza et al., 2019; de Sousa Faria, 2015).

Neste contexto, a modelação acústica surge como uma ferramenta essencial para o planeamento e a gestão do ambiente sonoro em espaços urbanos e institucionais. Através da utilização de softwares especializados, é possível simular a propagação do som em diferentes cenários, identificar zonas críticas de exposição e testar virtualmente a eficácia de medidas de mitigação. Entre estas estratégias destacam-se a implementação de barreiras acústicas, a modificação de pavimentos rodoviários, a redução da velocidade de circulação e a restrição do tráfego automóvel em determinadas áreas. Estas abordagens, fundamentadas em evidência técnica, permitem não só intervir de forma mais eficaz, como também apoiar a tomada de decisões por parte das entidades responsáveis pelo ordenamento urbano e pela gestão dos espaços académicos.

Deste modo, compreender a dinâmica do ruído em campus universitários e desenvolver soluções adaptadas às suas especificidades é essencial para a construção de ambientes de ensino mais saudáveis, inclusivos e sustentáveis, em linha com os objetivos das cidades inteligentes e dos compromissos globais com a saúde pública e a qualidade de vida (Can et al., 2020; de Sousa Faria, 2015; Meller & Magalhães De Lourenço, 2022).

1.2 Relevância do Estudo

O Instituto Politécnico de Bragança (IPB) encontra-se atualmente a desenvolver o Plano de Ordenamento do Campus de Santa Apolónia, um instrumento estratégico que visa orientar o desenvolvimento físico, funcional e ambiental do campus, assegurando a sua sustentabilidade, funcionalidade e integração harmoniosa com a cidade e com a comunidade académica. Este plano assenta em seis grandes eixos estratégicos:

- Organização e Qualificação do Espaço Físico – Definição de zonas específicas para ensino, investigação, serviços de apoio, habitação estudantil, desporto e lazer; melhoria da articulação entre edifícios e espaços exteriores; valorização dos espaços públicos e verdes para usufruto da comunidade académica e local.
- Melhoria da Mobilidade e Acessibilidade – Requalificação dos acessos viários e pedonais intra e extramuros do campus; incentivo à mobilidade sustentável (como o uso da bicicleta e percursos pedonais); garantia de acessibilidade universal a todos os edifícios e espaços.
- Sustentabilidade e Eficiência Energética – Aplicação de princípios de sustentabilidade ambiental com enfoque na gestão eficiente de recursos (água, energia e resíduos); promoção de soluções construtivas sustentáveis em novas edificações e reabilitações; criação de uma paisagem ecológica, resiliente e sombreada.
- Suporte à Missão Académica – Criação de infraestruturas adequadas ao ensino, investigação e inovação; previsão de espaços para incubadoras, centros de investigação e coworking; reforço da ligação com a comunidade e o tecido económico regional.
- Integração Urbana – Melhoria da articulação física e funcional entre o campus e o tecido urbano envolvente; incentivo à abertura do campus à cidade através de eventos, serviços partilhados e acessíveis à população; prevenção da criação de barreiras físicas ou sociais com o território circundante.
- Qualidade de Vida e Bem-Estar – Valorização de espaços de convívio, lazer e cultura; promoção da segurança, conforto e identidade dos espaços; criação de condições atrativas para a fixação de estudantes, docentes e investigadores.

No âmbito deste plano, o presente estudo surge com o intuito de contribuir para a qualificação ambiental e funcional do Campus de Santa Apolónia, com especial enfoque na gestão do ambiente sonoro. A modelação acústica é aqui utilizada como ferramenta de suporte à decisão, permitindo avaliar o impacto potencial da implementação de medidas de mobilidade sustentável nos níveis de ruído do campus. A simulação de diferentes cenários permite prever a eficácia de

medidas como a restrição do tráfego, a redução da velocidade ou a alteração dos pavimentos, oferecendo uma base técnica para intervenções que visem melhorar a qualidade sonora e o bem-estar da comunidade académica (Can et al., 2020; de Sousa Faria, 2015; Meller & Magalhães De Lourenço, 2022).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto da implementação de medidas de mobilidade sustentável na qualidade sonora do campus do Instituto Politécnico de Bragança, através da modelação acústica, com vista a compreender as alterações nos níveis de ruído e os potenciais benefícios para a comunidade académica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o ambiente sonoro atual do campus do IPB, através da medição e análise dos níveis de ruído antes e depois da implementação das medidas propostas.
- Desenvolver um modelo acústico representativo do campus, permitindo simular diferentes cenários de mobilidade e avaliar os respetivos impactos na qualidade sonora.
- Analisar a influência da restrição do tráfego automóvel nos níveis de ruído e identificar as principais fontes sonoras que afetam o campus.
- Validar o modelo acústico através da comparação entre os resultados da simulação e os dados medidos, de modo a aferir a sua precisão e interpretar as variações na qualidade sonora.
- Propor recomendações para a melhoria da qualidade sonora no campus, com base nos resultados obtidos e nas melhores práticas de mobilidade sustentável, incluindo a adoção de medidas adicionais de outra natureza.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação estrutura-se em cinco capítulos, que contribuem de forma sequencial para a compreensão do impacto da mobilidade sustentável na qualidade sonora do ambiente de estudo, nomeadamente o Campus de Santa Apolónia do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

O primeiro capítulo fornece o enquadramento geral do estudo. Nele apresenta-se a contextualização da problemática que envolve a poluição sonora, dando o enfoque aos efeitos nos ambientes académicos, além da relevância e justificativa no contexto do campus do IPB. São apresentados também os objetivos, geral e específicos, que norteiam o presente trabalho.

O segundo capítulo é constituído pelo referencial teórico que fundamentam as análises realizadas. Neste segmento são abordados os conceitos que definem a qualidade sonora, a importância destes nos espaços urbanos e os parâmetros acústicos que são relevantes para a sua avaliação. Também serão avaliadas as fontes de ruído em campus universitários, dando enfoque especial para a influência da mobilidade, métodos de medição para a avaliação do ruído ambiental e seus indicadores acústicos, além da relação entre a mobilidade sustentável e a qualidade sonora. Por fim, também será discutida a modelação acústica e as suas estratégias de mitigação de ruído que podem ser aplicadas a diferentes contextos.

No terceiro capítulo aborda-se a metodologia do estudo, em que se descreve os passos para a realização dos objetivos da dissertação. Apresenta-se a caracterização da área de estudo, com descrição das características urbanísticas e acústicas, as fontes sonoras e o contexto dos cenários que serão avaliados. Estão descritos os procedimentos da avaliação experimental do ambiente sonoro, como o planeamento das campanhas de medição, a instrumentação que foi utilizada, os procedimentos de medição e o tratamento e análise dos dados. Será abordado a metodologia empregada na modelação acústica, que abrange a construção, calibração e validação do modelo do campus utilizando o software *NoiseModelling*.

O quarto capítulo é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos ao longo da investigação. Nele são detalhados os outputs da modelação acústica desenvolvida e sua validação para os diferentes cenários considerados, incluindo os respetivos mapas de ruído simulados. A quantificação da redução dos níveis sonoros associada a cada cenário proposto constitui o eixo central deste capítulo. Adicionalmente, procede-se à identificação das principais fontes de ruído que afetam o campus, com base na análise dos dados gerados nos diversos cenários simulados.

O quinto capítulo é reservado às conclusões, centrando-se na interpretação crítica dos resultados apresentados no capítulo anterior, à luz do referencial teórico abordado no segundo capítulo. Serão identificados os principais contributos do estudo, com vista à compreensão do impacto da mobilidade sustentável na qualidade sonora dos ambientes académicos. Serão ainda discutidas as implicações dos resultados para a gestão do espaço universitário e para a formulação de políticas de mobilidade sustentável. Por fim, serão refletidas as limitações da investigação e apresentadas sugestões para estudos futuros, com o objetivo de aprofundar o conhecimento nesta área temática.

2. AMBIENTE ACÚSTICO EM CAMPI UNIVERSITÁRIOS: BASES TEÓRICAS, DIAGNÓSTICO E INTERVENÇÃO

A qualidade sonora em campus universitários constitui uma temática multidimensional, envolvendo diversas problemáticas associadas à exposição ao ruído e aos seus impactos na saúde, bem-estar e desempenho académico. Este capítulo tem como objetivo oferecer uma análise aprofundada desta realidade, enquadrando teoricamente os principais conceitos ligados ao ambiente acústico e aos parâmetros relevantes para a sua avaliação.

Ao longo do capítulo, serão discutidas as principais fontes de ruído presentes em contextos universitários e as suas tipologias, com vista a compreender o papel de cada uma na deterioração do ambiente acústico. Serão ainda abordados os métodos de medição e os indicadores acústicos utilizados na caracterização do ruído, incluindo os referenciais normativos e regulamentares aplicáveis em Portugal.

A modelação acústica será apresentada como uma ferramenta central no diagnóstico e planeamento de soluções, permitindo simular a propagação sonora e prever o impacto de diferentes intervenções. Serão descritos os principais métodos de modelação, os softwares disponíveis e as suas limitações. Por fim, serão exploradas estratégias de mitigação que podem ser implementadas em campus universitários, culminando na definição de cenários de modelação que suportem decisões mais informadas e eficazes no planeamento acústico dos espaços académicos.

2.1 Conceitos Acústicos Fundamentais

A caracterização do som, e, por consequência, do ruído, envolve diversos parâmetros, como a frequência, medida em Hertz (Hz), que indica a quantidade de ciclos de vibração por segundo, sendo diretamente ligada a percepção da altura do som. Outro parâmetro é a intensidade, expressa em decibel (dB), e quantifica a quantidade de energia transportada por uma onda sonora, sendo associada a percepção do volume ou da intensidade do som. O espectro sonoro descreve a distribuição da energia do som nas diferentes frequências, sendo relacionada com as componentes tonais do som e influenciando a qualidade e a forma com é percebido (Foreman, 1991).

2.1.1 O Som e o Ruído

O som pode ser definido como as flutuações da pressão ambiente num meio que apresenta elasticidade e viscosidade, e estes meios podem ser sólidos, líquidos ou gasosos (Driscoll et al., 2009). Já o ruído é o fenómeno acústico indesejado, ou seja, um som que causa incomodidade,

perturbações ou efeitos adversos no bem-estar ou na saúde das populações e que interfere na audição de sons desejados (Foreman, 1991).

Embora o som e o ruído derivem do mesmo fenómeno físico, a propagação de ondas mecânicas através de um meio, a distinção entre ambos assenta, em grande medida, numa interpretação subjetiva. Esta subjetividade torna difícil estabelecer uma fronteira clara entre o que é percebido como som agradável ou neutro e o que é identificado como ruído perturbador. A percepção do ruído não depende apenas de fatores físicos, como a intensidade sonora, mas também de aspetos qualitativos e contextuais, como a frequência, a natureza temporal do som, que pode ser contínuo, intermitente ou impulsivo, e características psicoacústicas. Entre estas destacam-se o *pitch*, que permite ordenar os sons do mais grave ao mais agudo, e o *loudness*, que se refere à intensidade subjetiva do som, organizando-o numa escala de mais fraco a mais forte (Mateus, 2014; Souza, 2013).

2.1.2 Pressão Sonora e Nível de Pressão Sonora

A pressão sonora corresponde à variação de pressão que uma onda sonora exerce sobre uma determinada área, em relação à pressão atmosférica de referência. Trata-se de uma grandeza fundamental na acústica, uma vez que está diretamente relacionada à percepção subjetiva do ruído: quanto maior a pressão sonora, maior tende a ser a sensação de volume e o potencial de desconforto auditivo (Driscoll et al., 2009; Foreman, 1991).

A unidade de medida da pressão sonora no Sistema Internacional é o Pascal (Pa). O ouvido humano é capaz de detetar pressões sonoras que variam aproximadamente entre 20 μPa (2×10^{-5} Pa), considerado o limiar da audição, e 200 Pa, que representa o limiar da dor. Devido à ampla gama de valores envolvidos, torna-se impraticável utilizar uma escala linear. Por essa razão, utiliza-se uma escala logarítmica, expressa em decibel (dB), que permite representar esta grande variação de forma mais conveniente.

A pressão sonora eficaz (ou média quadrática), P_{rms} , é calculada ao longo de um intervalo de tempo, T , é expressa pela seguinte equação:

$$P_{rms} = \left(\frac{1}{T} \int p^2 \cdot dt \right)^{\frac{1}{2}} [Pa] \quad (1)$$

onde $p(t)$ é a pressão sonora instantânea num dado ponto do espaço e no instante t . Com base nesta grandeza, o nível de pressão sonora (L_p) é obtido por meio da seguinte relação logarítmica:

$$L_p = 20 * \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \text{ [dB]} \quad (2)$$

Em que P_{ref} representa a pressão sonora de referência, tendo o valor de $20\mu\text{Pa}$, convencionalmente adotado como o limiar da audição humana para uma frequência de 1 kHz. A escala para o L_p representa o intervalo de audição entre 0 e 140 dB. O intervalo típico de audição humana situa-se entre 0 dB (limiar de audibilidade) e 140 dB (limiar da dor).

2.1.3 Ponderação em Frequência

A percepção do som pelo ouvido humano varia com a frequência, ou seja, a capacidade auditiva humana não é igualmente sensível em todas as frequências do espectro audível. Para adequar as medições acústicas à sensibilidade auditiva humana, aplica-se uma ponderação em frequência (Mateus, 2014; Souza, 2013). A ponderação “A” em dB(A) é a mais comumente utilizada, sendo utilizada para conferir aos equipamentos de medição a capacidade de traduzir a energia que é contida no campo sonoro que é percebido pelo ouvido humano. Neste sentido, a ponderação A atenua as baixas frequências, de até 200Hz, com a atenuação chegando a próximo de 0 dB na região próxima de 1000 Hz, voltando a ser atenuado nas frequências mais altas, como representado na Figura 1 e o Filtro de calibração de ponderação A no ANEXO II (Cremonesi, 2013).

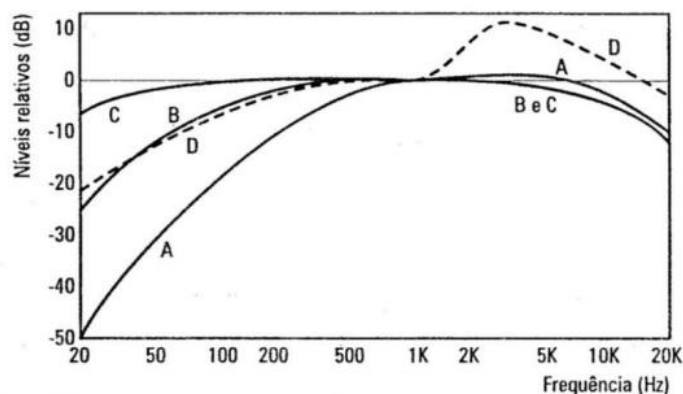


Figura 1: Curva de ponderação para ponderação A, B, C e D. Autor: Cremonesi, 2013.

A sensibilidade do ouvido humano varia consideravelmente com a frequência do som. O ouvido é mais sensível a frequências médias, entre 1000 e 5000 Hz, e menos sensível a frequências

mais baixas e mais altas, o que justifica as escolhas de atenuação nas regiões periféricas a essas frequências (Foreman, 1991).

2.1.4 Indicadores Acústicos

- Nível sonoro contínuo equivalente

Na avaliação do ambiente sonoro, o indicador fundamental é o nível sonoro contínuo equivalente, frequentemente referido como Leq. Quando este valor é ponderado em A para simular a percepção humana do ruído, utiliza-se o LAeq (nível sonoro contínuo equivalente ponderado em A), que serve de base para a maioria das análises de ruído ambiental (Lemos, 2023; Mateus, 2014).

A partir deste indicador, derivam-se outros parâmetros importantes para uma caracterização mais detalhada do ambiente sonoro (Can et al., 2020; Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

- Lden (ruído diurno-entardecer-noturno):

Avalia o ruído ao longo do dia, atribuindo pesos diferenciados aos períodos diurno, entardecer e noturno, com penalizações para os períodos mais sensíveis e é calculado conforma a fórmula 3.

- Ld (ruído equivalente diurno), o Le (ruído equivalente entardecer) e o Ln (ruído equivalente noturno) permitem avaliar exclusivamente o som nos períodos diurno, entardecer e noturno, respetivamente.

- LAFmax e LAFmin:

Indicam os valores máximos e mínimos de pressão sonora ponderados em A, registados durante a medição.

- L10, L50, L90:

Níveis estatísticos que representam os picos (L10), o nível médio (L50) e o ruído de fundo (L90), ou seja, o L10 corresponde ao Nível de pressão sonora excedido em 10% do tempo de medição (identifica os picos de ruído); o L50 corresponde ao Nível de pressão sonora excedido em 50% do tempo de medição (indicativo do nível de ruído médio); e o L90 representa o Nível de pressão sonora excedido em 90% do tempo de medição (considerado o ruído de fundo).

- SEL (Sound Exposure Level):

Utilizado para eventos sonoros discretos, representa a energia sonora total de um evento.

- LAr (nível de avaliação corrigido):

Corrige o LAeq para características tonais ou impulsivas do ruído, ou seja, aplicam-se penalizações adicionais se o ruído for tonal ou impulsivo).

- Indicadores de incomodidade e perturbação:

Embora não sejam parâmetros físicos, podem ser incluídos inquéritos ou avaliações subjetivas para complementar a análise do impacto do ruído na população.

Estes indicadores permitem uma caracterização abrangente do ambiente sonoro, adaptando-se a diferentes necessidades de avaliação, desde a monitorização contínua até à análise de eventos pontuais e avaliação do impacto na saúde e bem-estar.

Tabela 1: Principais indicadores acústicos utilizados na avaliação do ruído ambiente e suas fórmulas, quando aplicáveis.

Designação do Indicador	Fórmula Matemática
LAeq	$L_{Aeq} = 10 \times \log_{10} \left[\left(\frac{1}{T} \right) \times \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right]$
Lden	$L_{den} = 10 \times \log_{10} \left[\left(\frac{1}{24} \right) \times \left(\left(13 \times 10^{\left(\frac{L_d}{10} \right)} \right) + \left(3 \times 10^{\left(\frac{L_e+5}{10} \right)} \right) + \left(8 \times 10^{\left(\frac{L_n+10}{10} \right)} \right) \right) \right]$
Ld, Le, Ln	LAeq calculado separadamente por período.
LAFmax / LAFmin	Valores registrados em medições.
L10, L50, L90	Lx: nível excedido em x% do tempo de medição.
SEL	$SEL = L_{Aeq} + 10 \times \log_{10}(T)$
LAr	$L_{Ar} = L_{Aeq} + K_t + K_i$

2.1.3 Propagação do Som no Meio Exterior

A propagação do ruído no ambiente é influenciada por diversos fatores e fenómenos complexos. O som, enquanto onda mecânica, propaga-se através do ar. Esta propagação é afetada por reflexão, absorção, difração e interferência (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Mateus, 2014; Peixoto, 2020; Souza, 2013).

A reflexão ocorre quando uma onda sonora encontra uma superfície dura e lisa, sendo devolvida ao meio. A absorção acontece quando a onda sonora é convertida em outras formas de energia, como calor, ao encontrar materiais absorvente. A difração é o fenômeno que permite que a onda sonora contorne obstáculos, propagando-se para áreas que estariam, de outra forma, protegidas. A interferência ocorre quando duas ou mais ondas sonoras se encontram, podendo resultar em reforço (interferência construtiva) ou cancelamento (interferência destrutiva) da amplitude sonora (Peixoto, 2020; Souza, 2013).

O relevo, as edificações e a vegetação desempenham um papel crucial na dispersão e atenuação do som. O relevo acidentado pode bloquear a propagação direta do som, criando zonas de sombra acústica. As edificações, por sua vez, podem refletir ou absorver o som, dependendo dos materiais de construção e da geometria das fachadas. A vegetação densa pode atenuar o som, embora este efeito seja limitado, necessitando de faixas largas de vegetação para um mascaramento eficaz do ruído (Can et al., 2020; Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

As condições meteorológicas, como o vento, a humidade e a temperatura, têm um impacto significativo na propagação do ruído. O vento pode transportar o som a maiores distâncias a favor do vento e reduzir a sua propagação contra o vento. A humidade e a temperatura afetam a absorção do som pelo ar, influenciando a atenuação da onda sonora com a distância. A estabilidade atmosférica também tem influência (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Mateus, 2014; Peixoto, 2020).

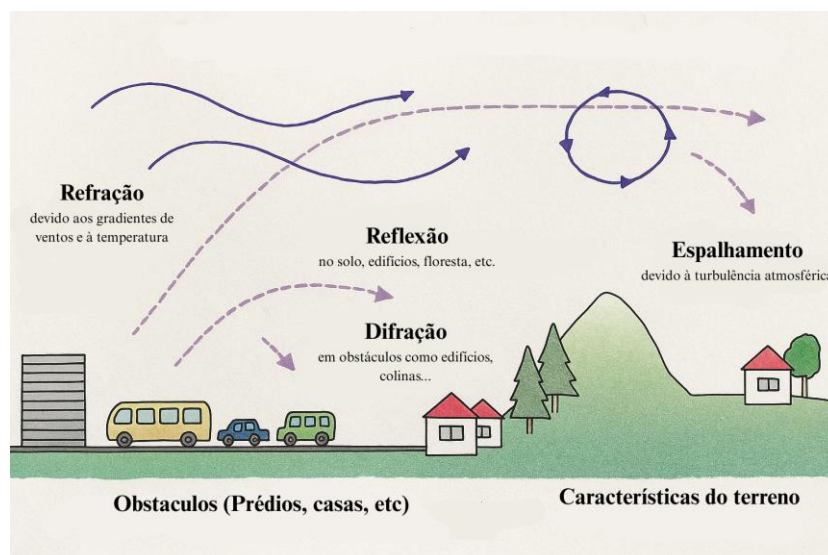


Figura 2: Propagação do som no ambiente.

2.2 Fontes de Ruído em Campi Universitários

As fontes de ruído classificam-se em dois grandes grupos, as fontes móveis e as fontes fixas. A distinção entre as fontes facilita a implementação de metodologias a serem utilizadas na sua avaliação e mitigação do ruído (Espadaler-Clapés et al., 2023a; Nygren et al., 2024).

O tráfego rodoviário é um dos principais exemplos de fonte móvel, pois este engloba uma grande diversidade de veículos, como automóveis ligeiros, veículos médios pesados, veículos pesados, motociclos, entre outros, em que cada um apresenta um nível diferente de emissão sonora e que deve ser considerado em análises, além de velocidade média e fluxo de passagem. Outros exemplos de fontes móveis são o tráfego ferroviário e o tráfego aéreo, que também variam de acordo com tipologia (Espadaler-Clapés et al., 2023a; Figlar et al., 2008; Nygren et al., 2024; Rey-Gozalo et al., 2022).

Já as fontes que se localizam num ponto específico do espaço são as fontes fixas de ruído, que por sua vez, tendem a possuir uma emissão sonora mais constante ou previsível. Apresentam usualmente uma natureza diversa, como instalações industriais, construção civil, sistemas de aquecimento ou ar condicionado, estações de bombagem de água, fontes de música ao vivo. A avaliação destas fontes envolve a mediação dos níveis de pressão sonora em diversos pontos e horários, além da análise das características espectrais do ruído (Baclet et al., 2022; Hankach et al., 2024; Nygren et al., 2024; Rey-Gozalo et al., 2022).

Em relação às fontes sonoras que podemos encontrar nos campi universitários, espaços caracterizados por uma combinação de áreas edificadas, vias de circulação externas e internas ao perímetro dos campi, zonas verdes, espaços de convívio, entre outras, apresentam uma diversidade de fontes sonoras que se enquadram nas duas categorias anteriormente descritas. A presença significativa de tráfego automóvel associado à mobilidade de estudantes, docentes e pessoal técnico-administrativo, bem como a circulação de transportes públicos e veículos de serviço, representa uma importante componente móvel geradora de ruído. Paralelamente, os sistemas de climatização e ventilação dos edifícios, equipamentos de manutenção, obras de construção e reabilitação, e eventos ao ar livre com amplificação sonora constituem exemplos típicos de fontes fixas presentes nestes ambientes (Aumond et al., 2018; Can et al., 2020; Hankach et al., 2024; Montenegro et al., 2024; Stoter et al., 2020). A identificação e caracterização destas fontes nos campi é essencial para a avaliação do ambiente sonoro e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação do ruído.

Porém, para analisar o ambiente sonoro de um campus é importante levar em conta que a intensidade e a frequência de fontes de ruído variam dependendo de seu tamanho, localização e de suas políticas internas em relação a atividades e eventos. A contribuição do tráfego externo para os níveis de ruído interno é um fator de grande importância a instituições localizadas em zonas urbanas ou próximas a vias de tráfego intenso (Hankach et al., 2024; Montenegro et al., 2024; Nygren et al., 2024; Śmieszek et al., 2023).

2.2.1 Tráfego Rodoviário e Transporte Público

Os sistemas de transporte constituem uma das principais fontes de ruído ambiente nas zonas urbanas e periurbanas, assumindo particular relevância o ruído rodoviário, ferroviário e aéreo. O ruído rodoviário é gerado essencialmente pela interação entre os pneus e o pavimento, pelo funcionamento do motor, pelo sistema de escape e pelo efeito aerodinâmico dos veículos. Em velocidades elevadas, o ruído de rolamento torna-se predominante, enquanto em velocidades mais reduzidas, como em ambientes urbanos, o ruído do motor e do escape adquire maior relevância (Specht, 2009; Cabral, 2018). Desta forma, entre os diversos fatores que contribuem para o agravamento das emissões de ruído rodoviário, o aumento do tráfego e a congestão, velocidades elevadas, acelerações bruscas e presença de veículos pesados são fatores relevantes (Baclet et al., 2021; Can et al., 2020; Espadaler-Clapés et al., 2023a; Rey-Gozalo et al., 2022).

No transporte ferroviário, o ruído resulta do contacto roda/carril, dos sistemas de tração, das manobras, das buzinas e dos sistemas de informação ao público. Este tipo de ruído pode apresentar componentes tonais e impulsivos, especialmente durante acelerações, travagens e passagens em curvas, sendo a sua caracterização fundamental para a gestão do ambiente sonoro em zonas próximas das linhas ferroviárias (CAPS-IST, 2021).

Relativamente ao transporte aéreo, o ruído é gerado principalmente pelos motores das aeronaves e pelo fluxo de ar sobre as superfícies das asas e fuselagem, apresentando elevados níveis de pressão sonora, com componentes de baixa e média frequência, e padrões de emissão descontínuos, associados aos ciclos de aterragem, descolagem e passagem a baixa altitude (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021).

Estudos recentes demonstram que o ruído dos transportes pode ter impactos significativos na saúde pública, incluindo distúrbios do sono, hipertensão e doenças cardiovasculares, sendo o tráfego rodoviário responsável pela maioria dos casos de doença relacionados com o ruído ambiental (Agência Europeia do Ambiente, 2020, citado em Ribeiro et al., 2021).

A monitorização do ruído nos meios de transporte coletivo, como o metropolitano, revela também exposições elevadas, com resultados superiores aos valores recomendados em viagens pendulares, evidenciando a necessidade de abordagens integradas para a gestão do ruído ambiental (Delgado, 2021).

2.2.2 Infraestruturas e Equipamentos Urbanos

Dentro do contexto de campi universitários, infraestruturas e equipamentos urbanos contribuem significativamente para os níveis de ruído, sendo que se destacam sistemas de ventilação e climatização instalados em edifícios, pois seu funcionamento contínuo gera ruído considerável. Mateus (2014) abordou em sua tese de doutoramento a influência dos parâmetros de amostragem na incerteza das medições de ruído ambiental, sendo que a presença de ruído constante de equipamentos como sistemas de ventilação pode influenciar essas medições e a percepção do ambiente sonoro.

Outra categoria importante de fontes de ruído em campi universitários são as obras de construção e manutenção. A construção de novos edifícios, a remodelação de estruturas existentes ou mesmo obras de manutenção nas vias de acesso e espaços exteriores envolvem a utilização de maquinaria ruidosa e a realização de atividades que podem gerar níveis elevados de pressão sonora. O RGR estabelece que estas atividades ruidosas temporárias estão sujeitas a regulamentação, e o seu impacto acústico deve ser considerado no planeamento e gestão do ambiente sonoro do campus. A legislação portuguesa, preconiza a elaboração de mapas de ruído pelas câmaras municipais para apoiar o planeamento urbano. Estes mapas de ruído devem ter em conta a informação acústica obtida por técnicas de modelação ou por recolha de dados acústicos normalizada.

2.2.3 Atividades Académicas e Recreativas

Além das fontes de ruído relacionadas com trânsito e infraestruturas e equipamentos, as atividades inerentes ao funcionamento de um campus universitário constituem também contribuições significativas para a paisagem sonora. A presença constante de estudantes, docentes e funcionários, e as suas diversas interações, geram um nível de ruído de fundo que varia ao longo do dia e dos espaços. As conversas informais em espaços abertos, como pátios e zonas de circulação, representam uma fonte contínua de ruído, cujo impacto é particularmente notório em áreas de maior concentração populacional (Barboza de Souza et al., 2019; Zannin et al., 2013).

Dentro dos edifícios, as atividades acadêmicas, nomeadamente as aulas, podem ser fortemente influenciadas pelo ruído gerado pelos próprios estudantes. Estudos demonstram que os alunos se autoidentificam como uma das principais fontes de ruído nas salas de aula, através de conversas paralelas, movimentação e outras interrupções. Este ruído pode prejudicar a concentração, a compreensão das explicações dos docentes e, conseqüentemente, a qualidade do aprendizado. A percepção deste ruído como desagradável e perturbador é comum entre os estudantes universitários (Barboza de Souza et al., 2019; Servilha & Delatti, 2014).

Adicionalmente, as atividades recreativas e eventos organizados no campus podem introduzir picos de ruído consideráveis. Eventos desportivos, atividades culturais, festas acadêmicas ou mesmo a utilização de espaços de lazer podem gerar níveis sonoros elevados, impactando o bem-estar da comunidade acadêmica e potencialmente excedendo os limites recomendados. É importante considerar a localização e a frequência destas atividades na análise acústica global do campus (Barboza de Souza et al., 2019).

Estudos realizados noutros contextos universitários, como os reportados no Brasil, corroboram a importância das atividades humanas como fontes de ruído relevantes. Em campi da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e da Universidade Federal do Paraná (UFPR), verificou-se que a conversação entre as pessoas era uma das principais causas de excedência dos limites de ruído recomendados, a par do tráfego de veículos. Estes resultados sugerem que a dinâmica populacional e as interações sociais dentro do campus são aspetos cruciais a serem considerados na modelação acústica (Barboza de Souza et al., 2019; Servilha & Delatti, 2014).

2.3 Avaliação do Ambiente Sonoro

A crescente preocupação com o ruído ambiental em toda a Europa, impulsionada pelo aumento da densidade populacional nos espaços urbanos, tem levado a uma maior atenção relativamente aos seus efeitos no ambiente e na sociedade. Esta preocupação reflete-se em documentos como a Diretiva 2002/49/EC, que considera a incomodidade devida à exposição ao ruído ambiental e a preservação da qualidade sonora dos espaços. Em Portugal, o RGR define o ruído ambiente como o ruído global observado numa dada circunstância, num determinado instante, devido ao conjunto das fontes sonoras. A avaliação e gestão deste ruído ambiente, nomeadamente através da elaboração de mapas de ruído, são tarefas importantes para as câmaras municipais, visando apoiar o ordenamento do território e garantir o bem-estar das populações (Mateus, 2014).

No contexto específico de um campus universitário, a avaliação do ruído ambiental assume uma relevância particular. Estes espaços, destinados à educação, investigação e convívio, podem ser afetados por diversas fontes de ruído, como o tráfego rodoviário nas vias de acesso e circulação interna, a conversação entre pessoas, e até mesmo ruído industrial proveniente de equipamentos ou instalações específicas (Barboza de Souza et al., 2019; Ventura, 2008). A exposição a níveis elevados de ruído nestes ambientes pode ter impactos negativos no desempenho de estudantes, docentes e funcionários, afetando a concentração, a comunicação e o bem-estar geral. Estudos demonstram que o ruído em ambientes de estudo pode levar a dificuldades de aprendizagem e percepção da voz (Peixoto, 2020; Servilha & Delatti, 2014). Assim, compreender e quantificar os níveis de ruído ambiental num campus é essencial para identificar potenciais problemas de conforto acústico e para fundamentar a implementação de medidas de mitigação eficazes (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

Através da realização de medições sonoras *in situ*, seguindo normas e procedimentos técnicos, é possível obter dados reais sobre os níveis de pressão sonora existentes e identificar as principais fontes de ruído.

2.3.1 Normas e Regulamentos Aplicáveis ao Ambiente Sonoro em Espaços Urbanos e Educativos

Em Portugal, a avaliação da poluição sonora é realizada através de documentos fundamentais como a Norma Portuguesa NP ISO 1996 e o RGR. A NP ISO 1996 estabelece as diretrizes para a medição e avaliação do ruído ambiental, definindo os procedimentos de medição, os indicadores de ruído, os intervalos de tempo de medição e os métodos de tratamento dos resultados. O RGR estabelece os limites de ruído para diferentes zonas e atividades, os indicadores de ruído, os períodos de referência e os métodos de avaliação da conformidade. O objetivo principal é proteger a saúde humana e o ambiente dos efeitos nocivos do ruído, garantindo a qualidade acústica do ambiente.

O RGR visa a prevenção do ruído e o controlo da poluição sonora para salvaguardar a saúde humana e o bem-estar das populações. O regulamento compete ao Estado, às Regiões Autónomas, às autarquias locais e às demais entidades públicas promover medidas administrativas e técnicas para a prevenção e controlo da poluição sonora, respeitando o interesse público e os direitos dos cidadãos. O Estado define uma estratégia nacional de redução da poluição sonora, integrando o controlo do ruído nas políticas de desenvolvimento económico e social, ordenamento

do território e saúde. As autarquias locais tomam medidas para minimizar os incómodos causados pelo ruído de diversas atividades.

Tabela 2: Principais normas aplicáveis na avaliação do ruído em Portugal.

Norma	Âmbito de Aplicação	Observações
Decreto-Lei n.º 9/2007 (Regulamento Geral do Ruído)	Estabelece o regime legal da prevenção e controlo da poluição sonora. Aplica-se a fontes fixas e móveis, ambientes exteriores e ruído de vizinhança.	Base legal fundamental para avaliação do ruído ambiente em Portugal.
NP ISO 1996-1:2019	Define conceitos básicos, termos e parâmetros para a descrição da exposição ao ruído ambiente.	Fornece terminologia padronizada e parâmetros como LAeq, Lden, Ln.
NP ISO 1996-2:2017	Estabelece métodos de medição de ruído ambiente em locais exteriores.	Usada para planeamento e avaliação de conformidade com os limites legais.
Diretiva 2002/49/CE (Diretiva do Ruído Ambiente)	Regulamenta a avaliação e gestão do ruído ambiental na União Europeia.	Base para a elaboração de mapas de ruído e planos de ação.
CNOSSOS-EU	Método comum europeu de avaliação de ruído de tráfego rodoviário, ferroviário e industrial.	Obrigatório para os Estados-membros na elaboração de mapas estratégicos de ruído.

As câmaras municipais desempenham um papel crucial na gestão do ruído, elaborando mapas de ruído para apoiar a criação, alteração e revisão dos planos diretores municipais e dos planos de urbanização. Adicionalmente, elaboram relatórios sobre a recolha de dados acústicos para auxiliar na elaboração, alteração e revisão dos planos de pormenor. Estes mapas de ruído consideram informações acústicas obtidas através de técnicas de modelação ou recolha de dados, seguindo medições normalizadas, utilizando os indicadores Lden e Ln.

As zonas sensíveis ou mistas expostas a ruído ambiente exterior que exceda os valores limite fixados no RGR devem ser objeto de planos municipais de redução de ruído, cuja responsabilidade recai sobre as câmaras municipais. Estes planos devem ser executados num prazo

máximo de dois anos, com prioridade para zonas sensíveis ou mistas que excedam em mais de 5 dB(A) os valores limite. Os planos vinculam entidades públicas e particulares, sendo aprovados pela assembleia municipal.

As zonas sensíveis, destinadas a habitação, escolas, hospitais e espaços de lazer, exigem níveis de ruído mais baixos do que as zonas mistas. O objetivo é assegurar um ambiente acústico que promova o descanso, o estudo e a recuperação da saúde, minimizando o impacto negativo do ruído nestas atividades. Nestas áreas, os valores limite de exposição ao ruído ambiente exterior são mais restritivos, refletindo a necessidade de um maior controlo da poluição sonora.

Por outro lado, as zonas mistas, onde se desenvolvem outras atividades como comércio, serviços e indústria, podem estar sujeitas a níveis de ruído mais elevados, embora ainda dentro de limites que protejam a saúde pública. No entanto, o RGR também prevê exceções para zonas sensíveis próximas de grandes infraestruturas de transporte existentes ou projetadas, onde os limites de ruído podem ser equiparados aos das zonas mistas, reconhecendo a dificuldade de reduzir os níveis de ruído nestas situações.

Adicionalmente, o RGR estabelece valores limite de exposição que devem ser respeitados em função da classificação da zona, expressos pelos indicadores L_{den} e L_n , sendo as principais classificações as seguintes:

- Zonas Mistas: Estas zonas não devem ser expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A) (L_{den}) e 55 dB(A) (L_n).
- Zonas Sensíveis: Nestas zonas, o ruído ambiente exterior não deve ultrapassar os 55 dB(A) (L_{den}) e 45 dB(A) (L_n).
- Zonas Sensíveis com Grandes Infraestruturas de Transporte Existentes: Zonas sensíveis na proximidade de grandes infraestruturas de transporte não devem ser expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A) para L_{den} e 55 dB(A) para L_n .
- Zonas Sensíveis com Projetos de Grandes Infraestruturas de Transporte Aéreo: Zonas sensíveis na proximidade de projetos de grandes infraestruturas de transporte aéreo não devem ser expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A) para L_{den} e 55 dB(A) para L_n .
- Zonas Sensíveis com Projetos de Grandes Infraestruturas de Transporte (não aéreo): Zonas sensíveis na proximidade de projetos de grandes infraestruturas de transporte que não

sejam aéreas não devem ser expostas a ruído ambiente exterior superior a 60 dB(A) para Lden e 50 dB(A) para Ln.

- Recetores Sensíveis Isolados: Para recetores sensíveis isolados, localizados fora dos perímetros urbanos e não integrados em zonas classificadas, aplicam-se os valores limite de Lden igual ou inferior a 63 dB(A) e Ln igual ou inferior a 53 dB(A).

É importante notar que, até que as zonas sensíveis e mistas sejam classificadas, aplicam-se os seguintes limites:

- Lden igual ou inferior a 63 dB(A)
- Ln igual ou inferior a 53 dB(A)

Adicionalmente, os municípios têm a competência para definir valores mais restritivos, inferiores em 5 dB(A) aos fixados, em áreas delimitadas de zonas sensíveis ou mistas, como em centros históricos. O cumprimento dos valores limite de ruído é obrigatório para todas as atividades ruidosas, permanentes ou temporárias, e as entidades responsáveis devem adotar as medidas necessárias para garantir que os níveis de ruído não excedam os limites estabelecidos. Estas medidas podem incluir a redução do ruído na fonte, a redução no meio de propagação ou a implementação de medidas de proteção no recetor.

2.3.2 Métodos de Medição do Ruído

A avaliação rigorosa do ruído ambiental exige a implementação de métodos de medição precisos e consistentes. Entre as abordagens disponíveis, as medições *in situ* desempenham um papel crucial, permitindo a recolha de dados acústicos diretos nos locais de interesse (Barboza de Souza et al., 2019). Estas medições são tipicamente realizadas com o recurso a sonómetros, instrumentos técnicos sujeitos a controlo metrológico de acordo com a legislação vigente. Para garantir a fiabilidade dos resultados, é fundamental utilizar sonómetros de modelo homologado pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ), que possuam um certificado de verificação válido para o ano em que as medições são efetuadas e que sejam, preferencialmente, da classe de exatidão 1 (Matos et al., 2011).

Antes e após cada sessão de medições, deve ser efetuada uma verificação do sonómetro com um calibrador portátil. A obtenção de um desvio superior a 0,5 dB entre a calibração inicial e final determinará a não-aceitação dos resultados obtidos nesse período (Cremonesi, 2013; Matos

et al., 2011). No contexto da avaliação do ruído ambiental, os sonómetros devem ser ajustados para a curva de ponderação “A” das frequências sonoras (Cremonesi, 2013; Peixoto, 2020).

A localização dos pontos de medição é um aspeto crucial para a representatividade da avaliação. O RGR define os parâmetros para realização das medições. Os pontos de medição devem, sempre que tecnicamente possível, estar afastados, pelo menos, 3,5 m de qualquer estrutura refletora, à exceção do solo. A altura do microfone deve situar-se entre 3,8 m e 4,2 m acima do solo, quando aplicável, ou entre 1,2 m e 1,5 m de altura acima do solo ou do nível de cada piso de interesse, nos restantes casos. É importante garantir que os pontos de medição selecionados sejam representativos das áreas onde o ruído pode ter maior impacto nos utilizadores do campus universitário (Barboza de Souza et al., 2019; Ventura, 2008).

Para a avaliação do ruído ambiente e do ruído residual, os ensaios acústicos devem ter em conta o número de amostras e a duração das medições, de forma a garantir a representatividade dos períodos de referência definidos. No relatório do ensaio acústico, deve constar uma descrição detalhada do local de medição, complementada com fotografias, incluindo a localização de fontes sonoras relevantes e as posições do microfone, com as respetivas alturas e distâncias a superfícies refletoras e obstáculos, bem como as características do solo envolvente (Matos et al., 2011).

No que concerne à duração das medições, é possível distinguir entre monitorização contínua e medições pontuais. A monitorização contínua, que implica o registo de níveis sonoros ao longo de períodos extensos, é particularmente recomendada para a obtenção de indicadores de longa duração, como L_d , L_e e L_n , bem como o $L_{Aeq,T}$ mensal ou anual. Este método permite uma caracterização mais completa da dinâmica do ruído ao longo do tempo (Matos et al., 2011).

Apesar das vantagens da monitorização contínua, as medições pontuais, que consistem em medições de curta duração realizadas em momentos específicos, podem ser utilizadas em determinadas situações. Por exemplo, podem ser adequadas para a avaliação do ruído gerado por eventos específicos ou para obter uma análise instantânea dos níveis sonoros em diferentes locais do campus. Contudo, é importante garantir que as medições pontuais sejam representativas das condições típicas de ruído nesses locais e períodos (Matos et al., 2011; Ventura, 2008).

A escolha entre a monitorização contínua e as medições pontuais dependerá dos objetivos da avaliação acústica. Para uma caracterização detalhada do ambiente sonoro e a verificação do cumprimento de limites de exposição ao ruído, a monitorização contínua tende a ser mais informativa. No entanto, as medições pontuais podem fornecer informações valiosas para

identificar fontes de ruído específicas e realizar análises comparativas entre diferentes áreas (Barboza de Souza et al., 2019; Mateus, 2014; Matos et al., 2011; Ventura, 2008).

Em suma, a avaliação do ruído ambiental requer a aplicação de métodos de medição rigorosos, baseados na utilização de sonómetros calibrados e na observância de procedimentos normativos (Cremonesi, 2013; Matos et al., 2011). A decisão entre monitorização contínua e medições pontuais deve ser ponderada em função dos objetivos do estudo, das características do ambiente sonoro e dos recursos disponíveis, visando obter dados representativos e fiáveis para a modelação acústica e a implementação de medidas de controlo do ruído (Mateus, 2014; Ventura, 2008).

2.3.3 Exemplos de Estudos Sobre Avaliação do Ruído em Universidades e Cidades.

Ao analisar a questão do ruído, vários estudos de caso podem ser considerados para entender melhor o problema e propor soluções eficazes. No contexto do ruído de tráfego rodoviário, a modelação e o mapeamento de ruído são ferramentas importantes para a compreensão do fenómeno e para a formulação de planos de mitigação. Gabriela De Mesquita et al., 2020 desenvolveu um método de mapeamento do ruído de tráfego rodoviário em áreas urbanas utilizando um SIG (Sistema de Informação Geográfica) de acesso aberto, validando-o na cidade de Fortaleza. O estudo utilizou o software livre QGIS para modelar o ruído e analisar o desempenho de diferentes modelos de predição.

A pesquisa de Mesquita identificou que os modelos de cálculo de ruído são frequentemente provenientes de países com diferentes condições de tráfego e características urbanas, o que pode influenciar a validade dos dados. O modelo CNOSSOS apresentou o melhor desempenho entre os modelos determinísticos analisados, sendo recomendado para mapeamentos sonoros em Fortaleza. No entanto, um dos modelos brasileiros apresentou um desempenho superior, reforçando a importância de desenvolver modelos adaptados aos contextos urbanos locais.

Outro estudo de caso relevante é o de Ventura, 2008, que modelou o ruído ambiente no campus da ESTG (Escola Superior de Tecnologia e Gestão) do Instituto Politécnico de Leiria. A modelação foi realizada com o programa computacional CadnaA, utilizando dados de tráfego rodoviário e ruído industrial (ventilador). Este estudo destaca a importância da aferição/validação dos resultados da modelação através de medições acústicas in situ.

De Sousa Faria, 2015, em sua dissertação, quantificou os níveis de ruído na principal avenida de uma cidade de média dimensão, avaliando cenários de mitigação de ruído com o software TNM (*Traffic Noise Model*) da FHWA (*Federal Highway Administration*). Os cenários de mitigação incluíram a alteração da velocidade máxima, a substituição do pavimento, a utilização de barreiras acústicas e a restrição da circulação de autocarros. O estudo concluiu que a aplicação de barreiras acústicas e a restrição da circulação de autocarros, combinadas com a remoção de interseções semaforizadas, apresentaram as maiores reduções de ruído.

Souza, 2013 avaliou os níveis de ruído e as soluções arquitetônicas adotadas em ambientes de unidades de urgência e emergência em Belém-PA. A dissertação apresenta um modelo computacional de um ambiente piloto e testa soluções virtuais de condicionamento acústico. O estudo sugere a aplicação de forro acústico nos ambientes onde a RDC-50 (2004) autoriza e recomenda medições das fontes de ruído específicas de cada ambiente.

Estes estudos de caso fornecem exemplos práticos de como a modelação e o mapeamento de ruído podem ser utilizados para compreender e mitigar o ruído em diferentes contextos. A análise da percepção do ruído por estudantes pode ser importante para entender o impacto do ruído no processo ensino-aprendizagem.

2.4 Modelação Acústica em Ambientes Universitários

A intensificação do tráfego rodoviário, devido a uma crescente urbanização, tem contribuído de modo significativo para a poluição sonora em ambientes urbanos. Áreas de elevada densidade populacional, ou com alto fluxo de veículos, como os campi universitários, tendem a concentrar níveis de ruído significativos, causando impactos no bem-estar. A partir disto, a modelação acústica surge como uma importante ferramenta para a avaliação, previsão e gestão de ruído, pois permite uma compreensão detalhada da distribuição espacial e temporal dos níveis sonoros e identificar as principais fontes de poluição sonora (Can et al., 2020; Graziuso et al., 2022; Le Bescond et al., 2021b; Meller et al., 2023; Ranpise & Tandel, 2022).

No entanto, a aplicar a modelação acústica em ambiente universitário apresenta desafios e especificidades únicas, pois os campi geralmente são compostos por ambientes complexos, e por consequência, com uma grande diversidade de fontes de ruído, podendo ir desde o tráfego interno e externo, até as atividades académicas, sociais e de construção. A compreensão detalhada da paisagem sonora do campi é fundamental para a composição do planeamento urbano, gestão de atividades e a implementação de medidas de mitigação que visem espaços mais sustentáveis e

confortáveis acusticamente (Galassi Luquezi et al., 2024; Hankach et al., 2024; Nygren et al., 2023).

A modelação acústica recorre a diversas metodologias e ferramentas de software para simular a emissão e propagação do som em ambientes complexos. A integração de modelos de tráfego dinâmico, como o *MATSim* e o *Symuvia*, com ferramentas de previsão de ruído, como o *NoiseModelling*, possibilita a avaliação do impacto sonoro de atividades específicas e do tráfego veicular. Estes modelos frequentemente incorporam as diretrizes e métodos de avaliação comuns estabelecidos na Europa, como o CNOSSOS-EU, para garantir a comparabilidade e a conformidade das avaliações de ruído. A disponibilidade de ferramentas *open-source* como o *NoiseModelling* facilita a produção de mapas de ruído estratégicos e a análise de cenários de intervenção (Aumond et al., 2020; Can et al., 2020; Le Bescond et al., 2021b; Nygren et al., 2024).

2.4.1 Métodos de Modelação Acústica e Simulação de Cenários de Tráfego

Na área da modelação de ruído, é fundamental distinguir entre modelos preditivos e modelos diagnósticos, pois cada um desempenha um papel distinto na avaliação e gestão do ruído ambiental. Os modelos preditivos são utilizados para estimar os níveis de ruído em cenários futuros ou sob diferentes condições, enquanto os modelos diagnósticos são empregues para analisar e compreender as fontes e os padrões de ruído existentes (Galassi Luquezi et al., 2024; Nygren et al., 2024).

Modelos preditivos tem como objetivo prever os níveis de ruído em diferentes situações, sendo utilizados frequentemente no planeamento urbano e no desenvolvimento de infraestruturas para avaliar o impacto potencial de novas fontes de ruído, como estradas, aeroportos ou instalações industriais. Estes modelos, como simulam os níveis de ruído antes da implementação definitiva de um projeto, permitem que os planeadores e decisores identifiquem e implementem medidas de mitigação para minimizar o impacto negativo do ruído na população e no ambiente (Can et al., 2020; Montenegro et al., 2024; Nygren et al., 2024; Śmieszek et al., 2023).

Estes modelos podem gerar mapas de ruído que ilustram a distribuição espacial dos níveis de ruído sobre diferentes cenários de tráfego, alterações no uso do solo ou com a introdução de novas infraestruturas, podendo prever o impacto de diferentes estratégias de mitigação, como a construção de barreiras acústicas, a implementação de pavimentos de baixo ruído ou a gestão do tráfego, permitindo assim, otimização das medidas do controlo do ruído. Os modelos preditivos também podem estimular a exposição da população a diferentes níveis de ruído, identificando

quais áreas excedem os limites estabelecidos pela legislação e auxiliando na priorização das intervenções (Can et al., 2020; Indacochea-Vega et al., 2024; Meller et al., 2023; Rey-Gozaló et al., 2022; Stoter et al., 2020).

Em Portugal, o RGR exige que os mapas de ruído tenham em conta informação acústica adequada, nomeadamente a obtida por técnicas de modelação apropriadas ou por recolha de dados acústicos realizada de acordo com técnicas de medição normalizadas. A aferição e validação dos mapas de ruído é baseada na comparação dos valores do indicador LAeqT obtidos pelo cálculo com os valores obtidos pelas medições *in situ* em pontos coincidentes (Ventura, 2008).

Já os modelos de diagnósticos são ferramentas de análise que visam compreender e caracterizar os níveis de ruído existentes, sendo utilizados para identificar as principais fontes de ruído, analisar os padrões do ruído em diferentes áreas e avaliar a exposição da população ao ruído. Ao contrário dos modelos preditivos, que trabalham em cenários futuros, os modelos de diagnósticos baseiam-se em dados de medições reais e informação sobre as fontes existentes para criar uma representação detalhada do ambiente sonoro (Aumond et al., 2018; Galassi Luquezi et al., 2024; Nygren et al., 2024).

Os modelos diagnósticos oferecem resultados focados na análise detalhada de situações existentes. Estes modelos podem identificar as fontes de ruído dominantes num determinado ambiente, quantificando a contribuição de cada fonte para os níveis de ruído. Através da análise de dados de monitorização, os modelos diagnósticos podem revelar padrões temporais e espaciais de ruído, como variações diurnas e noturnas ou áreas de concentração de ruído. Além disso, estes modelos podem ser utilizados para validar e calibrar modelos preditivos, garantindo que as previsões futuras são baseadas em dados reais e representações precisas do ambiente sonoro globais (Aumond et al., 2018; Can et al., 2020).

Uma aplicação avançada dos modelos diagnósticos é a criação de mapas de sensibilidade ao ruído. Estes mapas identificam áreas onde a população é particularmente vulnerável aos efeitos do ruído, devido a fatores como a densidade populacional, a presença de hospitais ou escolas, ou a existência de grupos sensíveis. Os mapas de sensibilidade podem ser utilizados para priorizar intervenções em áreas com maior necessidade de proteção contra o ruído, bem como para informar o planeamento urbano e o desenvolvimento de políticas de controlo de ruído mais eficazes (Baclet et al., 2022).

Uma das principais diferenças entre modelos de diagnósticos e preditivos está na sua abordagem à modelação do ruído, em que os modelos preditivos utilizam modelos de propagação

do som para estimar como este se propaga a partir de uma fonte para um recetor, considerando fatores como distância, topografia, condições meteorológicas e a presença de obstáculos para calcular os níveis de ruído. Já os modelos diagnósticos, embora também possam utilizar modelos de propagação do som, enfatizam a análise estatística e a visualização dos dados de ruído medidos para identificar padrões e tendências (Aumond, Can, et al., 2021; Rey-Gozalo et al., 2022; Tang et al., 2022).

Outra diferença importante entre os modelos preditivos e diagnósticos é o seu nível de detalhe. Os modelos preditivos podem ser utilizados em diferentes escalas, desde a avaliação do impacto de um único veículo numa interseção até à modelação do ruído em toda uma cidade. Os modelos diagnósticos, por sua vez, tendem a ser mais detalhados e específicos, concentrando-se na análise de áreas ou fontes de ruído particulares (Aumond et al., 2018; Tang et al., 2022). Por exemplo, um modelo diagnóstico pode ser utilizado para analisar o impacto do ruído do tráfego numa rua específica ou para identificar as fontes de ruído mais perturbadoras numa área residencial (Nygren et al., 2024; Tang et al., 2022).

Os modelos preditivos e diagnósticos são ferramentas complementares na avaliação e gestão do ruído ambiental. Os modelos preditivos são utilizados para estimar os níveis de ruído em cenários futuros e para apoiar o planeamento urbano e o desenvolvimento de infraestruturas. Os modelos diagnósticos são empregues para analisar e compreender as fontes e os padrões de ruído existentes, bem como para avaliar a exposição da população ao ruído. Ambos os tipos de modelos desempenham um papel crucial na proteção da saúde pública e na melhoria da qualidade de vida em ambientes urbanos (Aumond et al., 2018; Can et al., 2020; Galassi Luquezi et al., 2024; Montenegro et al., 2024; Nygren et al., 2024; Rey Gozalo et al., 2018).

É importante notar que a escolha entre um modelo preditivo e um modelo diagnóstico depende dos objetivos específicos do estudo e dos dados disponíveis. Em alguns casos, pode ser útil combinar os dois tipos de modelos para obter uma compreensão mais completa do ambiente sonoro. Por exemplo, um modelo preditivo pode ser utilizado para estimar o impacto de uma nova estrada, enquanto um modelo diagnóstico pode ser empregue para monitorizar os níveis de ruído após a construção da estrada e para avaliar a eficácia das medidas de mitigação implementadas (Aumond et al., 2018; Galassi Luquezi et al., 2024; Montenegro et al., 2024; Nygren et al., 2024).

2.4.2 Ferramentas e Softwares Utilizados na Análise Acústica

No contexto da modelação acústica, diversos softwares têm sido desenvolvidos e utilizados para a criação de mapas de ruído e avaliação do impacto sonoro em áreas urbanas, estes permitem simular a propagação do som, considerando fatores como topografia, edifícios, barreiras acústicas e condições meteorológicas. A escolha do software depende da necessidade específicas do estudo, do tipo de ruído a ser modelado e da precisão desejada nos resultados (Graziuso et al., 2022; Meller & Magalhães De Lourenço, 2022; Nygren et al., 2024; Stoter et al., 2020).

Entre os softwares mais utilizados, destacam-se o *SoundPLAN*, *CadnaA*, *Predictor LimA* e *ArcGIS*. Estes softwares oferecem interfaces gráficas intuitivas e ferramentas avançadas para a criação de modelos acústicos detalhados. Permitem a importação de dados geográficos, a definição de fontes de ruído, a simulação da propagação do som e a visualização dos resultados em mapas de ruído. Alguns softwares, como o *SoundPLAN* e o *CadnaA*, permitem ainda a modelação em 3 dimensões, possibilitando a avaliação da exposição ao ruído em fachadas de edifícios (Can et al., 2020; Le Bescond et al., 2021b; Meller et al., 2023).

Para além dos softwares comerciais, existem também ferramentas de código aberto que podem ser utilizadas para a modelação acústica. Estas ferramentas, como o *NoiseModelling* e o *QGIS*, oferecem uma alternativa gratuita e flexível aos softwares comerciais. Apesar de poderem ter funcionalidades mais limitadas, os softwares de código aberto podem ser adaptados e personalizados para atender às necessidades específicas de cada estudo. As Figuras 3 e 4 apresentam uma comparação entre resultados gerados pelo *NoiseModelling* e o *CadnaA* (Graziuso et al., 2022; López Baeza et al., 2021; Rey-Gozaló et al., 2022; Soto Molina et al., 2023).

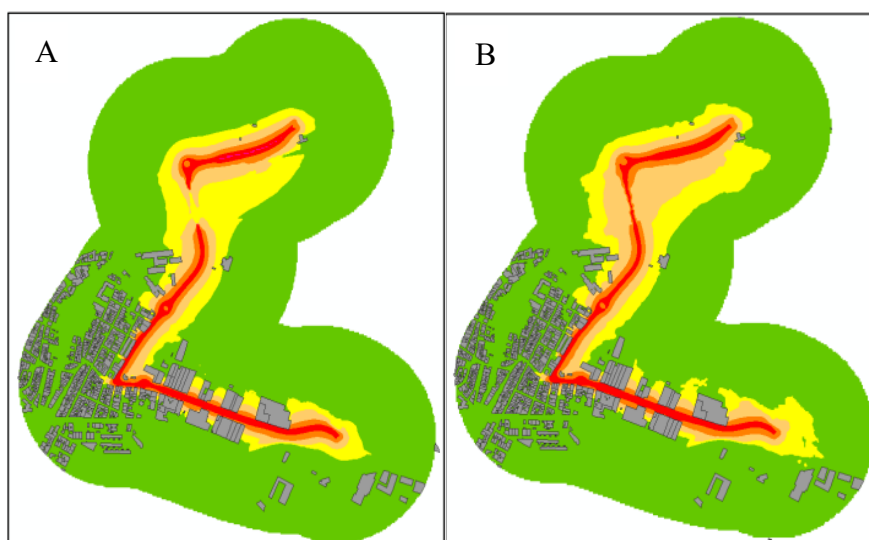


Figura 3: Comparação entre mapas gerados pelo *CadnaA* (A) e *NoiseModelling* (B). Autor: Soto Molina et al., 2023.

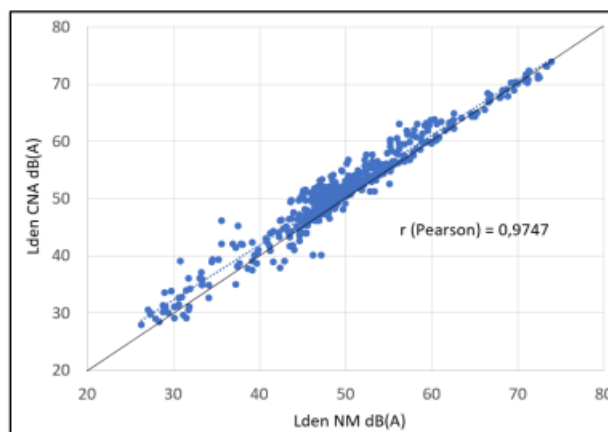


Figura 4: Correlação entre CadnaA e NoiseModelling para os resultados de Lden. Autor: Soto Molina et al., 2023.

A utilização de softwares de modelação acústica permite aos técnicos e decisores avaliar o impacto do ruído em diferentes cenários e implementar medidas de mitigação adequadas. Os mapas de ruído produzidos por estes softwares podem ser utilizados para identificar áreas críticas, avaliar a exposição da população ao ruído e planear intervenções urbanísticas que visem a redução do ruído. A modelação acústica é, assim, uma ferramenta essencial para a gestão do ruído ambiental e a promoção da qualidade de vida nas cidades (Can et al., 2020; Graziuso et al., 2022; Meller & Magalhães De Lourenço, 2022)

A precisão dos resultados obtidos com os softwares de modelação acústica depende da qualidade dos dados de entrada e da calibração do modelo. É fundamental utilizar dados geográficos precisos, definir corretamente as fontes de ruído e calibrar o modelo com medições de ruído *in situ*. A validação do modelo com dados reais garante a fiabilidade dos resultados e permite tomar decisões informadas sobre a gestão do ruído (Aumond, Can, et al., 2021; Can et al., 2020; Quintero et al., 2019; Śmieszek et al., 2023; Stoter et al., 2020).

A escolha do software de modelação acústica deve ter em conta as características do estudo em questão, o tipo de dados disponíveis e os recursos computacionais disponíveis. Os softwares comerciais oferecem funcionalidades avançadas e interfaces intuitivas, mas podem ter um custo elevado. Os softwares de código aberto são gratuitos e flexíveis, mas podem exigir mais conhecimento técnico para a sua utilização. A avaliação das vantagens e desvantagens de cada software permite seleccionar a ferramenta mais adequada para cada situação (Graziuso et al., 2022; Meller et al., 2023; Meller & Magalhães De Lourenço, 2022; Stoter et al., 2020).

O *NoiseModelling*, em particular, destaca-se como uma ferramenta de código aberto desenvolvida com o objetivo de produzir mapas de ruído ambiental em áreas urbanas extensas. Este software implementa o método europeu comum de avaliação de ruído, o CNOSSOS-EU, para a estimativa das emissões de ruído rodoviário e o cálculo da sua atenuação ao longo dos percursos de propagação. O *NoiseModelling* permite armazenar informações sobre as fontes de ruído, a geometria dos percursos de propagação e a matriz de transferência para cada par fonte/receptor. A sua arquitetura modular facilita a integração com outros softwares, como o *MATSim*, para a simulação de tráfego e a avaliação da exposição individual ao ruído (Aumond, Can, et al., 2021; Aumond et al., 2018, 2020; Baclet et al., 2023a; Espadaler-Clapés et al., 2023b; Graziuso et al., 2022; Hankach et al., 2024; Le Bescond et al., 2021a; López Baeza et al., 2021; Meller & Magalhães De Lourenço, 2022; Nygren et al., 2024).

2.4.3 Modelo CNOSSOS-EU e Modelagem no NoiseModelling

O modelo de *Common noise assessment methods in Europe* (CNOSSOS-EU) é utilizado na estrutura dos softwares de modelagem europeus, sendo que o *NoiseModelling* utiliza sua estrutura para a modelagem do ruído de tráfego rodoviário, abrangendo tanto a emissão quanto a propagação sonora (Aumond et al., 2020; Baclet et al., 2021, 2022).

No contexto da modelagem o modelo CNOSSOS-EU descreve as duas principais fontes de ruído para cada veículo, o ruído de rolagem, que é resultante da interação pneu e pavimento, e o ruído de propulsão, produzido pela cadeia cinemática dos veículos. Adicionalmente, o ruído aerodinâmico é incorporado nas fontes de ruído de rolagem (Kephalopoulos et al., 2012).

Portanto, para o nível de potência sonora de ruído de rolagem (LWR,i) para um tipo de veículo i , são considerados os coeficientes relacionados ao ruído de rolagem (AR,i) e a sua dependência da velocidade (BR,i), presentes em ANEXO I, para um tipo de veículo i , considerando ainda sua velocidade (v) e velocidade de referência (v_{ref}) de 70km/h, com um termo de correção para o ruído de rolagem ($\Delta LWR,i,m$) relacionada a características ou condições específicas m , relacionando-se a textura da superfícies da estrada, conforme apresentado na fórmula 4 (Baclet et al., 2022; Can et al., 2020; Kephalopoulos et al., 2012).

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \cdot \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{WR,i,m}(v_m) \quad (4)$$

O modelo CNOSSOS define 15 categorias de pavimentos, dentre os aspetos que influenciam na atenuação de ruído são consideradas a porosidade e a rugosidade destes revestimentos, e isto afeta a propagação das ondas sonoras dentro dos modelos calculados.

Uma de suas categorias, o asfalto poroso de duas camadas constitui um tipo de pavimento rodoviário projetado especificamente para atenuar o ruído gerado pelo contacto pneu-pavimento, que se torna a fonte sonora dominante acima de certas velocidades. A sua característica fundamental reduz o som associado ao bombeamento de ar no contacto do pneu com a superfície, contribuindo para diminuições nos níveis sonoros, que estudos comparativos com pavimentos densos situam tipicamente entre 3 e 4 dB(A), podendo atingir até cerca de 10 dB(A) em determinadas condições (Castro-Fresno et al., 2024).

Já para nível de potência sonora de ruído de propulsão (LWP,i) para um tipo de veículo i são considerados os coeficientes relacionados ao ruído de propulsão (AP,i) e a sua dependência da velocidade (BR,i), presentes em ANEXO I, para um tipo de veículo i , considerando ainda sua velocidade (v) e velocidade de referência (v_{ref}) de 70km/h, com um termo de correção para o ruído de rolagem ($\Delta LWP,i,m$) considerando características ou condições específicas m , relacionando-se a aceleração instantânea, conforme apresentado na fórmula 5 (Baclet et al., 2022; Can et al., 2020; Kephelopoulos et al., 2012).

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \cdot \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m}(v_m) \quad (5)$$

O nível de potência total (LW,i) é calculado com base na soma logarítmica de ambos os níveis, conforme a fórmula 6 (Baclet et al., 2022).

$$L_{W,i} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{L_{WR,i}}{10}} + 10^{\frac{L_{WP,i}}{10}} \right) \quad (6)$$

Para levar em consideração a cinemática dos veículos o software aplica um corretivo de aceleração instantânea dos veículos baseado na lei de emissão Imagine, este corretivo (ΔLw) é igual a aceleração instantânea do veículo multiplicado por uma constante. Quanto à propagação sonora também é utilizada a estrutura CNOSSOS-EU, que se baseia no modelo NMPB08, considerando a divergência geométrica, absorção e reflexão no solo, absorção atmosférica, difração em barreiras, efeitos de reflexão e efeitos meteorológicos (Baclet et al., 2021, 2022; Can et al., 2020; Peixoto, 2020; Ventura, 2008).

2.4.4 Limitações e Desafios da Modelação Acústica Aplicada a Espaços Universitários

A modelação acústica de espaços universitários enfrenta diversas limitações e desafios inerentes à complexidade destes ambientes. Em primeiro lugar, a diversidade de fontes de ruído presentes num campus, que incluem o tráfego automóvel, a circulação de pessoas e as conversas,

atividades académicas em espaços interiores e exteriores, e até mesmo equipamentos específicos, torna a caracterização e a modelação precisas um processo moroso e exigente. A influência de cada uma destas fontes pode variar significativamente ao longo do dia e em diferentes localizações do campus, requerendo uma amostragem e uma análise detalhadas para capturar a sua dinâmica. Além disso, a complexidade geométrica e a variedade de espaços, como salas de aula, laboratórios, bibliotecas, áreas de lazer e vias de circulação, impõem desafios na criação de modelos virtuais que representem fielmente as condições acústicas reais (Barboza de Souza et al., 2019; Peixoto, 2020; Ventura, 2008).

Em segundo lugar, as limitações dos softwares de modelação acústica podem restringir a precisão e o detalhe das simulações. Por exemplo, alguns softwares podem apresentar dificuldades na incorporação de modelos estocásticos ou na adaptação a condições locais específicas de tráfego e ambiente urbano. A utilização de modelação 2D em vez de 3D pode também limitar a análise dos efeitos de difração em barreiras e dos efeitos meteorológicos em alturas mais elevadas. Embora o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) esteja a crescer na modelação de ruído urbano, a sua aplicação a espaços universitários ainda pode carecer de ferramentas específicas que considerem a natureza multifacetada destes ambientes (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

Um desafio significativo reside na validação dos modelos acústicos em espaços universitários. A comparação entre os resultados das simulações e as medições *in loco* é crucial, mas a definição de critérios de validação e de margens de erro aceitáveis pode ser complexa. Além disso, a perceção subjetiva do ruído pelos utilizadores do campus (estudantes, docentes e funcionários) nem sempre corresponde diretamente aos níveis de pressão sonora medidos. Fatores como a natureza da atividade a decorrer, a sensibilidade individual ao ruído e as expectativas em relação ao conforto acústico podem influenciar a forma como o ruído é percecionado e o (Barboza de Souza et al., 2019; Peixoto, 2020; Servilha & Delatti, 2014); Peixoto, 2020; Servilha & Delatti, 2014).

Adicionalmente, a falta de diretrizes ou regulamentação específica para a modelação acústica em contextos educativos, nomeadamente em Portugal, pode levar a abordagens inconsistentes e dificultar a comparação de estudos. A adaptação de modelos e práticas provenientes de outros países, que podem ter características urbanas e de tráfego distintas, nem sempre representa adequadamente a realidade dos campi universitários portugueses. Assim, é fundamental o desenvolvimento de metodologias e parâmetros de modelação que tenham em conta

as particularidades dos espaços universitários a nível local (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

Por último, a modelação acústica em espaços universitários deve também considerar a dinâmica e a evolução do campus. Planos de expansão, alterações no *layout* dos edifícios e mudanças nos padrões de circulação podem impactar significativamente o ambiente sonoro ao longo do tempo. Desta forma, os modelos acústicos devem ser flexíveis e passíveis de atualização para refletir estas transformações e apoiar o planeamento e a gestão do ruído a longo prazo, visando a criação de ambientes de ensino, estudo e trabalho mais confortáveis e saudáveis (Souza, 2013).

2.5 Mobilidade Sustentável e Seus Efeitos na Qualidade Sonora

A crescente preocupação com a qualidade de vida nos centros urbanos tem impulsionado a adoção de práticas de mobilidade mais sustentáveis (Can et al., 2020). A implementação de estratégias de mobilidade sustentável, como a priorização do transporte público, a criação de zonas pedonais e cicláveis, e a adoção de veículos elétricos ou de baixas emissões, pode gerar alterações significativas nos padrões de tráfego e, conseqüentemente, nos níveis de ruído ambiente (de Sousa Faria, 2015; Peixoto, 2020). Estudos sobre o mapeamento de ruído urbano e modelos de previsão têm explorado a influência de diversos atributos relacionados com o tráfego, incluindo o volume, a velocidade e a composição do fluxo veicular. A avaliação dos efeitos dessas alterações na qualidade sonora, através de ferramentas de modelação acústica, permite quantificar os benefícios potenciais de políticas de mobilidade sustentável e informar o planeamento e a gestão do espaço campus (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

Neste contexto, esta secção explorará a relação intrínseca entre a mobilidade sustentável e os seus efeitos na qualidade sonora. Serão analisadas as potenciais alterações nos níveis de ruído resultantes da implementação de diferentes medidas de mobilidade sustentável, tendo em consideração as características do tráfego existente e a sua contribuição para o ambiente sonoro (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020; Ventura, 2008).

2.5.1 Definição de Qualidade Sonora e Sua Importância em Espaços Urbanos e Académicos

A qualidade sonora, num contexto geral, pode ser entendida como a adequação das características do som a um determinado ambiente e às atividades que nele se desenvolvem. Fisicamente, o som é uma perturbação que se propaga através de um meio elástico, resultando em variações de pressão que podem ser detetadas pelo sistema auditivo (Mateus, 2014). No entanto,

a percepção da qualidade sonora é também subjetiva, sendo o ruído frequentemente definido como um som indesejável ou sem harmonia, capaz de gerar efeitos negativos (Souza, 2013).

Em espaços urbanos, a qualidade sonora desempenha um papel crucial no bem-estar e na qualidade de vida dos cidadãos. Um ambiente sonoro adequado contribui para a saúde mental e física, facilitando a comunicação, o descanso e a realização de diversas atividades. A exposição a níveis elevados de ruído, como o proveniente do tráfego, pode causar irritação, dificuldades de concentração e até problemas de saúde mais graves. Desta forma, a gestão da qualidade sonora é essencial para criar cidades mais habitáveis e saudáveis (de Sousa Faria, 2015; Zannin et al., 2013).

No âmbito académico, a qualidade sonora assume uma importância particular devido ao seu impacto direto nos processos de ensino e aprendizagem. Salas de aula e espaços de estudo com boa acústica favorecem a inteligibilidade da fala do professor, a concentração dos estudantes e a realização de tarefas cognitivas. Por outro lado, ambientes ruidosos podem dificultar a comunicação, aumentar a fadiga vocal dos docentes e prejudicar o desempenho académico dos alunos (Servilha & Delatti, 2014).

As consequências de uma má qualidade sonora, tanto em espaços urbanos como académicos, podem ser significativas. Nos centros urbanos, a poluição sonora contribui para o stress, a perturbação do sono e a diminuição da produtividade. Em ambientes de ensino, o ruído excessivo pode levar a dificuldades de aprendizagem, irritabilidade e até problemas de saúde para professores e alunos. Reconhecer e mitigar estas consequências é fundamental para promover ambientes saudáveis e propícios às atividades que neles se desenvolvem (de Sousa Faria, 2015; Servilha & Delatti, 2014).

2.5.2 Conceito de Mobilidade Sustentável e Sua Aplicação em Campi Universitários

A mobilidade sustentável emerge como um paradigma crucial no planeamento urbano contemporâneo, procurando conciliar as necessidades de deslocação das populações com a minimização dos impactos ambientais, sociais e económicos. Num contexto geral, o conceito de mobilidade sustentável preconiza sistemas de transporte eficientes, acessíveis, seguros e com baixas emissões de poluentes atmosféricos e sonoros. Este enfoque visa promover um bem-estar coletivo a longo prazo, garantindo a qualidade de vida das gerações presentes e futuras (de Sousa Faria, 2015; Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

A aplicação dos princípios da mobilidade sustentável em campi universitários reveste-se de particular importância, dada a elevada concentração de pessoas, como estudantes, docentes e

funcionários, e a intensidade dos fluxos de deslocação diários. Os campi são frequentemente polos geradores de tráfego automóvel, com as consequentes implicações ao nível da poluição sonora, da qualidade do ar e da ocupação do espaço público para estacionamento. Implementar estratégias de mobilidade sustentável nestes espaços pode contribuir significativamente para a criação de ambientes mais saudáveis, seguros e agradáveis para a comunidade académica (Barboza de Souza et al., 2019; Ventura, 2008).

As atuais dinâmicas de mobilidade em muitos campi universitários caracterizam-se pela predominância do uso do veículo particular, o que inevitavelmente acarreta um aumento dos níveis de ruído, especialmente nas vias de acesso e circulação interna. Estudos demonstram que o ruído de tráfego rodoviário é uma das principais fontes de poluição sonora em áreas urbanas, e os campi universitários não são exceção. A exposição prolongada a níveis elevados de ruído pode ter impactos negativos na saúde, incluindo problemas de sono, stress e dificuldades de concentração (Barboza de Souza et al., 2019; de Sousa Faria, 2015; Gabriela De Mesquita et al., 2020; Mateus, 2014; Peixoto, 2020; Souza, 2013; Ventura, 2008).

A adoção de medidas de mobilidade sustentável em campi universitários pode incluir o incentivo ao uso de transportes públicos, através da melhoria da acessibilidade e da frequência das linhas que servem o campus. A promoção de modos de transporte ativos, como a bicicleta e a marcha a pé, através da criação de infraestruturas adequadas, a exemplo de ciclovias, zonas pedonais seguras e bem iluminadas, é igualmente fundamental. Adicionalmente, a implementação de sistemas de partilha de veículos e bicicletas, bem como a otimização da gestão de estacionamentos, podem contribuir para reduzir a dependência do automóvel individual (de Sousa Faria, 2015; Peixoto, 2020).

A implementação destas medidas de mobilidade sustentável tem um potencial direto na melhoria da qualidade sonora dos campi universitários. A redução do número de veículos automóveis em circulação implica uma diminuição da principal fonte de ruído. O aumento da utilização de modos de transporte mais silenciosos, como a bicicleta e a marcha a pé, contribui para a criação de um ambiente acústico mais tranquilo e propício às atividades académicas e ao bem-estar geral. A planificação integrada da mobilidade deve, assim, considerar o impacto sonoro das diferentes opções de transporte (Barboza de Souza et al., 2019; Souza, 2013).

Em suma, o conceito de mobilidade sustentável, aplicado aos campi universitários, representa uma abordagem holística que visa otimizar a deslocação das pessoas, minimizando os seus impactos negativos, incluindo a poluição sonora. A adoção de estratégias que incentivem o

uso de transportes públicos e modos ativos, em detrimento do veículo particular, tem o potencial de transformar os campi em espaços mais saudáveis, tranquilos e sustentáveis, contribuindo para o bem-estar da comunidade acadêmica, tal como preconizado por definições amplas de saúde (Barboza de Souza et al., 2019; de Sousa Faria, 2015; Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

2.6 Impactos do Ruído Ambiental na Saúde e no Desempenho Cognitivo dos Utilizadores dos Campi

O ruído ambiental tem vindo a assumir uma relevância crescente enquanto fonte de preocupação em toda a Europa, nomeadamente pelos seus efeitos no meio ambiente e na sociedade. Nos grandes centros urbanos, esta problemática é acentuada pelo aumento da densidade populacional, levando a que os níveis de ruído possam ser tão elevados que chegam a ameaçar a integridade psicológica e física dos habitantes. Em ambientes universitários, a investigação demonstra que a pressão sonora excessiva pode levar a um desempenho reduzido de docentes, estudantes e funcionários, constituindo o ruído uma das principais causas de insatisfação com o ambiente em áreas residenciais e de estudo (Barboza de Souza et al., 2019; Mateus, 2014; Souza, 2013; Ventura, 2008).

No que concerne à saúde, a exposição ao ruído urbano tem sido associada a diversos prejuízos. A Organização Mundial da Saúde (OMS) aponta para a relação entre o ruído e doenças cardiovasculares, alterações no metabolismo, bem como problemas de sono e hipertensão. Estima-se que, devido ao ruído, a perturbação do sono e o incómodo representam mais de 98% do valor total da carga de morbilidade ambiental, associada a esta exposição. Pacientes em ambientes hospitalares, por exemplo, demonstram que o ruído elevado pode aumentar a ansiedade, a perceção dolorosa e prolongar a convalescença, transformando um espaço que deveria ser sereno e silencioso num local ruidoso e estressante (de Sousa Faria, 2015; Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

Para além dos efeitos fisiológicos, o ruído ambiental nos campi universitários provoca impactos psicológicos e no bem-estar dos utilizadores. A irritação e as dificuldades de concentração são frequentemente citadas como os efeitos mais comuns, afetando uma grande percentagem da população dos campi. O ruído pode ainda desencadear ou estimular diversos sintomas que prejudicam a capacidade laboral, tais como fadiga e dores de cabeça. Há evidências

de que o ruído intenso pode levar à ineficácia no trabalho e nos estudos, e até mesmo à depressão (Barboza de Souza et al., 2019; Servilha & Delatti, 2014; Zannin et al., 2013).

No que toca ao desempenho cognitivo, o ruído em sala de aula é identificado como um fator comprometedor do processo ensino-aprendizagem. Níveis elevados de ruído facilitam a distração, restringem o nível de atenção e a cognição, e dificultam a audibilidade e compreensão. Em ambientes de estudo, mesmo que os níveis de ruído não causem diretamente perda auditiva, eles são responsáveis por prejudicar a capacidade de trabalho e estudo, com a dificuldade de ouvir o professor e a interferência direta no aprendizado e nas notas (Servilha & Delatti, 2014).

A comunicação oral é particularmente afetada pelo ruído, que causa um processo de mascaramento, dificultando ou impedindo que um som seja ouvido devido à interferência de fontes intrusivas. Esta dificuldade de comunicação, especialmente para a equipa de saúde e para a compreensão dos docentes pelos alunos, leva à elevação da voz e, muitas vezes, ao grito para que a comunicação seja possível. Tal esforço acrescido resulta em maior fadiga para os profissionais e alunos (Lima et al., 2021; Peixoto, 2020; Souza, 2013).

Em termos mais abrangentes para os utilizadores dos campi, a exposição continuada a altos níveis de ruído pode provocar a perda auditiva induzida pelo ruído (PAIR), que, embora não seja sempre o caso em níveis observados em ambientes universitários, é uma das consequências mais severas para a saúde auditiva. Mesmo em níveis que não atingem o risco ocupacional, o ruído elevado é capaz de induzir sintomas como ansiedade, confusão, desorientação, irritabilidade, falta de controlo e alteração da personalidade, afetando a qualidade de vida e a capacidade de enfrentamento da doença nos pacientes. A intervenção de projetos para melhorar as condições acústicas é, portanto, essencial (Souza, 2013).

2.7 Estratégias de Mitigação do Ruído em Campis Universitários

A crescente preocupação com os impactos negativos da exposição ao ruído na saúde humana tem motivado avanços significativos na avaliação e gestão da poluição sonora (Baclet et al., 2021). Em particular, o ruído do tráfego rodoviário é reconhecido como um dos principais contribuintes para este problema (Baclet et al., 2021; Galassi Luquezi et al., 2024; Le Bescond et al., 2021b; Meller et al., 2023). Tradicionalmente, o mapeamento de ruído permite a adoção de medidas reativas para reduzir os níveis existentes de poluição sonora, como o desenvolvimento de planos de ação baseados em mapas estratégicos de ruído. No entanto, para enfrentar os desafios da poluição sonora de forma mais detalhada e para permitir uma tomada de decisão proativa no

planeamento de estratégias de mobilidade urbana, são necessárias abordagens mais refinadas (Baclet et al., 2021). Esta secção propõe-se a explorar as diversas estratégias de mitigação do ruído que podem ser implementadas em campi universitários, reconhecendo estes espaços como ambientes complexos onde as atividades académicas, de investigação e sociais coexistem com diversas fontes de ruído, nomeadamente o tráfego de veículos (Nygren et al., 2024).

A modelação acústica surge como uma ferramenta essencial para analisar e prever o impacto de diferentes cenários e estratégias de mitigação no ambiente sonoro de um campus (Can et al., 2020; Graziuso et al., 2022; Le Bescond et al., 2021b; Nygren et al., 2024). Através da utilização de software como o *NoiseModelling*, que incorpora métodos comuns de avaliação de ruído como o CNOSSOS-EU, é possível simular a propagação do som e avaliar a exposição sonora em diferentes localizações do campus, incluindo edifícios e espaços exteriores (Aumond et al., 2020; Can et al., 2020; Le Bescond et al., 2021b). A implementação de modelos dinâmicos e abordagens baseadas em agentes permite uma análise mais detalhada da variação temporal e espacial do ruído, considerando as atividades específicas dos indivíduos (Galassi Luquezi et al., 2024; Nygren et al., 2024). Desta forma, a modelação acústica pode informar a seleção e o planeamento de intervenções de mitigação de ruído mais eficazes e adaptadas às características (Baclet et al., 2021; Ranpise & Tandel, 2022) (Baclet et al., 2021; Ranpise & Tandel, 2022).

As estratégias de mitigação do ruído em campi universitários podem abranger uma vasta gama de medidas, tanto ao nível da fonte de ruído como na trajetória de propagação e no recetor (Ranpise & Tandel, 2022; Rey-Gozalo et al., 2022). Estas podem incluir a implementação de pavimentos rodoviários com baixo ruído, a promoção da utilização de veículos elétricos e a gestão de limites de velocidade dentro do campus para reduzir o ruído do tráfego (Aumond et al., 2018; Borowska-Stefańska et al., 2023; Indacoechea-Vega et al., 2024; Ranpise & Tandel, 2022). Adicionalmente, o planeamento do uso do solo e a conceção dos edifícios, criando lados protegidos das habitações, podem contribuir significativamente para a redução do ruído (Ranpise & Tandel, 2022; Rey-Gozalo et al., 2022). A instalação de barreiras acústicas e a melhoria do isolamento sonoro dos edifícios são também medidas importantes para proteger os recetores sensíveis (Nygren et al., 2023; Stoter et al., 2020; Tang et al., 2022). A análise do custo da exposição ao ruído específico do veículo pode ainda auxiliar na priorização de estratégias de mitigação focadas nas fontes de ruído mais impactantes (Nygren et al., 2023). A combinação destas e outras estratégias, informada por modelos acústicos precisos, é fundamental para criar um ambiente sonoro mais

saudável e propício às atividades desenvolvidas nos campi universitários (Baclet et al., 2021; Ranpise & Tandel, 2022).

2.7.1 Planeamento Urbano e Gestão da Mobilidade Sustentável

O planeamento urbano e a gestão da mobilidade sustentável desempenham um papel crucial na mitigação do ruído em ambientes urbanos, incluindo campi universitários. A crescente compreensão dos problemas de saúde associados à exposição ao ruído, sendo o tráfego rodoviário um dos principais contribuintes, motiva o desenvolvimento de abordagens mais refinadas para além da tradicional cartografia de ruído. Estas abordagens são necessárias para uma tomada de decisão proativa no planeamento de estratégias de mobilidade urbana, com o objetivo de reduzir a poluição sonora de forma preventiva (Baclet et al., 2021).

A criação de zonas pedonais dentro de um campus universitário representa uma estratégia fundamental para eliminar ou reduzir significativamente as emissões de ruído veicular em áreas sensíveis, como edifícios académicos, residências estudantis e espaços de lazer. Ao priorizar a circulação a pé, estas zonas não só promovem um ambiente mais saudável e seguro para os peões, mas também contribuem para a diminuição da exposição ao ruído do tráfego. Um planeamento cuidadoso deve considerar a conectividade destas zonas com outros pontos do campus e a sua acessibilidade (López Baeza et al., 2021; Ranpise & Tandel, 2022).

De igual modo, o desenvolvimento de uma rede de ciclovias segura e eficiente incentiva a utilização da bicicleta como meio de transporte, substituindo viagens motorizadas e, conseqüentemente, diminuindo as emissões sonoras. A escolha de materiais adequados para o pavimento das ciclovias pode também influenciar os níveis de ruído gerados pelo contacto pneu-pavimento (Indacochea-Vega et al., 2024; Ranpise & Tandel, 2022). A integração destas infraestruturas no plano urbanístico do campus, considerando as necessidades dos utilizadores e a sua interligação com outros modos de transporte sustentável, é essencial (López Baeza et al., 2021).

A promoção e o investimento em transportes públicos eficientes e com baixos níveis de ruído são igualmente importantes. A utilização de autocarros elétricos ou híbridos, por exemplo, pode reduzir significativamente a poluição sonora em comparação com veículos movidos a combustíveis fósseis. Um planeamento cuidadoso das rotas, paragens e interfaces com outros modos de transporte (como as ciclovias e zonas pedonais) é fundamental para maximizar a atratividade

do transporte público e reduzir a dependência do veículo individual (López Baeza et al., 2021; Ranpise & Tandel, 2022).

A metodologia proposta por Baclet et al. (2021) para avaliar o impacto do ruído de condução de veículos individuais no ambiente urbano sublinha a necessidade de ir além dos mapas de ruído estratégicos e de considerar abordagens mais detalhadas para o planeamento da mobilidade. A implementação de zonas pedonais, ciclovias e a melhoria dos transportes públicos inserem-se nesta lógica de atuação preventiva (Ranpise & Tandel, 2022).

Adicionalmente, o design da morfologia dos edifícios dentro do campus pode influenciar a propagação do ruído, criando áreas protegidas do ruído do tráfego (Rey-Gozalo et al., 2022). O posicionamento estratégico dos edifícios e a criação de barreiras naturais ou construídas podem contribuir para a redução da exposição sonora em áreas sensíveis (Ranpise & Tandel, 2022).

Em suma, o planeamento urbano integrado e a gestão da mobilidade sustentável, através da priorização de zonas pedonais, ciclovias e transportes públicos eficientes e menos ruidosos, constituem estratégias essenciais para a mitigação do ruído em campi universitários, promovendo um ambiente mais saudável e propício às atividades académicas. A consideração da interação entre os diferentes elementos do campus e as dinâmicas de mobilidade é fundamental para o sucesso destas estratégias (Can et al., 2020; Le Bescond et al., 2021b).

2.7.2 Impacto da Redução do Tráfego Automóvel nos Níveis de Ruído

A redução do tráfego automóvel em ambientes urbanos, e especificamente num campus universitário, representa uma estratégia fundamental para a melhoria da qualidade sonora. O tráfego rodoviário é reconhecido como uma das principais fontes de poluição sonora em áreas urbanas, e a sua diminuição tem o potencial de mitigar significativamente os níveis de ruído a que a população está exposta (Baclet et al., 2021).

A implementação de medidas que visam a redução do tráfego automóvel, como o incentivo ao uso de transportes públicos, bicicletas ou a mobilidade pedonal, ou a restrição da circulação de certos tipos de veículos em horários específicos, pode levar a uma diminuição direta da intensidade do tráfego e, conseqüentemente, dos níveis de ruído. Estudos baseados em simulação, como a ferramenta *Traffic Noise Tool* (TNT) que utiliza o software *Tecnomatix Plant Simulation* da Siemens, permitem analisar o impacto das características do fluxo de tráfego e da infraestrutura rodoviária nos níveis de ruído. Estas simulações demonstram que a natureza da alteração da poluição sonora em função da intensidade do fluxo é similar para estradas com

diferente número de faixas, mas aumenta significativamente com o aumento do número de faixas (Śmieszek et al., 2023).

A introdução de limites de velocidade para reduzir o ruído rodoviário também se revela uma medida eficaz. Uma redução de 20 km/h na velocidade de veículos ligeiros (até 70 km/h) pode teoricamente levar a uma redução de cerca de 3 dB nos níveis de ruído. A análise do impacto de tais restrições na performance do sistema de transporte urbano, através da construção de modelos de tráfego que simulam diferentes cenários de velocidade, permite conciliar a melhoria do clima acústico com a manutenção do equilíbrio do sistema de transporte (Borowska-Stefańska et al., 2023).

Adicionalmente, a substituição de veículos com motores de combustão interna por veículos elétricos pode contribuir significativamente para a redução dos níveis de ruído (Ranpise & Tandel, 2022; Rey-Gozalo et al., 2022). Estudos sobre o nível de potência sonora de veículos elétricos em baixa velocidade constante demonstram o seu potencial para diminuir a poluição sonora urbana (Meller & Magalhães De Lourenço, 2022). A consideração de diferentes tipos de veículos nas simulações de ruído, como veículos ligeiros, pesados e motociclos, utilizando modelos como o CNOSSOS, é crucial para avaliar o impacto de alterações na composição do tráfego (Espadaler-Clapés et al., 2023a).

A metodologia para avaliação do custo de exposição ao ruído específico de cada veículo (NEC - *noise exposure cost*) em simulações de tráfego microscópicas oferece uma perspectiva detalhada sobre a contribuição individual dos veículos para o impacto sonoro global. A redução do número de veículos com custos de exposição ao ruído mais elevados, através da promoção de modos de transporte mais sustentáveis, terá um impacto direto na diminuição do NEC global e, consequentemente, na melhoria da qualidade sonora do campus (Nygren et al., 2023, 2024).

Em suma, a redução do tráfego automóvel, através de diversas estratégias que incluem a promoção de modos de transporte alternativos, a implementação de limites de velocidade e a transição para veículos mais silenciosos, representa uma abordagem essencial para mitigar a poluição sonora e melhorar a qualidade de vida no ambiente do campus (Baclet et al., 2021; Can et al., 2020; Nygren et al., 2023).

2.7.3 Barreiras Acústicas Naturais e Artificiais

As barreiras acústicas são elementos cruciais na modificação da dispersão sonora, atuando como obstáculos que interferem na propagação das ondas sonoras e, consequentemente,

na forma como o som se distribui num determinado espaço. A sua eficácia reside na capacidade de bloquear ou desviar o som, criando zonas de sombra acústica onde os níveis de ruído são significativamente reduzidos (Peixoto, 2020).

O funcionamento de uma barreira acústica baseia-se em princípios físicos como a reflexão, difração e absorção do som (Ventura, 2008). Quando uma onda sonora encontra uma barreira, parte da sua energia é refletida, alterando a direção de propagação. Outra parte é difratada, contornando a barreira e propagando-se para a zona de sombra, embora com menor intensidade (Peixoto, 2020). A absorção ocorre quando o material da barreira converte a energia sonora em outras formas de energia, como calor, diminuindo a quantidade de som que é refletido ou transmitido (Souza, 2013).

A geometria da barreira, incluindo a sua altura, largura e forma, desempenha um papel fundamental na sua eficácia. Barreiras mais altas tendem a criar zonas de sombra acústica maiores, enquanto a largura influencia a capacidade de absorção e reflexão do som. A forma da barreira também pode ser otimizada para maximizar a difração e minimizar a reflexão em direções indesejadas (Peixoto, 2020).

Os materiais utilizados na construção das barreiras acústicas também são importantes. Materiais densos e pesados, como o betão ou a alvenaria, são eficazes na reflexão do som, enquanto materiais porosos e fibrosos, como a lã mineral ou a espuma acústica, são mais eficientes na absorção. A combinação de diferentes materiais pode otimizar o desempenho da barreira em diferentes frequências sonoras (Souza, 2013).

A localização da barreira em relação à fonte de ruído e ao recetor é outro fator crucial. Para máxima eficácia, a barreira deve ser colocada o mais próximo possível da fonte de ruído ou do recetor, de forma a intercepar a maior parte da energia sonora. A orientação da barreira também deve ser considerada para evitar reflexões em direções indesejadas (Souza, 2013).

Além das barreiras acústicas, outras soluções arquitetónicas podem ser utilizadas para influenciar a dispersão sonora. O planeamento urbano pode incluir o zoneamento de áreas residenciais longe de fontes de ruído, como estradas e indústrias (Souza, 2013). A vegetação, como árvores e arbustos, pode ajudar a absorver e desviar o som, embora o seu efeito seja limitado (Gabriela De Mesquita et al., 2020; Peixoto, 2020).

O isolamento acústico de edifícios é outra estratégia importante, que envolve o uso de materiais e técnicas de construção para reduzir a transmissão de som através das paredes, janelas

e telhados. O tratamento acústico de interiores, como a utilização de painéis absorventes e difusores, pode melhorar a qualidade sonora dos espaços e reduzir a reverberação (Souza, 2013).

Em ambientes universitários, onde a dispersão sonora e os níveis de ruído podem impactar significativamente o conforto e o desempenho dos estudantes, a implementação de soluções arquitetônicas eficazes é crucial (Servilha & Delatti, 2014). Diversas estratégias têm demonstrado resultados positivos na mitigação do ruído e na melhoria da acústica nestes espaços.

Uma das soluções mais eficazes é o tratamento acústico de interiores, que envolve a utilização de materiais absorventes e difusores para controlar a reverberação e reduzir os níveis de ruído. A aplicação de painéis acústicos nas paredes e tetos, o uso de revestimentos de piso com boas propriedades de absorção sonora e a instalação de mobiliário com características acústicas adequadas podem contribuir significativamente para a melhoria da qualidade sonora das salas de aula, bibliotecas e outros espaços de estudo (Souza, 2013).

Além do tratamento acústico, o planeamento e o design dos espaços também desempenham um papel fundamental. A orientação das salas de aula, a disposição dos edifícios e a criação de zonas de transição podem ajudar a minimizar a entrada de ruído externo. A utilização de janelas com vidro duplo ou triplo e a vedação adequada das portas e janelas também podem reduzir a transmissão de ruído do exterior para o interior (Souza, 2013).

Outra estratégia importante é a criação de espaços de estudo com diferentes níveis de isolamento acústico. Bibliotecas e salas de estudo silenciosas devem ser projetadas com materiais e técnicas de construção que minimizem a entrada de ruído e garantam um ambiente tranquilo para a concentração. Por outro lado, áreas de convívio e espaços de trabalho em grupo podem ser projetados com níveis de isolamento acústico mais baixos, permitindo a comunicação e a interação entre os estudantes (Souza, 2013).

Adicionalmente, a integração de elementos naturais, como vegetação e água, pode contribuir para a melhoria do ambiente acústico e o bem-estar dos estudantes. A vegetação pode ajudar a absorver e desviar o som, enquanto a água pode mascarar o ruído e criar um ambiente mais relaxante. A criação de jardins internos e áreas de descanso ao ar livre pode proporcionar espaços tranquilos para o estudo e o relaxamento (Souza, 2013).

2.7.4 Sensibilização da Comunidade Acadêmica para Práticas Sustentáveis que Reduzam o Ruído.

A sensibilização da comunidade acadêmica, composta por estudantes, docentes e pessoal técnico-administrativo, é fundamental para o sucesso da implementação de práticas sustentáveis que visem a redução do ruído no campus universitário. Sem o envolvimento e a compreensão da importância desta questão por parte de todos os membros, as estratégias de mitigação do ruído correm o risco de serem menos eficazes. É crucial fomentar uma cultura de responsabilidade ambiental e de bem-estar acústico, onde cada indivíduo compreenda o seu papel na criação de um ambiente sonoro mais saudável e sustentável (Tang et al., 2022).

Para efetivar esta sensibilização, podem ser implementadas diversas estratégias. Campanhas de informação e educação podem destacar os impactos negativos do ruído na saúde e no desempenho acadêmico, utilizando canais de comunicação internos como newsletters, websites e redes sociais do campus (Espadaler-Clapés et al., 2023a; Le Bescond et al., 2021b; Tang et al., 2022). A realização de workshops e seminários sobre a temática do ruído e as suas consequências, bem como a apresentação de estudos de caso sobre iniciativas bem-sucedidas de redução de ruído em outros contextos urbanos, podem aumentar a consciencialização e motivar a adoção de comportamentos mais sustentáveis. A criação de materiais informativos visuais, como cartazes e infografias, que ilustrem as fontes de ruído no campus e as práticas para as minimizar, pode também ser uma ferramenta eficaz (Ranpise & Tandel, 2022; Tang et al., 2022).

No âmbito das atividades académicas, é possível integrar a temática da sustentabilidade e da redução do ruído em diferentes disciplinas e projetos de investigação (Hankach et al., 2024). Incentivar projetos de estudantes que avaliem os níveis de ruído em diferentes áreas do campus ou que proponham soluções inovadoras para a sua mitigação pode não só contribuir para a identificação de problemas e soluções, mas também aumentar a consciencialização dos próprios utilizadores. A adoção de práticas mais silenciosas em espaços de estudo e trabalho, o incentivo ao uso de transportes ativos ou de veículos com menores emissões sonoras dentro do campus, e a consideração do impacto sonoro em eventos e atividades organizadas pela universidade são exemplos de ações que podem ser promovidas (Chevallier et al., 2009; Ranpise & Tandel, 2022).

A universidade pode também funcionar como um "laboratório vivo" para a investigação e implementação de soluções de redução de ruído (Hankach et al., 2024). A utilização de ferramentas de modelação acústica para visualizar a distribuição do ruído no campus e avaliar o impacto de diferentes cenários e medidas de mitigação, pode fornecer dados concretos para

informar as estratégias de sensibilização e demonstrar a eficácia das práticas sustentáveis (Baclet et al., 2021, 2023b; Borowska-Stefańska et al., 2023). A partilha dos resultados destas modelações e de projetos de investigação com a comunidade académica pode reforçar a importância da ação e inspirar novas iniciativas (Tang et al., 2022).

Em suma, a sensibilização contínua e abrangente da comunidade académica é um elemento crucial para a implementação bem-sucedida de estratégias de mitigação do ruído em campi universitários (Tang et al., 2022). Ao fomentar uma cultura de consciência acústica e ao envolver todos os membros na adoção de práticas sustentáveis, a universidade pode criar um ambiente mais saudável, produtivo e alinhado com os princípios da sustentabilidade ambiental (Ranpise & Tandel, 2022). A utilização de ferramentas de modelação acústica e a integração da temática na vida académica são elementos-chave neste processo (Ibili et al., 2022).

3. METODOLOGIA

O presente capítulo descreve a metodologia científica adotada para investigar o impacto da mobilidade sustentável na qualidade sonora do Campus de Santa Apolónia do IPB, focando-se na descrição dos procedimentos e técnicas que foram implementados para responder à questão central do estudo.

Assim, a metodologia integrou uma abordagem mista, combinando avaliação experimental da qualidade sonora através de medições *in situ* com a modelação acústica do ambiente do campi. A avaliação experimental envolveu o planeamento de campanhas de medição, a seleção dos locais de medição e a seleção da instrumentação adequada e a aplicação do plano de medição. Paralelamente, foi realizada a modelação acústica utilizando o software *NoiseModelling*, que incluiu a construção de um modelo virtual detalhado do campi, incorporando dados geográficos, informações sobre o tráfego e o Modelo Digital de Elevação (DEM) para representar a topografia.

3.1 Caracterização Geral da Área de Estudo

A área de estudo corresponde ao Campus de Santa Apolónia do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Figura 5, localizado na freguesia de Sé, Santa Maria e Meixedo, concelho de Bragança, no distrito de Bragança, Portugal, com coordenadas de latitude em 41° 47' 47.50918 N e longitude em 6° 46' 5.71990" W. Este campus integra diversas funções e estruturas, sendo um espaço complexo e multifacetado.

O Campus integra três escolas distintas: a Escola Superior Agrária (ESA), a Escola Superior de Educação (ESE) e a Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG). Nestas instituições de ensino superior desenvolvem-se atividades de ensino, pesquisa e extensão.

Além do edificado principal associado a cada uma das Escolas, o campus alberga outras estruturas de apoio essenciais para a comunidade académica, como os Serviços Centrais, a Cantina do IPB, duas residências universitárias e o CIMO (Centro de Investigação de Montanha). A topografia e a presença de linhas de água também são aspetos importantes na distribuição do ruído no campus. A Avenida Sá Carneiro acompanha o lado noroeste do campus, sendo uma das principais vias de acesso a Bragança, com movimento contínuo de veículos. A entrada principal do campus é feita, sobretudo, pela Alameda de Santa Apolónia, no lado leste.

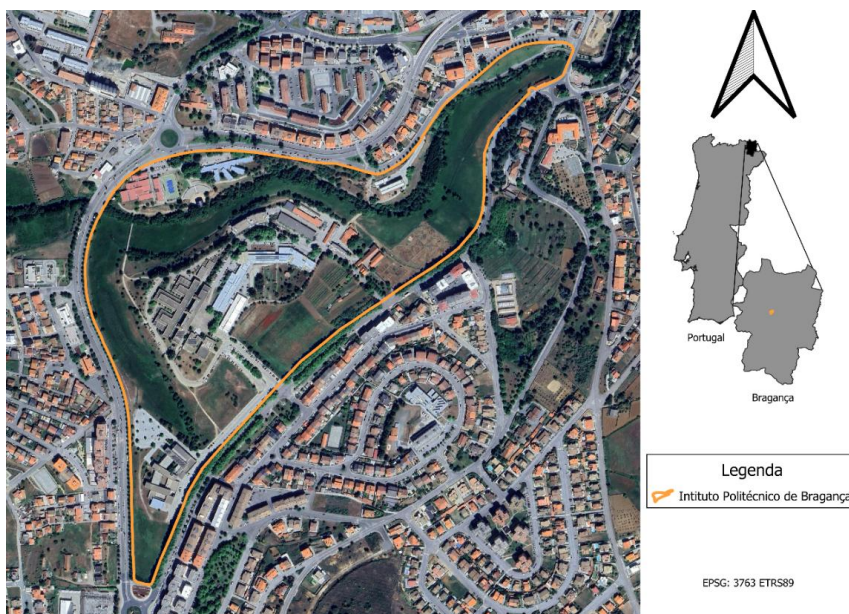


Figura 5: Localização do Campus Santa Apolónia do IPB.

3.1.1 Principais Características Urbanísticas, Funcionais e Acústicas

O Campus de Santa Apolónia, sede do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), distingue-se pela sua integração urbana, funcionalidade e qualidade ambiental, com preocupações acústicas relevantes para o bem-estar da comunidade académica.

Aspetos Urbanísticos

O Campus de Santa Apolónia apresenta uma organização espacial coerente, com vias de circulação pedonal e ciclável que interligam os diferentes edifícios e espaços abertos. A localização central da instituição facilita o acesso a pé ou de bicicleta, reduzindo a necessidade de transporte motorizado e promovendo a mobilidade sustentável (IPB, 2023; CMB, 2021). A presença de áreas verdes, espaços de lazer e zonas de convívio contribui para a qualidade de vida dos utilizadores, alinhando-se com princípios de desenho urbano contemporâneo, como a valorização do espaço público e a integração paisagística (Lamas, 1993).

A morfologia urbana do campus reflete uma preocupação com a acessibilidade universal, seguindo legislação nacional e boas práticas de desenho inclusivo. A disposição dos edifícios favorece a orientação solar e a ventilação natural, incorporando soluções de arquitetura bioclimática e sustentabilidade energética, conforme abordado nos conteúdos curriculares de Arquitetura e Urbanismo do IPB (Guia ECTS Arquitetura e Urbanismo, 2023). O planeamento urbanístico do campus segue figuras de plano como o Plano Diretor Municipal e planos de

urbanização, garantindo a compatibilidade com o desenvolvimento urbano da cidade de Bragança (Câmara Municipal de Bragança, 2021).

Aspetos Funcionais

O campus dispõe de infraestruturas modernas e bem equipadas, incluindo laboratórios, salas de aula, bibliotecas, centros de recursos e plataformas de e-learning, que suportam atividades de ensino, investigação e extensão (IPB, 2023). O complexo desportivo, composto por campos de jogos, campos relvado e pista de atletismo (estes fora do campus), complementa a oferta funcional, promovendo estilos de vida ativos e saudáveis (IPB, 2023).

A organização funcional do campus é orientada para a eficiência operacional, com espaços dedicados a diferentes áreas científicas e tecnológicas, bem como zonas de apoio à comunidade académica. A articulação entre ensino, investigação e cooperação com a sociedade é um dos pilares do funcionamento do IPB, reforçando o seu papel no desenvolvimento regional e internacional (IPB, 2023).

Aspetos Acústicos

O Campus de Santa Apolónia beneficia de uma localização urbana central, mas integra áreas verdes extensas, ciclovias e espaços pedonais, o que contribui para uma paisagem sonora diversificada e, em geral, menos ruidosa do que a de outros ambientes urbanos densos. A presença de vegetação e a organização dos espaços exteriores promove a atenuação do ruído de fundo e a redução da reverberação, melhorando o conforto acústico dos utilizadores. O tráfego rodoviário nas imediações é um elemento dominante da paisagem sonora, especialmente em horários de maior movimento, mas o desenho do campus privilegia espaços interiores e exteriores que minimizam a exposição ao ruído indesejado.

Em termos de soundscape, o campus caracteriza-se por:

- **Eventos sonoros naturais:** O vento nas árvores, o canto de aves e outros sons da natureza são frequentes nas áreas verdes, o movimento da água do rio Fervença que atravessa o Campus.
- **Atividades humanas:** Conversas, passos, atividades académicas e desportivas, e o movimento de pessoas e bicicletas compõem a paisagem sonora diária.
- **Ruído de fundo:** O tráfego rodoviário é o principal componente de ruído de fundo, mas a sua influência é atenuada pela distância dos principais acessos rodoviários e pela presença de barreiras naturais e arquitetónicas.

- Espaços de silêncio: Existem zonas do campus onde o ruído de fundo é mínimo, proporcionando ambientes propícios ao estudo e ao descanso.

3.1.2 Características fisiográficas

As características de natureza topográfica (altitude, declive, orientação) bem como outros elementos relacionados com a forma da superfície terrestre (e.g., linhas de água) encontram-se representados na Figura 5. Estas características desempenham um papel crucial na forma como o som se propaga e é absorvido em diferentes áreas.

Além disso, a presença de linhas d'água, como rios, embora possam ter um efeito de mascaramento de outros ruídos em certas situações, o fluxo da água e a sua interação com obstáculos naturais ou artificiais podem gerar sons que contribuem para o ambiente sonoro geral da área de estudo.

Com as características do solo e do relevo do campus, conforme ilustradas na Figura 6, observa-se que as zonas com relevo mais plano e aberto tendem a ficar mais expostas ao ruído, e as áreas com maior declive podem ser mais protegidas, pois o relevo acidentado tem a capacidade de bloquear a propagação direta do som, criando zonas de sombra acústica, no entanto a proximidade à linha d'água do rio Fervença é uma característica relevante, pois os rios são identificados como fontes de som natural que contribuem para o ambiente sonoro geral do campus.

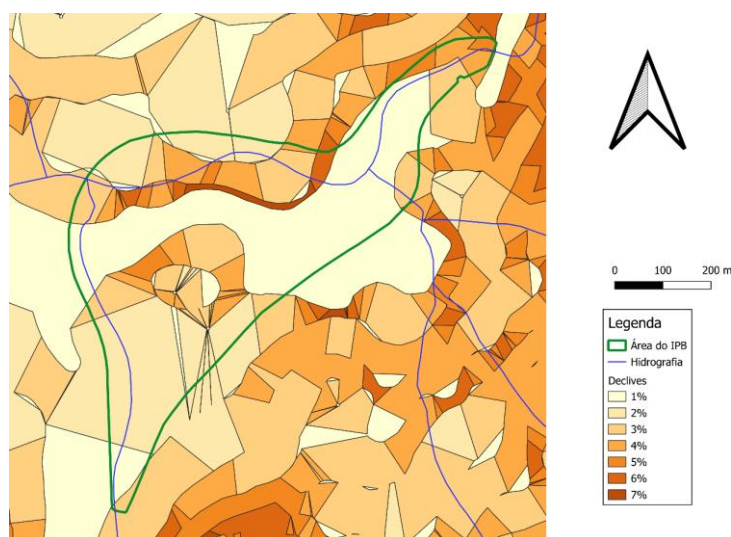


Figura 6: Declividade e hidrografia do terreno do campus

Ainda, o campus Santa Apolónia possui características multifacetadas, servindo de escola, pesquisa, residência de alunos, zonas de recreação e alimentação, a Figura 7 apresenta a área interna construída.

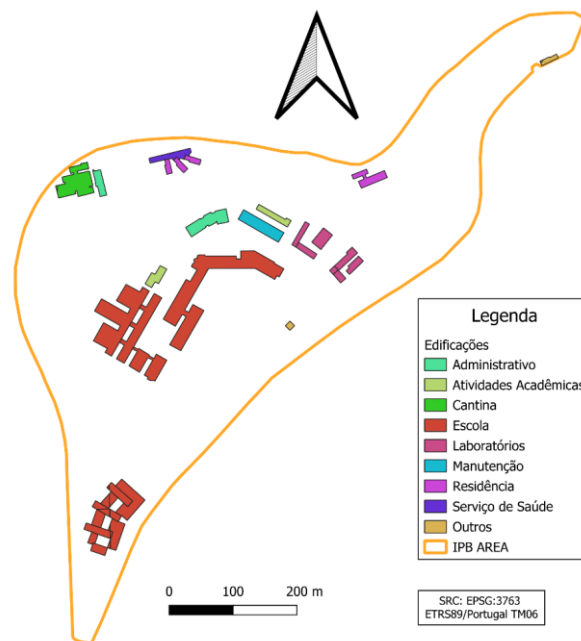


Figura 7: Área interna construída do Campus Santa Apolónia do IPB.

Pela característica de local de ensino é uma zona que concentra a maior parte de suas atividades em dias úteis, principalmente durante o dia, reduzindo na parte da noite. É considerado uma zona sensível, pois estão localizadas três escolas em sua área.

3.1.3 Identificação das Fontes Sonoras Predominantes

A paisagem sonora do Campus de Santa Apolónia, enquanto espaço multifacetado dedicado ao ensino, investigação e convívio, revela a coexistência de diversas componentes acústicas. Neste contexto, a paisagem sonora apresenta uma componente de origem natural, que se manifesta, nomeadamente, através do movimento da água nos sistemas lóticos que atravessam a área do campus. Esta dimensão natural é enriquecida por outros sons como o chilrear dos pássaros e o movimento das folhas das árvores pelo vento também fazem parte desta componente, podendo contribuir para um ambiente potencialmente sereno e propício à concentração e ao bem-estar da comunidade académica.

Contudo, esta qualidade sonora natural é frequentemente contrastada e perturbada pela influência de sons de origem humana. Entre estes, destacam-se os sons de natureza mecânica, predominantemente associados à circulação de automóveis. O ruído gerado pelo tráfego de veículos, sejam ligeiros ou pesados, constitui uma fonte sonora significativa que interfere de forma notória com a paisagem sonora original. Esta interferência acústica não se restringe a áreas pontuais, mas tende a impactar a qualidade sonora em grande parte do campus, sendo particularmente proeminente nas zonas onde a influência do tráfego é mais direta.

As áreas mais afetadas por esta componente sonora de origem humana, contrastante com a quietude potencial dos elementos naturais, são aquelas imediatamente adjacentes às principais vias de circulação de veículos, englobando tanto as infraestruturas rodoviárias que circundam o perímetro do campus como as vias internas e áreas de acesso utilizadas.

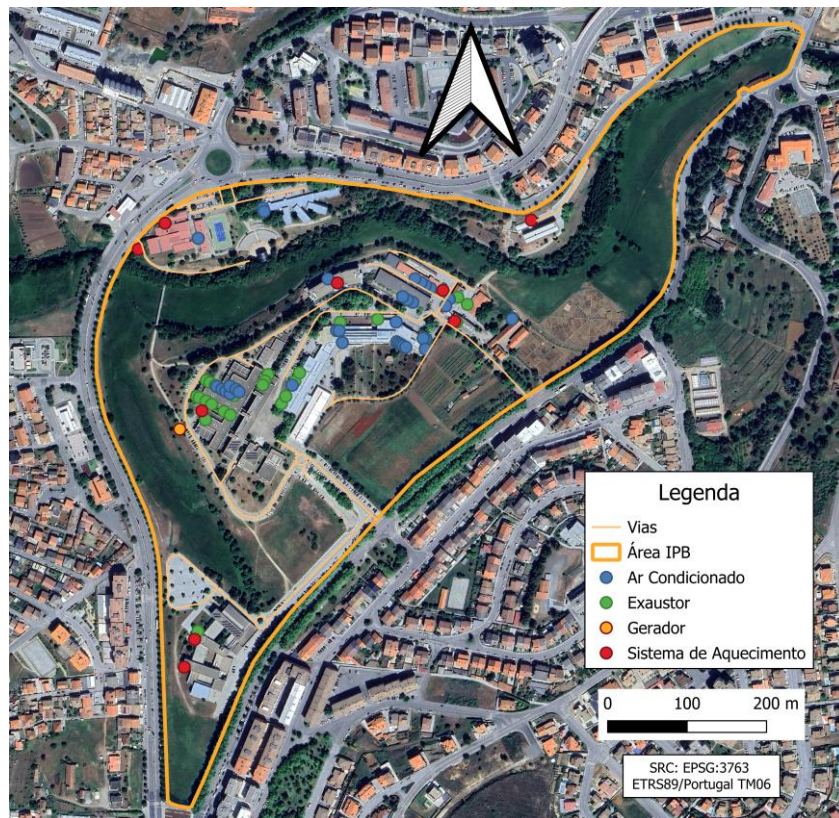


Figura 8: Fontes de ruído identificadas no campus Santa Apolónia do IPB.

No que concerne às fontes de ruído internas ao campus, o tráfego de veículos dentro da área do IPB desempenha um papel crucial. A circulação de carros, autocarros e motas nas vias de acesso, Figura 8, estacionamentos e áreas de serviço contribui significativamente para os níveis de ruído no ambiente académico, afetando estudantes, professores e funcionários. A topografia do campus pode, inclusive, intensificar este problema. A composição dos pavimentos internos, como a utilização de pedras em paralelo, pode também aumentar o ruído do tráfego devido ao atrito entre os pneus e a superfície irregular.

Para além das fontes lineares de ruído como o tráfego e os rios, existem fontes pontuais que emanam de locais fixos dentro do campus. Os sistemas de aquecimento foram identificados como algumas das principais fontes fixas de ruído no IPB. O funcionamento destes equipamentos, especialmente quando contínuo ou em áreas com grande concentração, pode gerar ruído considerável que contribui para os níveis sonoros em edifícios e áreas adjacentes. A avaliação do

ruído proveniente destas fontes fixas envolve a medição dos níveis de pressão sonora em diferentes pontos e horários.

3.2 Avaliação Experimental do Ambiente Sonoro

A avaliação experimental do ambiente sonoro assume uma importância fulcral no diagnóstico da qualidade acústica de um determinado espaço. Num contexto como o de um campus universitário, onde diversas atividades coexistem e a saúde e o bem-estar da comunidade académica podem ser afetados por níveis inadequados de ruído, a obtenção de dados concretos e precisos sobre a situação sonora existente é o ponto de partida essencial para qualquer análise mais aprofundada. Sem uma caracterização experimental rigorosa, torna-se difícil compreender a magnitude do problema da poluição sonora e identificar as suas principais origens dentro do ambiente em estudo.

A realização de medições sonoras no local permite quantificar os níveis de ruído presentes em diferentes áreas e momentos, oferecendo uma visão objetiva da exposição sonora a que os utilizadores do campus estão sujeitos. Estes dados experimentais são indispensáveis para fundamentar a avaliação dos impactos do ruído na saúde, no desempenho cognitivo e no conforto acústico da comunidade universitária. Ao identificar as zonas mais críticas e os períodos de maior perturbação sonora, é possível direcionar esforços e recursos para a implementação de soluções de mitigação eficazes.

Adicionalmente, a avaliação experimental do ambiente sonoro constitui uma etapa crucial para a validação de modelos acústicos, caso estes sejam utilizados para simular cenários futuros ou avaliar o impacto de diferentes intervenções. A comparação entre os dados medidos e os resultados das simulações permite aferir a precisão e a fiabilidade dos modelos, garantindo que as previsões e as análises se baseiam numa representação realista do comportamento do som no ambiente em questão. Desta forma, a avaliação experimental não só descreve a situação atual, mas também informa e valida as ferramentas utilizadas para o planeamento e gestão da qualidade sonora.

3.2.1 Planeamento e Medições

A realização de uma avaliação detalhada da qualidade sonora de um ambiente como o do Instituto Politécnico de Bragança (IPB) exige um planeamento metódico das campanhas de medição. Estas campanhas são cruciais para obter dados representativos dos níveis de ruído

existentes em diferentes locais e momentos, fornecendo a base para uma análise rigorosa e para a eventual implementação de medidas de mitigação eficazes.

No âmbito do estudo efetuado, as medições foram programadas para abranger um período específico, compreendido entre os meses de dezembro e janeiro de 2025. Esta janela temporal foi selecionada para capturar as variações nos níveis de ruído que possam ocorrer devido a diferentes padrões de atividade académica e condições ambientais características desta época do ano.



Figura 9: Pontos de medição internos e externos no terreno do campus Santa Apolónia do IPB.

A cobertura horária das medições constituiu outro aspeto fundamental do planeamento. Foi estabelecido que as recolhas de dados seriam realizadas nas três faixas horárias distintas que tipicamente caracterizam o período das 24 horas. Adicionalmente, reconhecendo a maior suscetibilidade a variações durante o Ld, optou-se por efetuar medições por duas vezes ao longo desta faixa. A seleção dos locais de medição, apresentados na Figura 9, foi ponderada, com o objetivo de abranger uma diversidade de contextos sonoros dentro do campus.

Foram identificados Pontos de Medição Externos (PE), estrategicamente situados em áreas reconhecidas pela sua maior exposição ao ruído proveniente do exterior. Estes pontos foram distribuídos por diversas localizações chave do campus. Entre os pontos externos, encontram-se locais como a entrada da Escola Superior Agrária, visando captar o ruído associado ao acesso ao campus e à movimentada Alameda de Santa Apolónia. Similarmente, a entrada da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) foi selecionada, devido ao intenso movimento de estudantes e veículos, também influenciado pela proximidade da Alameda.

Outros pontos externos incluíram a entrada da Escola Superior de Educação, procurando registar o ruído gerado pelas atividades escolares e pela influência da Alameda de Santa Apolónia. O final do IPB, na confluência com a Avenida Sá Carneiro, uma via de tráfego intenso, também foi um local de medição crucial, assim como uma área adjacente à Escola Superior de Educação, potencialmente sujeita a concentrações de atividades ruidosas na mesma avenida.

Ainda na Avenida Sá Carneiro, a área em frente ao McDonald's foi incluída no plano de medições externas, com o intuito de registar a combinação do ruído do tráfego com as atividades comerciais. A entrada da cantina, igualmente localizada na Avenida Sá Carneiro, foi mais um ponto de interesse para a avaliação do ruído. Em contraste, uma rua paralela à principal avenida, a Rua Dr. José Damasceno Campos, foi selecionada para permitir a comparação dos níveis de ruído em áreas adjacentes e menos diretamente expostas ao tráfego principal.

Adicionalmente aos pontos de medição externos, o planeamento contemplou a seleção estratégica de Pontos de Medição Internos (PI). Estes foram escolhidos com o objetivo específico de avaliar os níveis de ruído em áreas distintas dentro dos edifícios do campus, bem como em zonas mais isoladas. A análise destes pontos internos permitiria complementar a visão do ambiente sonoro externo, identificando possíveis fontes de ruído e a sua propagação para o interior das instalações do IPB.

A distribuição dos pontos internos abrangeu uma variedade de locais com diferentes características de utilização e potencial exposição ao ruído. Foram incluídas as entradas da cantina e da Escola Superior Agrária, ambas áreas com fluxo de veículos nas proximidades. Diversos pontos (PI3, PI4, PI6 e PI9) foram localizados no entorno da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG), em zonas também marcadas pelo movimento automóvel. O estacionamento da Escola Superior de Educação (PI5) foi outro local de medição interna relevante. Em contraste, pontos como PI7 e PI13, próximos à Agrária, e PI12, perto da Educação, foram selecionados por serem zonas de menor movimento e de acesso mais restrito. A proximidade da residência universitária e do rio (PI8), a zona adjacente à cantina e ao rio (PI10), uma área isolada com ruídos predominantemente externos (PI11), e a zona mais baixa do IPB, na região dos rios (PI14), completaram a seleção dos pontos de medição internos, visando uma avaliação abrangente da qualidade sonora em todo o campus.



Figura 10: Pontos de medição no IPB. (A) PI8, (B) PE4, (C) PI11, (D) PE7, (E) PI2, (F) PI1.

Além das medições sonoras gerais, planeadas para caracterizar o ambiente acústico do campus em diferentes locais e ao longo de distintas faixas horárias, foram realizadas medições adicionais especificamente para integrar a componente sonora do rio que atravessa a área de estudo no modelo acústico. A inclusão desta fonte foi considerada fundamental para uma representação completa e fidedigna da paisagem sonora do campus, dado que os sistemas lóticos constituem uma fonte de som natural.

As medições para capturar o som dos rios foram efetuadas utilizando a análise em oitava de banda, permitindo uma caracterização das frequências sonoras desta fonte específica. Este tipo de análise está em linha com a abordagem de avaliação acústica que recorre à análise de dados em bandas de frequência para uma compreensão detalhada das características do ruído. Embora a metodologia geral de tratamento de dados previsse a organização e análise por faixas horárias para fontes mais dinâmicas foram realizadas ao longo do dia. Dada a natureza considerada relativamente estável do som gerado pelos rios ao longo do tempo, as medições foram efetuadas em diversos pontos ao longo do curso de água na área de estudo, de forma a permitir a representação desta fonte como um segmento sonoro representativo no modelo.

Uma característica distintiva da integração desta fonte no modelo é que, considerando a estabilidade inerente do som dos rios e contrastando com fontes mais variáveis como o tráfego rodoviário, os mesmos dados sonoros foram utilizados para todos os períodos de avaliação simulados. Assim, a componente sonora dos rios foi representada no modelo sem variação horária, contribuindo de forma constante para os níveis de ruído simulados em cada período. Esta abordagem permitiu incorporar a influência dos rios na modelação acústica de uma forma que reflete a sua presença contínua e relativamente homogênea no ambiente sonoro do campus.

3.2.2 Instrumentação e Procedimentos de Medição

Para uma avaliação rigorosa do ruído ambiental, a seleção e a utilização de instrumentação adequada são etapas cruciais. No contexto da análise da qualidade sonora, é imperativo o emprego de sonómetros de Classe 1. Esta classificação assegura um elevado grau de precisão nas medições, requisito fundamental para estudos científicos e para a conformidade com as normas regulamentares. Para realizar medições de ruído ambiental, a configuração do sonómetro é um passo crucial para garantir a precisão dos dados. O sonómetro utilizado, modelo BK 2260, Figura 11, foi operado com a aplicação BZ7219 versão 1.1. Utilizou-se um tempo de medição de 10 minutos.

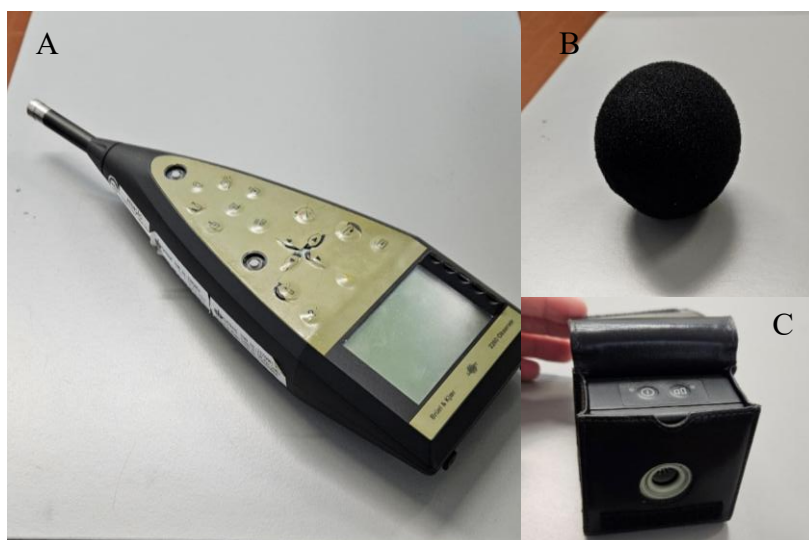


Figura 11: Sonómetro BK 2260 (A), protetor de vento de 90 mm (B), calibrador BK 4231 (C)

A análise do som foi efetuada em bandas de 1/3 de oitava, o que permite uma análise detalhada das frequências do ruído. O sonómetro foi configurado para detetar uma gama de medição variou entre 32,4 e 112,4 dB. O registo dos dados foi efetuado a uma taxa de 10 segundos, com todos os parâmetros de banda larga e de espectro registados.

Utilizou-se um tripé de 1,5m de altura para o posicionamento do equipamento durante as medições. O sinal de entrada foi obtido através de um microfone, e foi aplicada uma correção de protetor de vento de 90 mm. A correção de incidência sonora foi definida como "Frontal", indicando que o microfone foi orientado diretamente para a fonte sonora dominante.

Durante as campanhas de medição, diversos parâmetros acústicos são tipicamente avaliados para fornecer uma caracterização completa do ambiente sonoro. A obtenção de dados acústicos fiáveis exige a estrita observância de procedimentos normativos estabelecidos a nível internacional e nacional, como definidos na NP ISO 1996 e no RGR em Portugal.

A adoção destes procedimentos normativos garante a comparabilidade dos resultados entre diferentes estudos e a sua validade para efeitos legais e de planeamento. A correta instrumentação e a aplicação rigorosa das normas técnicas são, portanto, elementos essenciais para uma avaliação precisa do ambiente sonoro e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação da poluição sonora.

3.2.3 Tratamento e Análise dos Dados Experimentais

No tratamento e análise dos dados recolhidos, foi realizada uma comparação estatística detalhada dos níveis de ruído medidos antes e após a implementação de diferentes cenários. Inicialmente, os dados serão organizados pelas faixas horárias dos períodos de referência (Ld, Le, Ln e Lden) e de forma agregada para obter uma visão geral da situação acústica no campus do IPB. Para verificar a existência de tendências nos dados ao longo do tempo, serão construídas linhas de tendência tanto para as medições realizadas com tráfego automóvel irrestrito quanto para aquelas efetuadas após a restrição. Esta abordagem permitirá identificar se há alguma direção predominante na variação dos níveis sonoros em cada período analisado, garantindo que as conclusões não sejam influenciadas por flutuações isoladas.

Para o processamento e análise propriamente dita dos dados acústicos, será utilizado o software Excel. Esta ferramenta será fundamental para a organização das informações coletadas, a realização de cálculos estatísticos básicos e a geração de representações gráficas dos resultados. Através do Excel, será possível tabular os valores de pressão sonora medidos em diferentes pontos do campus e em diversos momentos, facilitando a comparação entre as situações antes e depois da medida de restrição de tráfego.

Um aspeto crucial desta etapa será o cálculo de indicadores que permitam quantificar a melhoria da qualidade sonora resultante da restrição do tráfego. Estes indicadores poderão incluir a variação média dos níveis de pressão sonora em diferentes zonas do campus, a redução percentual do ruído em horários específicos e a alteração na distribuição dos níveis de ruído ao longo do dia. Para tal serão analisadas diferentes áreas do campus, considerando os indicadores para todo o espaço que compõe o campus, e três áreas que correspondem ao entorno das escolas, com um buffer de 10, 25 e 50 metros, como representado na figura 12.

A análise destes indicadores fornecerá uma base objetiva para avaliar a eficácia da política de mobilidade sustentável implementada no campus. Para o cálculo dos indicadores acústicos nas áreas de buffer, foi utilizada a malha de pontos contendo os níveis de ruído, gerada pelo software *NoiseModelling*. Posteriormente, estes dados foram espacialmente recortados para incluir apenas os pontos localizados dentro da área de cada buffer, utilizando o software QGIS. Finalmente, os dados assim processados foram exportados para o Excel para a realização dos cálculos necessários para cada indicador dentro de cada área de *buffer*.

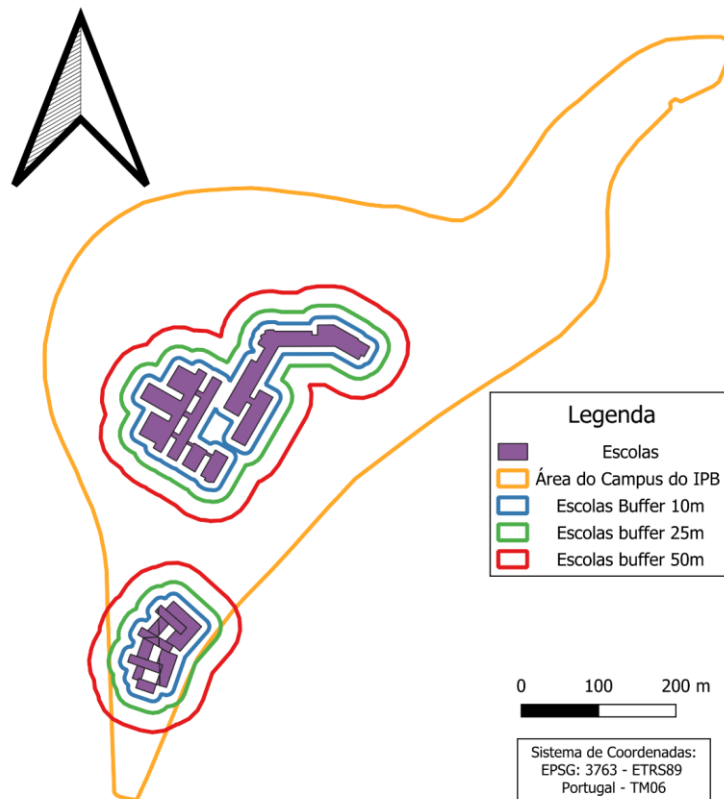


Figura 12: Áreas que serão consideradas para a análise dos indicadores de ruído.

A utilização do Excel para o tratamento dos dados envolveu a organização das medições em planilhas, a aplicação de fórmulas para o cálculo de médias, desvios padrões e outros parâmetros estatísticos relevantes, bem como a criação de gráficos que visualizem as diferenças nos níveis de ruído antes e depois da restrição. A capacidade do Excel de manipular grandes conjuntos de dados e gerar representações visuais facilitará a identificação de padrões e a comunicação clara dos resultados obtidos.

Finalmente, o cálculo dos indicadores de melhoria da qualidade sonora será realizado através da comparação direta dos parâmetros acústicos medidos nos cenários. A diferença entre os valores médios de LAeq, por exemplo, fornecerá uma medida direta da redução do ruído, a análise dos indicadores calculados oferecerá uma avaliação abrangente do impacto da restrição de tráfego na qualidade sonora do campus do IPB.

3.2.4 Construção e Validação do Modelo

Para a modelação acústica, foi selecionada a ferramenta de software *NoiseModelling*. Esta escolha recaiu sobre esta plataforma específica para realizar as simulações necessárias à avaliação do impacto sonoro no campus do IPB. A capacidade desta ferramenta em lidar com diversas fontes

de ruído, essencial para um ambiente complexo como um campus universitário, foi um fator determinante na sua seleção.

A justificação para a utilização do *NoiseModelling* prende-se com a acessibilidade da ferramenta, sendo uma opção de código aberto. Dada a conjuntura de não possuir acesso a um software comercial atualizado de elevado custo, a alternativa gratuita apresentou-se como a solução mais viável e adequada para a concretização do estudo. Apesar de poder apresentar limitações em comparação com soluções pagas, a flexibilidade e a possibilidade de personalização desta ferramenta de código aberto permitiram adaptá-la às necessidades específicas da análise acústica no contexto do campus.

Para a modelação no *NoiseModelling*, alguns dados de entrada são indispensáveis para a correta construção do modelo. É fundamental o fornecimento de dados geográficos que descrevam a área de interesse, como o layout físico, que inclui a rede de estradas, os edifícios, em duas dimensões, com a altura como atributo, e as áreas verdes, como parques e florestas, que são espaços com certa absorção sonora (Baclet et al., 2021, 2022).

Adicionalmente, o modelo requer informações sobre as fontes de ruído, nomeadamente a posição destas e o modelo de emissão de ruído associado. No caso do ruído rodoviário, é necessário detalhar o volume de tráfego nas vias (Baclet et al., 2022; López Baeza et al., 2021; Nourmohammadi et al., 2021).

Outro aspeto importante é a definição dos recetores, ou seja, os locais onde os níveis de ruído serão calculados. Estes recetores podem ser definidos de várias formas, como uma grelha regular de pontos ou pontos à volta dos edifícios, a uma dada distância das fachadas (Baclet et al., 2021, 2022).

O *NoiseModelling* utiliza o método CNOSSOS-EU para modelar a emissão e propagação do ruído, necessitando de parâmetros específicos relacionados com as características do tráfego, da área de estudo e das condições de propagação sonora (Baclet et al., 2021, 2022).

3.2.4.1 Construção do Modelo do Campus

O modelo acústico foi construído utilizando diversas camadas, apresentadas na Figura 13, de informação geográfica essenciais para uma representação fidedigna da área de estudo. Estas camadas incluem a de edificações, a de vias de circulação, a hidrografia e o Modelo Digital de Elevação (MDE).

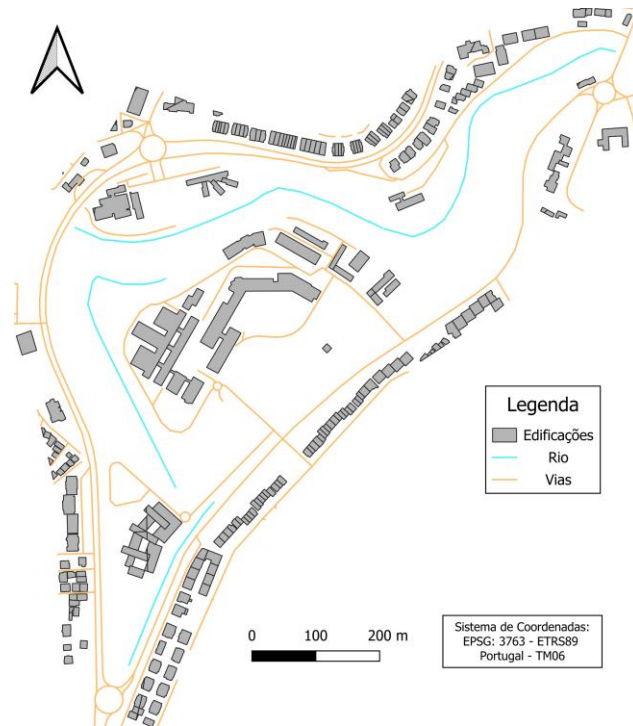


Figura 13: Camadas utilizadas na construção do cenário base do IPB.

Relativamente à camada de edificações, foram incorporados os polígonos representativos da planta dos edifícios, aos quais se adicionou a informação da altura de cada edificação. Na camada de vias, foram utilizados dados referentes à quantidade média de veículos. Consideraram-se distintas categorias de veículos, nomeadamente veículos ligeiros e veículos pesados médios, com informação detalhada por hora e por faixa horária. A velocidade média dos veículos é um parâmetro crucial para a modelação do ruído rodoviário através do método CNOSSOS-EU implementado no *NoiseModelling*. Contudo, devido à impossibilidade de realizar medições diretas de velocidade, foi utilizada a velocidade máxima permitida, em concordância com as Diretrizes para elaboração de mapas de ruído da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) de 2021.

Para a hidrografia, construiu-se uma camada correspondente aos cursos de água que circundam a área do campus. A respeito do MDE, Figura 14, derivado da base de dados *AW3D30 DSM data map* com uma resolução de 30 metros. O MDE é fundamental, pois o relevo com variações de declividade e altitude, desempenha um papel crucial na dispersão e reflexão do som.

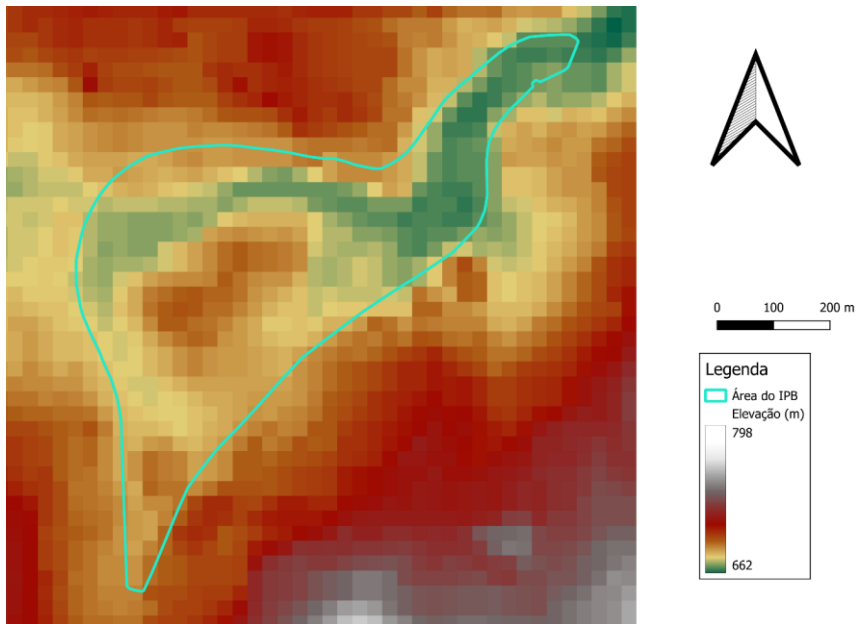


Figura 14: Modelo Digital de Elevação do Câmpus Santa Apolonia do Instituto Politécnico de Bragança do AW3D30 DSM data map.

Para o cenário de restrição do trânsito interno utilizou-se o projeto futuro do campi, com a construção de um novo estacionamento e via de transito, além da retirada das vias de trânsito interno, conforme a figura 15.

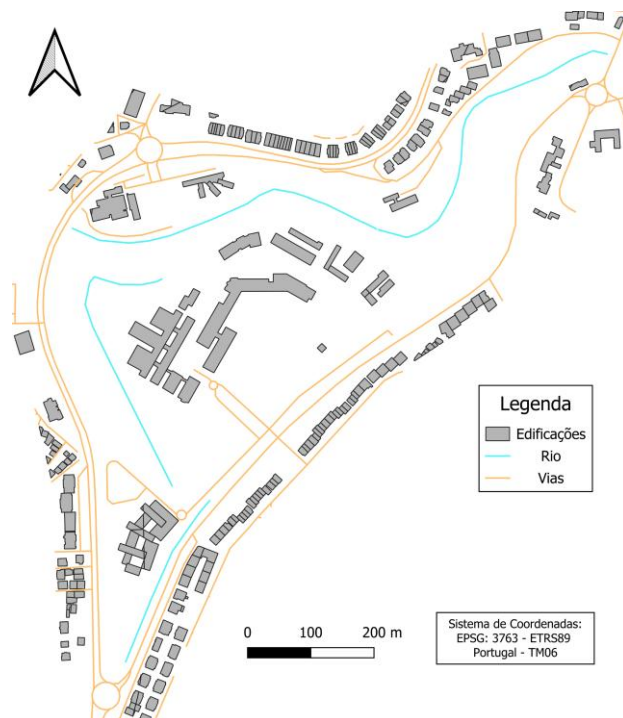


Figura 15: Camadas utilizadas na construção do cenário de restrição do IPB.

3.2.4.2 Limitações da Ferramenta

Na aplicação do *NoiseModelling* a ambientes complexos como campi universitários, algumas limitações inerentes à ferramenta podem impactar a fidedignidade e a eficiência das simulações de cenários de mitigação.

Uma das incapacidades identificadas no software reside na sua limitação em alterar a composição individual de uma parede ou fachada isolada. Esta característica impede a simulação pormenorizada de intervenções de controlo de ruído que dependem das propriedades acústicas específicas dos materiais construtivos, como a instalação de barreiras acústicas com diferentes graus de absorção ou reflexão. Em ambientes complexos, onde a otimização da qualidade sonora pode exigir a aplicação de soluções arquitetónicas e materiais específicos em pontos-chave, a impossibilidade de modelar estas nuances compromete a capacidade de gerar mapas de ruído realistas para cenários de mitigação avançados. Isto limita a precisão na avaliação do desempenho de soluções direcionadas e a otimização do conforto acústico em zonas críticas.

Adicionalmente, o software não facilita a união interna de diferentes tipologias de fontes de ruído. Para integrar dados provenientes de variadas é necessário que os dados sejam exportados, editados e processados externamente antes de serem reintroduzidos para a geração dos mapas acústicos. Este fluxo de trabalho fragmentado introduz uma ineficiência considerável no processo de modelagem, aumentando a complexidade operacional e o tempo necessário para a preparação de dados. Tal abordagem pode também elevar o risco de erros na manipulação externa dos conjuntos de dados, dificultando a análise holística e a avaliação integrada do impacto cumulativo de todas as fontes de ruído no ambiente do campus

3.2.4.2 Validação do Modelo do Campus

A etapa de validação do modelo acústico desenvolvido para o Campus do IPB foi conduzida através da análise comparativa com as medições sonoras realizadas nos 24 pontos previamente definidos. Este processo de validação teve como objetivo assegurar a fidedignidade do modelo computacional em representar as condições acústicas reais do campus, tomando como referência os dados coletados em diferentes localizações e ao longo de distintas faixas horárias. A consideração dos resultados para cada período do dia, manhã, tarde e noite, permitiu uma análise mais detalhada e sensível às variações temporais do ruído, garantindo que o modelo fosse capaz de capturar a dinâmica sonora do ambiente universitário em diferentes momentos.

Para verificar a eficácia e a precisão do modelo acústico na representação do ambiente sonoro do campus, foram construídas curvas utilizando o coeficiente de determinação (R^2). O R^2 é uma medida estatística que indica a proporção da variância nos dados medidos que é previsível a partir do modelo simulado. Desta forma, a análise dos valores de R^2 obtidos para cada faixa horária e para a totalidade dos dados permitiu quantificar o grau de ajuste entre os resultados da modelação acústica e as medições experimentais. Quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , maior será a correlação entre os dados simulados e os dados reais. Segundo Debnath e Singh (2018), valores de R^2 acima de 0,7 são considerados aceitáveis.

Outro indicador frequentemente utilizado para este fim é a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), que quantifica a diferença entre os valores de níveis sonoros previstos pelo modelo e os valores medidos experimentalmente. Essencialmente, o RMSE é uma medida da magnitude dos erros entre os valores previstos (ou medidos) e os valores observados (ou de referência), sendo calculado como a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre esses valores. A sua formulação pode ser expressa de acordo com a fórmula 7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Laeqmed - Laeqmod)^2} \quad (7)$$

Nesta fórmula, *Laeqmed* representa o valor observado ou real da grandeza em questão, no caso o nível sonoro medido, *Laeqmod* é o valor previsto pelo modelo e *n* corresponde ao número total de observações. A inclusão do quadrado das diferenças antes de se calcular a média confere maior peso aos erros maiores, tornando o RMSE particularmente sensível a desvios significativos.

O valor aceito para a RMSE em modelos de ruído não possui uma regra fixa na literatura, dependendo dos objetivos do estudo, das condições de coleta e dos tipos de dados utilizados. No entanto, existem recomendações variadas: para fins de mapeamento estratégico de ruído, Kephalopoulos et al. (2014) sugerem que o erro crítico não exceda 2 dB. A Comissão Europeia, ao avaliar a exposição ao ruído, admite uma acurácia de 4 dB(A) quando não são realizadas medições, mas são utilizados dados oficiais de fluxo de tráfego para vias típicas. Alguns estudos brasileiros, por sua vez, aceitam erros de até 4,6 dB(A) (Peixoto, 2020). Em certas calibrações de modelos, o objetivo é que a diferença esteja dentro de ± 2 dB(A), e um valor crítico de 3 dB é por vezes considerado aceitável para Mapas Estratégicos de Ruído, dada a complexidade dos atributos que influenciam a emissão e propagação sonora (Ventura, 2008).

3.3 Cenários Simulados

A partir do cenário base utilizou-se a mudança de alguns parâmetros de modo a analisar a influência nos níveis interno de ruído no campi, como indicado na Tabela 3.

Tabela 3: Cenários simulados para o campi Santa Apolónia do IPB.

Tipologia	Cenário	Descrição
Restrição de Acesso	Cenário 1	Restrição do tráfego interno ao campus.
Limitação de Velocidade	Cenário 2	Redução da velocidade máxima para 40 km/h nas vias do entorno do campus.
	Cenário 3	Restrição do tráfego interno + redução de velocidade máxima para 40 km/h.
	Cenário 4	Redução da velocidade máxima para 30 km/h nas vias do entorno do campus.
	Cenário 5	Restrição do tráfego interno + redução de velocidade máxima para 30 km/h.
Alteração de Pavimento	Cenário 6	Aplicação de asfalto poroso de duas camadas nas vias externas ao campus.
	Cenário 7	Restrição do tráfego interno + asfalto poroso de duas camadas nas vias do entorno.
Redução de Fluxo Rodoviário	Cenário 8	Redução de 20% no tráfego de veículos rápidos leves por medidas de mobilidade urbana.
	Cenário 9	Restrição do tráfego interno + redução de 20% nos veículos rápidos leves.
Cenários Combinados	Cenário 10	Redução para 40 km/h + pavimento poroso + redução de 20% no fluxo de veículos rápidos.
	Cenário 11	Redução para 40 km/h + pavimento poroso + redução de 20% no fluxo de veículos rápidos.
	Cenário 12	Redução para 30 km/h + pavimento poroso + redução de 20% no fluxo de veículos rápidos.
	Cenário 13	Redução para 30 km/h + pavimento poroso + redução de 20% no fluxo de veículos rápidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo quatro da dissertação é dedicado à apresentação dos principais resultados da investigação. Inclui os resultados da modelação acústica, nomeadamente mapas de ruído simulados para a situação atual e cenários futuros, de modo a podermos compreender a magnitude do problema da poluição sonora no campus e identificar as suas origens, servindo de ponto de partida para identificar e avaliar o impacto das medidas de mitigação propostas.

4.1 Validação do Modelo

A validação do modelo acústico desenvolvido para o Campus do Instituto Politécnico de Bragança (IPB) constitui uma etapa fundamental para garantir a sua fidedignidade na representação das condições acústicas reais do campus. Este processo crucial, detalhado no início deste capítulo, envolveu uma análise comparativa rigorosa entre os dados simulados e as medições sonoras experimentais realizadas em 24 pontos específicos do campus, abrangendo os períodos Ld, Le e Ln, bem como o indicador global Lden. Através da aplicação de indicadores estatísticos como R^2 e a RMSE, procurou-se quantificar a precisão do modelo em reproduzir a dinâmica sonora do ambiente universitário, estabelecendo-o como uma base fiável para a avaliação de cenários futuros de mitigação de ruído. Na Figura 16 é apresentado os resultados para o coeficiente de determinação.

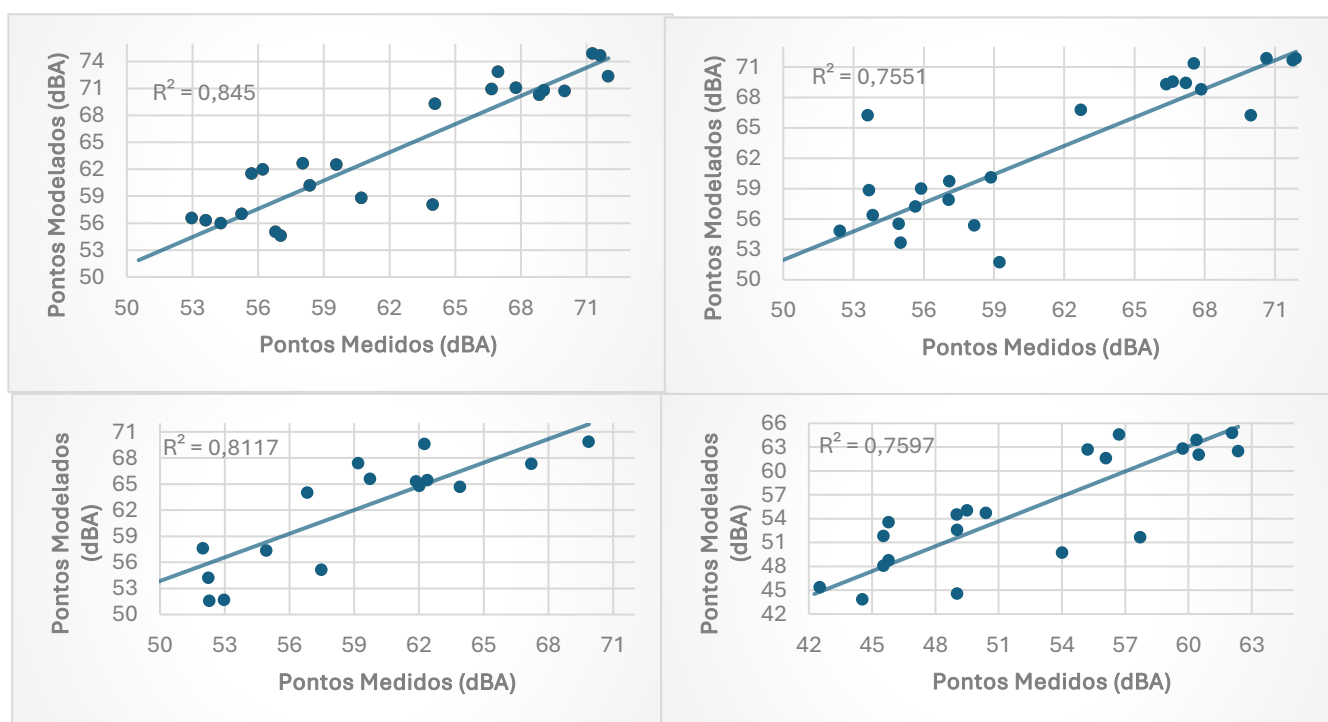


Figura 16: Linha de tendência e R^2 para o Lden (A), Linha de tendência e R^2 para o Ld (B), Linha de tendência e R^2 para o Le (C), Linha de tendência e R^2 para o Ln (D).

A análise dos resultados apresentados na Figura 15 revela que existe correlação entre os dados medidos e os valores simulados pelo modelo acústico para os diferentes períodos de avaliação. O R^2 , que quantifica a proporção da variância nos dados observados que é explicada pelo modelo, apresenta valores de 0,8450 para o indicador Lden, 0,7551 para o período Ld, 0,8117 para o período do Le e 0,7597 para o período Ln. Estes valores sugerem que o modelo desenvolvido demonstra uma capacidade considerável para reproduzir as condições acústicas reais, capturando de forma eficaz a variabilidade dos níveis de ruído ao longo do dia e no indicador global Lden.

A obtenção de valores de R^2 consistentemente acima de 0,75 para todos os períodos analisados, e particularmente o valor de 0,8450 para o Lden, indica um bom ajuste do modelo aos dados experimentais. Em detalhe, o valor de R^2 de 0,8450 para o Lden demonstra que o modelo explica aproximadamente 84,5% da variância nos dados medidos do indicador global de ruído. Nos períodos específicos, o período Ld apresenta um R^2 de 0,7551, o Le de 0,8117 e o Ln de 0,7597, indicando que, em cada um destes períodos, o modelo consegue explicar cerca de 75,5%, 81,2% e 76% da variabilidade dos níveis sonoros respetivamente. Esta consistência nos valores de R^2 ao longo dos diferentes períodos do dia sublinha a capacidade do modelo em capturar a dinâmica sonora do ambiente do campus de forma abrangente e fiável.

Ao analisar os resultados da validação apresentados, observam-se valores de RMSE distintos consoante o período em avaliação, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Raiz quadrada do erro médio dos valores modelados e medidos.

Período	RMSE (dB(A))
Ld	3,9
Le	4,6
Ln	4,8
Lden	3,5

Ao analisar os resultados da validação apresentados, observam-se valores de RMSE distintos consoante o período em avaliação. Para o período Ld, o RMSE foi de aproximadamente 3,9 dB(A), para o Le foi de cerca de 4,6 dB(A), e para o Ln, aproximadamente 4,8 dB(A). Estes valores indicam a magnitude média dos erros entre a modelação e as medições experimentais em cada um destes períodos específicos.

Comparando estes valores com referências de aceitabilidade mencionadas na literatura, verifica-se que estão acima do erro crítico de 2 dB(A) recomendado por alguns autores para mapas estratégicos de ruído. Considerando os resultados obtidos, embora os valores estejam acima do erro crítico de 2 dB para fins de mapeamento estratégico de ruído, ele se situam abaixo da margem de erro de 4,6 dB(A), em quase todos os períodos analisados, exceto do Ln. Adicionalmente, os resultados para o Ld e o Lden resultado está abaixo da exatidão de 4 dB(A), que é admitida pela Comissão Europeia. Apesar de não atingirem o limite mais rigoroso de 2 dB, o facto de o modelo explicar uma percentagem significativa da variabilidade dos níveis sonoros (entre 75,5% e 84,5%) sugere uma boa adequação quantitativa global

Curiosamente, o valor de RMSE mais baixo é observado para o indicador Lden, que resume a exposição sonora ao longo das 24 horas, sendo de aproximadamente 3,5 dB. Este resultado sugere que o modelo pode ter um desempenho ligeiramente melhor na previsão de indicadores de longa duração do que nos níveis médios de ruído em períodos mais curtos. A análise detalhada destes erros e das suas distribuições é essencial para compreender as limitações e os pontos fortes do modelo desenvolvido.

Considerando os resultados obtidos para o R^2 e o RMSE, a validação confirma boa precisão do modelo acústico desenvolvido. Apesar dos erros observados, especialmente nos períodos diários individuais, a boa adequação quantitativa global estabelece o modelo como uma base fiável para a avaliação de cenários futuros, como a implementação de medidas de restrição de tráfego.

4.2 Mapas de Ruído Gerados por Cenário

Esta secção tem como objetivo apresentar os mapas de ruído gerados pela modelação acústica para cada um dos cenários simulados no Campus do IPB. Estes mapas são representações visuais detalhadas dos níveis de ruído para os diferentes períodos de avaliação, incluindo o Ld, Le, Ln e o indicador Lden.

4.2.1 Situação Atual (Cenário de Base)

O cenário base representa o panorama geral atual do campus sem alterações, sendo utilizado como referência para comparações e para a construção do modelo acústico. Neste cenário, os níveis de ruído não estão a cumprir os limites exigidos pela legislação. Na Figura 17 é apresentado o mapa de ruído do campus para os diferentes períodos de análise.

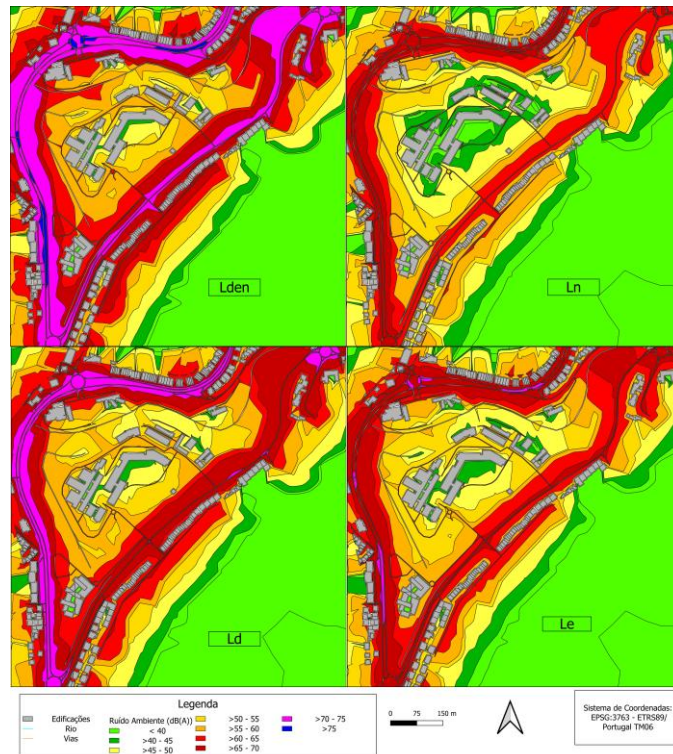


Figura 17: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário base representando os períodos de avaliação.

4.2.2 Cenário de Restrição de Trânsito Interno

O Cenário 1 simula a restrição do tráfego interno de automóveis no campus do IPB, como parte de um projeto futuro que inclui a instalação de um novo estacionamento em frente à ESA e a restrição de trânsito nas vias internas. Este cenário é comparado com o Cenário Base para avaliar o impacto dessa medida na qualidade sonora do campus.

Visualmente, o mapa de ruído do Cenário 1, apresentado na Figura 18, reflete a redução de ruído no núcleo interno do campus áreas em cores mais claras em comparação com o mapa do Cenário Base, mas pode mostrar a persistência ou mesmo intensificação de ruído nas áreas periféricas abrangidas pelo buffer de 50m, consistentes com o aumento observado na tabela.

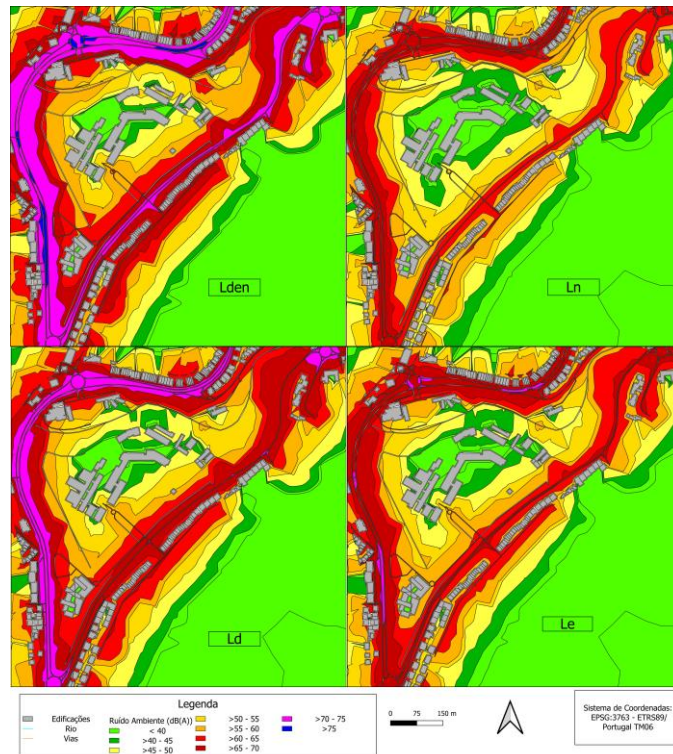


Figura 18: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da restrição de trânsito interno representando os períodos de avaliação.

4.2.3 Cenários de Limitação de Velocidade

O Cenário 2 propõe a redução da velocidade máxima permitida para 40 km/h nas vias do entorno do Campus de Santa Apolónia do IPB, como uma medida potencial para mitigar a poluição sonora gerada pelo tráfego rodoviário externo.

Visualmente, o mapa de ruído gerado para o cenário, apresentado na Figura 19, reflete estes resultados. O mapa ilustra uma distribuição espacial dos níveis sonoros, mostrando as áreas com maior e menor impacto da redução de velocidade, consistentes com os valores apresentados na Tabela 6, em que se pode observar visualmente menores manchas vermelhas e sem a presença de manchas azuis, que representam ruído acima de 75dB(A).

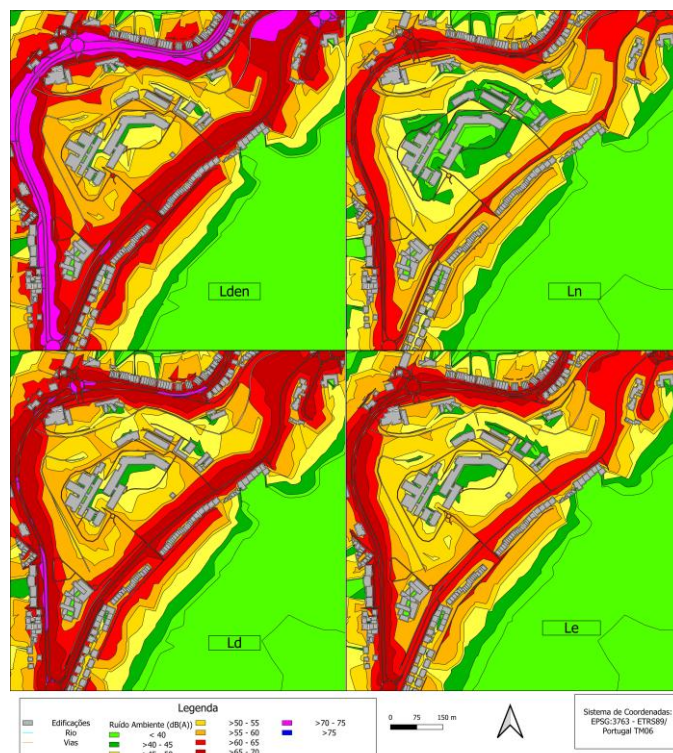


Figura 19: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do transito externo para 40km/h representando os períodos de avaliação.]

O Cenário 3 representa uma abordagem combinada de mitigação, unindo a restrição do tráfego interno no campus (conforme simulado no Cenário 1) com a redução da velocidade máxima permitida para 40 km/h nas vias do entorno (conforme simulado no Cenário 2). Esta combinação visa abordar tanto as fontes de ruído internas quanto as externas, que foram identificadas como significativas. O objetivo é avaliar se a ação conjunta destas medidas é mais eficaz na redução dos níveis de ruído e na obtenção de conformidade com a legislação para zonas sensíveis.

Na Figura 20 é possível observar a redução geral do ruído no campus, que atinge o limite de Lden no buffer de 10m indica que as áreas imediatamente circundantes às escolas mostrariam uma melhoria significativa, refletida por uma redução nas áreas mais vermelhas dos mapas e o aumento de áreas verdes.

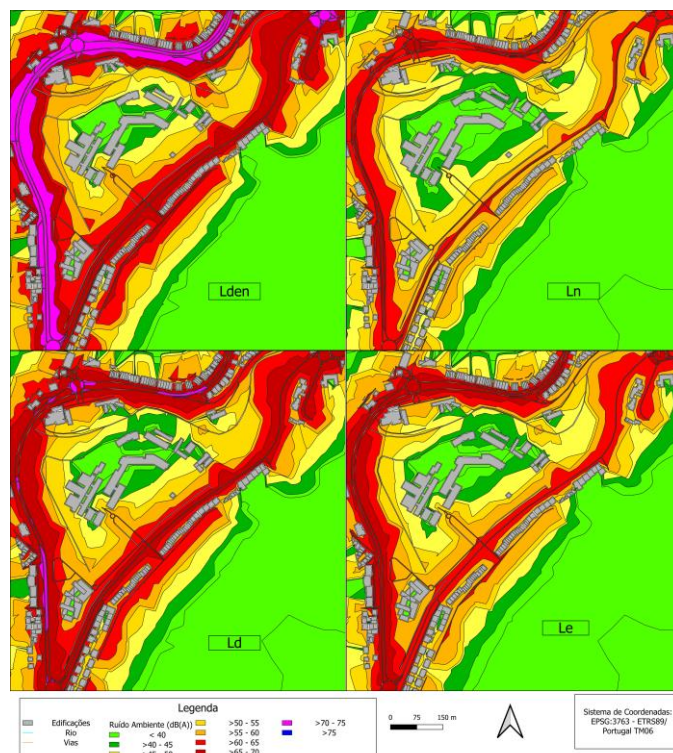


Figura 20: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do transito externo para 40km/h com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.

O Cenário 4 propõe uma medida focada exclusivamente na redução da velocidade máxima permitida para 30 km/h nas vias do entorno do Campus do IPB. Esta estratégia visa mitigar o ruído gerado pelo tráfego rodoviário externo, que já foi identificado como uma fonte significativa de ruído que afeta o campus.

O mapa, apresentado na Figura 21, mostra uma redução generalizada dos níveis de ruído, visível na diminuição das áreas por manchas rosas e vermelhas, especialmente ao longo das vias de contorno do campus, como a Avenida Sá Carneiro e a Alameda de Santa Apolónia e também um crescimento nas manchas verdes, principalmente no período Ln.

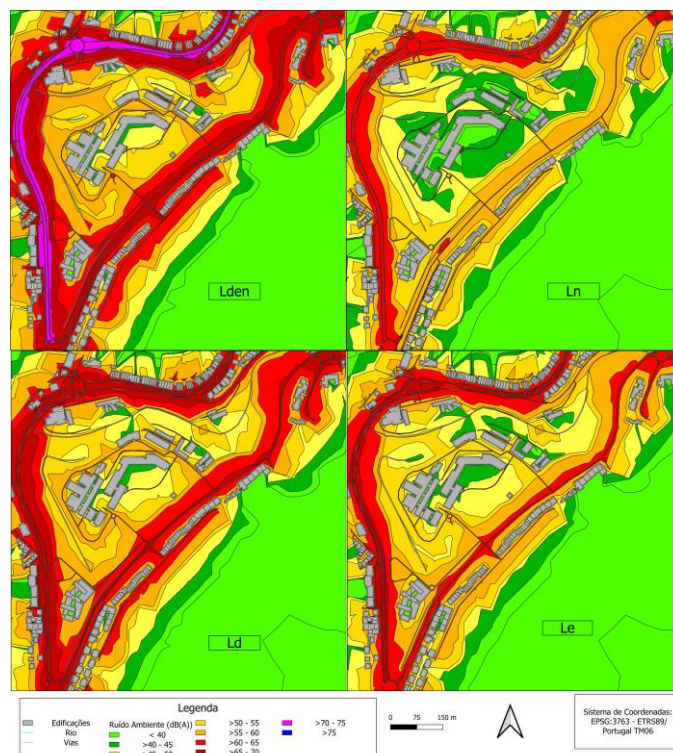


Figura 21: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do transito externo para 30km/h representando os períodos de avaliação.

Procedendo a uma análise dos resultados do Cenário 5 que examina o impacto combinado da redução do limite de velocidade para 30 km/h nas vias que ladeiam o Campus de Santa Apolónia do IPB com a restrição do tráfego automóvel interno no campus.

Visualmente, a Figura 22, que representa o mapa de ruído para o Cenário 5, mostra uma redução generalizada dos níveis de ruído em todo o campus, mas com maior destaque nas áreas próximas às escolas e ao longo das vias externas onde a velocidade foi reduzida, em comparação com o Cenário Base. O facto de o Lden no Buffer de 10m atingir 54 dB(A) é demonstrado pelo facto de que o entorno das escolas está com cores mais laranjas, amarelas e verdes, demonstrando graficamente a eficácia desta combinação de medidas na zona de maior prioridade para o indicador Lden. Contudo, a não conformidade legal para o L_n é visualizada apesar da grande mancha verde no entorno da ESA e ESTiG, porém prejudicada pelas manchas amarelas no entorno da ESA.

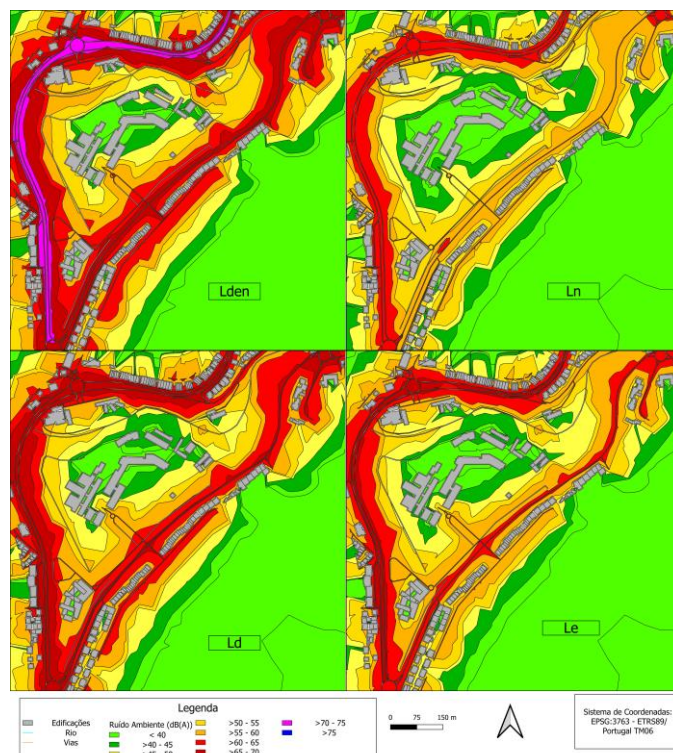


Figura 22: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução da velocidade máxima do transito externo para 30km/h com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.

4.2.4 Cenários de Alterações de Pavimento

Procedendo para o Cenário 6 que se foca na implementação de uma medida de mitigação isolada: a mudança do pavimento nas vias externas circundantes ao Campus do IPB para asfalto poroso de duas camadas. Esta abordagem visa especificamente reduzir o ruído gerado pela interação pneu-pavimento, uma componente significativa do ruído do tráfego rodoviário.

A Figura 23, ilustra graficamente a redução generalizada dos níveis de ruído. Dada a conformidade alcançada no buffer de 10m para ambos os indicadores e a conformidade de Lden no buffer de 25m, o mapa exhibe áreas em torno das escolas com cores mais verdes e amarelas, contrastando fortemente com os mapas do Cenário Base e do Cenário 1. No entanto, a persistência de níveis de ruído acima dos limites no campus total e no buffer de 50m é verificada pela persistência de zonas que pendem mais para o vermelho e pequenas manchas rosas, particularmente nas áreas mais distantes das escolas e mais próximas das vias externas.

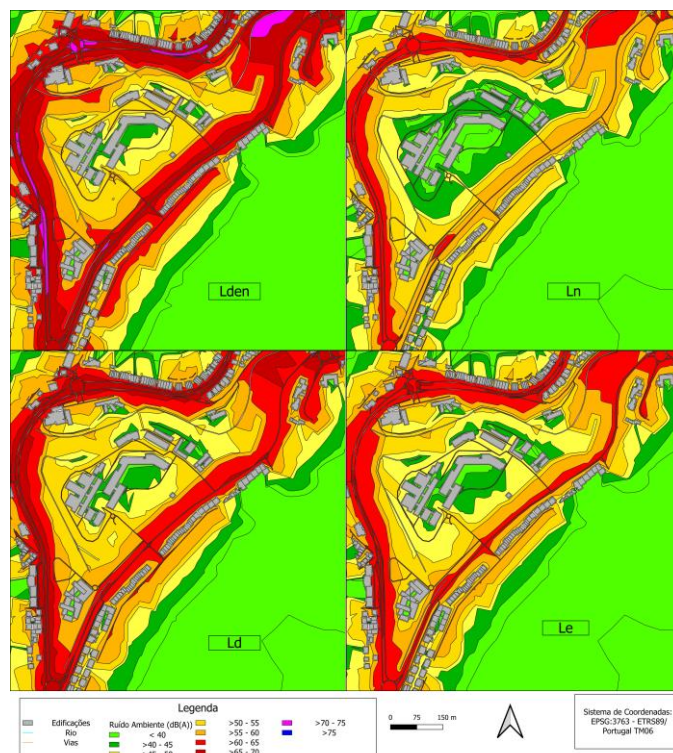


Figura 23: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software *NoiseModelling* para o cenário mudança de pavimento nas vias externas para asfalto poroso de duas camadas representando os períodos de avaliação.

Procedendo para o Cenário 7 que combina duas abordagens: a mudança do pavimento nas vias externas circundantes ao Campus de Santa Apolónia do IPB para asfalto poroso de duas camadas e a restrição do tráfego interno no campus. O objetivo desta combinação é avaliar se a ação conjunta destas medidas é mais eficaz na redução dos níveis de ruído do que quando aplicadas isoladamente e se consegue alcançar a conformidade com a legislação para zonas sensíveis, como é o caso de campi universitários.

Ao visualizar o mapa de ruído apresentado na Figura 24, observa-se uma representação visual das melhorias quantificadas. Dada a conformidade alcançada para ambos os indicadores no buffer de 10m, as áreas imediatamente circundantes às escolas estão predominantemente representadas por cores verdes e amarelas, indicando níveis sonoros baixos. Esta imagem contrasta fortemente com os mapas do Cenário Base e do Cenário 1, onde as áreas em torno das escolas estão marcadas por cores vermelhas e laranjas, denotando níveis de ruído significativamente acima dos limites.

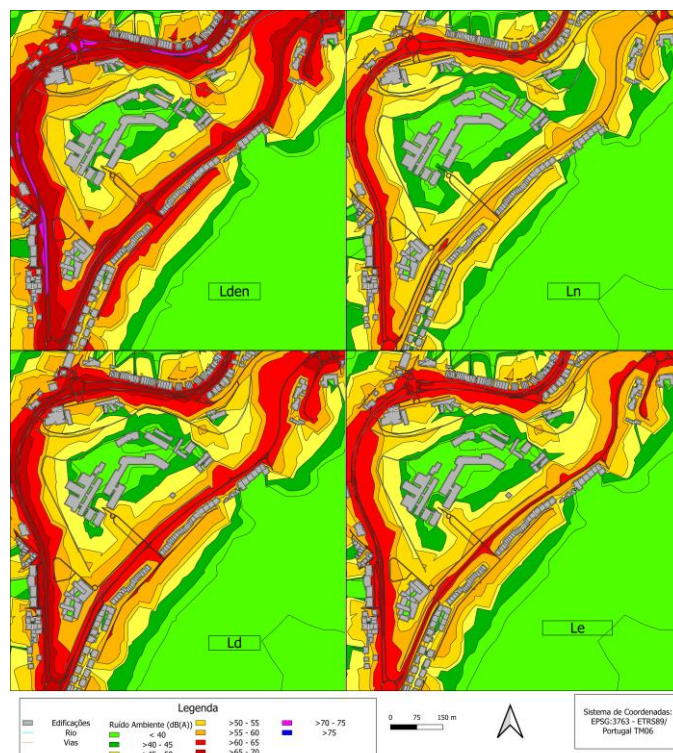


Figura 24: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário mudança de pavimento nas vias externas para asfalto poroso de duas camadas com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.

4.2.5 Cenários de Redução do Fluxo de Tráfego

Procedendo o Cenário 8 que propõe uma medida de mitigação centrada exclusivamente na redução de 20% no fluxo de veículos nas vias externas que circundam o Campus IPB. A intenção desta simulação é quantificar o impacto da diminuição do volume de tráfego rodoviário externo, uma fonte de ruído significativa para o campus, nos níveis sonoros, avaliando se uma redução moderada no fluxo externo pode contribuir para a melhoria da qualidade acústica, especialmente em áreas sensíveis como o entorno das escolas.

Ao visualizar o mapa de ruído apresentado na Figura 25 observa-se um mapa visualmente muito semelhante ao do Cenário Base. Dada a falta de redução significativa nos níveis de ruído em todas as áreas analisadas, as áreas circundantes ao campus e os buffers em torno das escolas estariam ainda predominantemente representados por cores vermelhas e laranjas, indicando níveis sonoros acima dos limites legais e pouca alteração em relação à situação atual. O mapa não exibe muitas manchas azuis, acima de 75 dB(A), como observadas no Cenário Base, indicando que picos de ruído extremo foram evitados, mas a redução geral do ruído médio seria mínima, com as cores predominantes refletindo a persistência de níveis elevados.

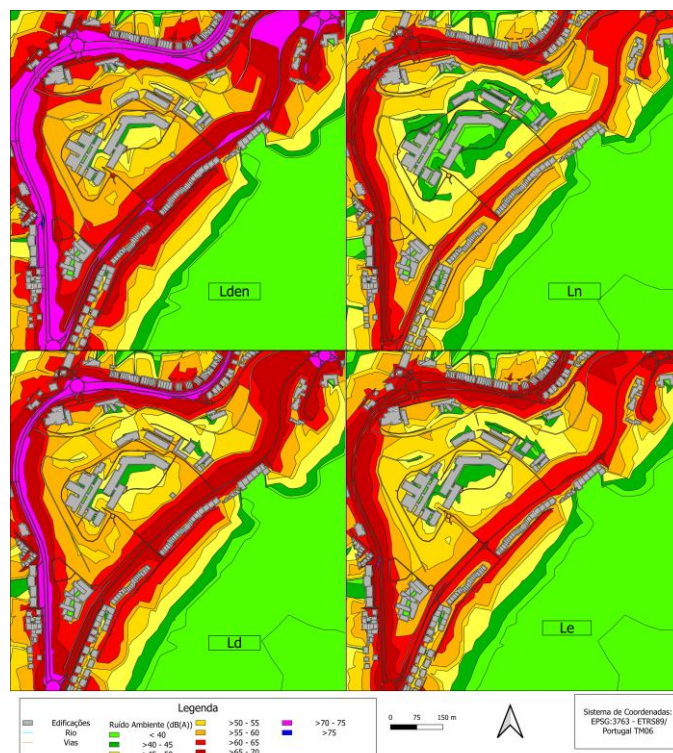


Figura 25: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software *NoiseModelling* para o cenário da redução do fluxo trânsito externo em 20% representando os períodos de avaliação.

Procedendo para o Cenário 9 que representa uma abordagem combinada, simulando simultaneamente a redução de 20% no fluxo de veículos nas vias externas que ladeiam o Campus do IPB e a restrição do tráfego interno. A intenção é avaliar o efeito sinérgico destas duas medidas isoladas, a restrição interna e a redução moderada do fluxo externo, na melhoria da qualidade sonora do campus.

Ao visualizar o mapa de ruído apresentado na Figura 26 observa-se um mapa visualmente muito semelhante ao do Cenário 1. Dada a falta de redução significativa nos níveis de ruído em todas as áreas analisadas, as áreas circundantes ao campus e os buffers em torno das escolas estariam ainda predominantemente representados por cores vermelhas e laranjas, indicando níveis sonoros acima dos limites legais e pouca alteração em relação à situação atual. O mapa não exhibe muitas das manchas azuis observadas no Cenário Base em algumas áreas, indicando que picos de ruído extremo foram evitados, mas a redução geral do ruído médio é mínima, com as cores predominantes refletindo a persistência de níveis elevados.

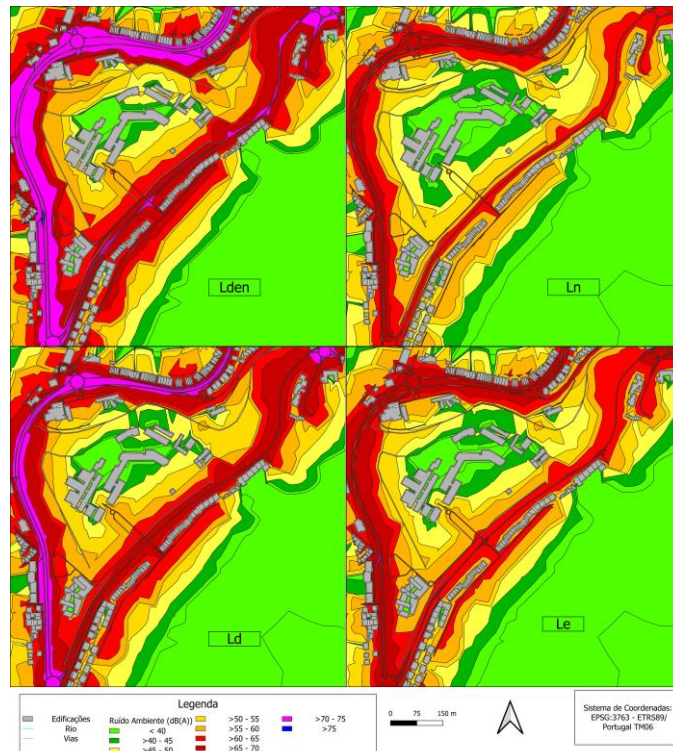


Figura 26: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da redução do fluxo de transito externo em 20% com a restrição do trânsito interno representando os períodos de avaliação.

4.2.6 Cenários Combinados

O Cenário 10 foi configurado como um cenário combinado aplica simultaneamente a redução da velocidade máxima permitida para 40 km/h nas vias externas, a mudança do pavimento dessas mesmas vias para asfalto poroso de duas camadas e a redução do fluxo de trânsito externo em 20%. Esta combinação de medidas visa abordar as três principais variáveis relacionadas com o ruído de tráfego rodoviário externo: velocidade, tipo de pavimento e volume de tráfego.

No mapa de ruído apresentado na Figura 27, a sua representação visual reflete as melhorias quantificadas nos resultados da tabela. Se vê uma transformação significativa nas áreas dos buffers de 10m e 25m em comparação com os mapas do Cenário Base. Nessas áreas mais sensíveis, onde a conformidade legal é alcançada para Lden e L_n, o mapa mostra uma clara predominância de cores verdes e amarelas, indicando que os níveis de ruído foram efetivamente reduzidos para ou abaixo dos limites aceitáveis para ambientes académicos. Esta seria uma mudança drástica e positiva face aos mapas do Cenário Base, onde estas mesmas áreas apresentavam extensas manchas de cores laranjas e vermelhas, refletindo níveis de ruído muito acima dos limites legais.

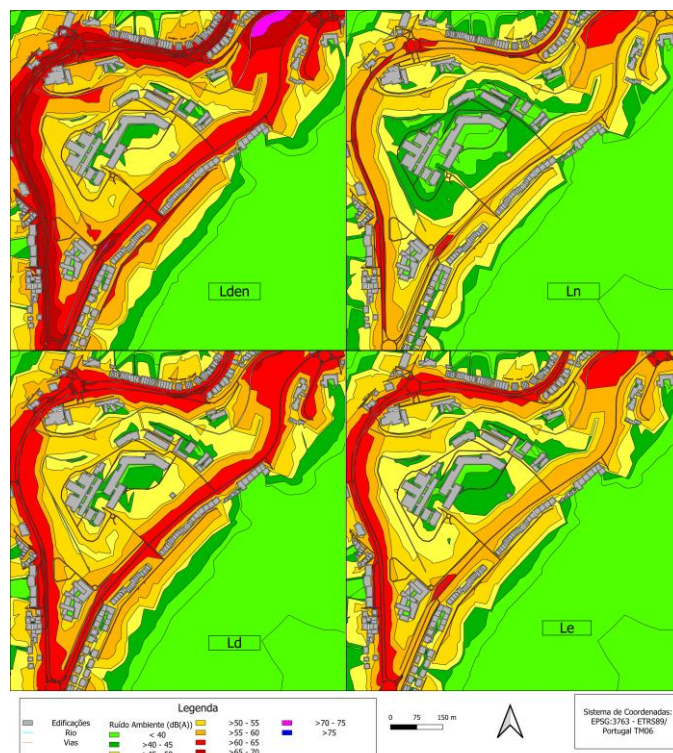


Figura 27: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 40km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, e com redução do fluxo de transito externo em 20% representando os períodos de avaliação.

Contudo, dado que a área total do campus e o Buffer de 50m permanecem acima dos limites legais para ambos os indicadores, o mapa ainda contém áreas representadas por cores laranjas e vermelhas, particularmente nas zonas mais distantes das escolas e mais próximas das vias externas de contorno do campus. A presença dessas cores indica que, embora o impacto nas áreas mais sensíveis tenha sido minimizado, o problema do ruído persiste em outras partes do campus, especialmente aquelas sob maior influência direta do tráfego externo, tal como discutido na análise de cenários anteriores.

Procedendo para o Cenário 11 que propõe uma abordagem de mitigação que combina a redução da velocidade máxima permitida para 40 km/h nas vias externas que circundam o campus com a restrição do tráfego automóvel interno. O objetivo central é avaliar o impacto sinérgico destas duas medidas nos níveis de ruído, especialmente nas áreas mais sensíveis como o entorno das escolas.

Ao visualizar o mapa de ruído apresentado na Figura 28, observa-se uma transformação significativa nas áreas dos buffers de 10m e 25m em comparação com os mapas do Cenário Base e Cenário 1. Nessas áreas mais sensíveis, onde a conformidade legal é alcançada para Lden e L_n , o mapa mostra uma clara predominância de cores verdes e amarelas, indicando que os níveis de

ruído foram efetivamente reduzidos para ou abaixo dos limites aceitáveis para ambientes académicos. Esta é uma mudança drástica e positiva face aos mapas do Cenário Base e Cenário 1, onde estas mesmas áreas apresentavam extensas manchas de cores laranjas e vermelhas, refletindo níveis de ruído muito acima dos limites legais. Contudo, dado que a área total do campus e o Buffer de 50m permanecem acima dos limites legais para ambos os indicadores, o mapa ainda contém áreas representadas por cores laranjas, particularmente nas zonas mais distantes das escolas e mais próximas das vias externas de contorno do campus. A presença dessas cores indica que, embora o impacto nas áreas mais sensíveis tenha sido minimizado, o problema do ruído persiste em outras partes do campus, especialmente aquelas sob maior influência direta do tráfego externo.

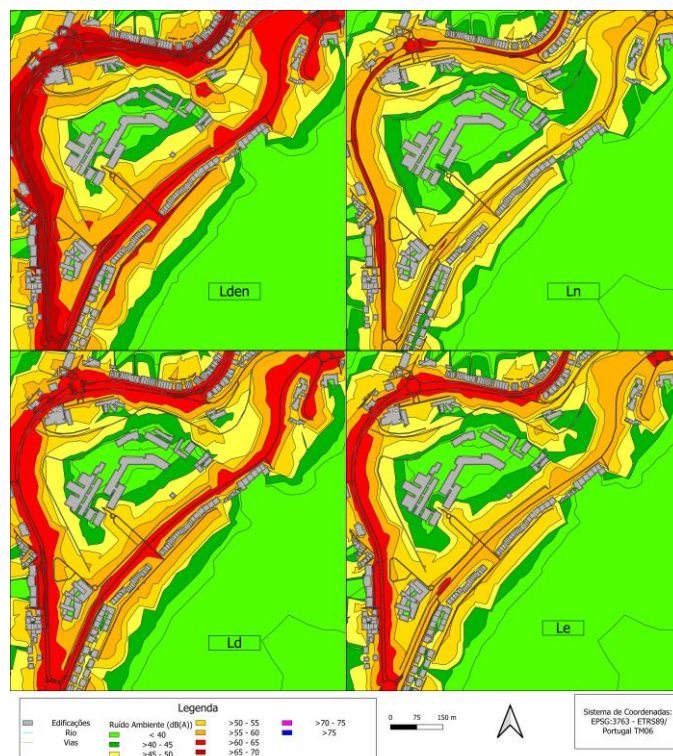


Figura 28: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 40km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, com redução do fluxo de transito externo em 20% e com restrição de transito interno representando os períodos de avaliação.

Prosseguindo para o Cenário 12 que propõe uma combinação de medidas externas que visam reduzir o ruído na fonte: a mudança da velocidade máxima permitida para 30 km/h nas vias externas que circundam o campus, a alteração do pavimento dessas vias para asfalto poroso de duas camadas, e uma redução de 20% no fluxo de tráfego externo. O objetivo é avaliar o impacto sinérgico destas intervenções no ambiente sonoro do campus do IPB, com especial atenção para as áreas mais sensíveis, como o entorno das escolas.

Ao visualizar o mapa de ruído apresentado na Figura 29, observa-se uma transformação significativa nas áreas dos buffers de 10m e 25m em comparação com os mapas do Cenário Base. Nessas áreas mais sensíveis, onde a conformidade legal é alcançada para L_{den} e L_n , o mapa mostra uma clara predominância de cores verdes e amarelas, indicando que os níveis de ruído foram efetivamente reduzidos para ou abaixo dos limites aceitáveis para ambientes académicos. Esta é uma mudança drástica e positiva face aos mapas do Cenário Base e Cenário 1, onde estas mesmas áreas apresentavam extensas manchas de cores laranjas e vermelhas, refletindo níveis de ruído muito acima dos limites legais.

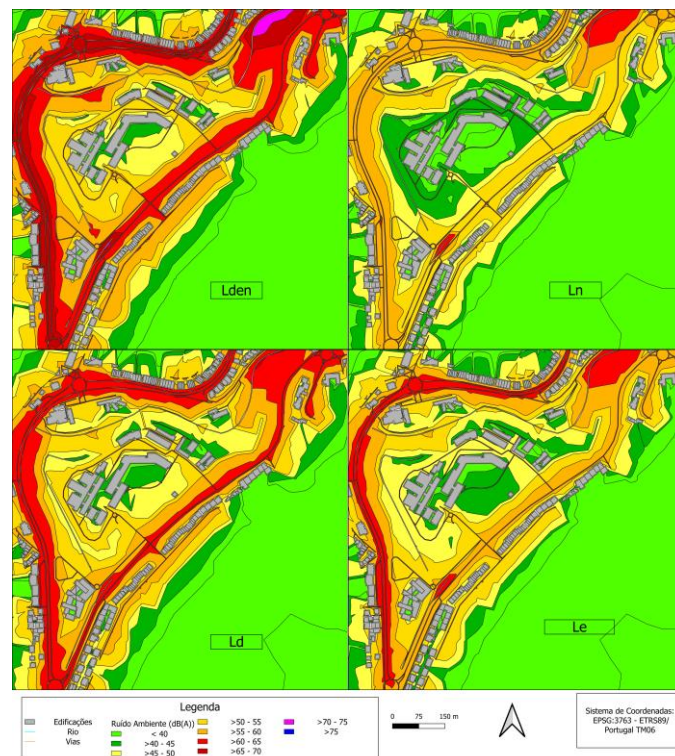


Figura 29: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 30km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, e com redução do fluxo de trânsito externo em 20% representando os períodos de avaliação.

Contudo, dado que a área total do campus e o Buffer de 50m permanecem acima dos limites legais para ambos os indicadores, o mapa ainda contém áreas representadas por cores laranjas e algumas áreas vermelhas nas zonas de maior influência do tráfego externo. A presença dessas cores indica que, embora o impacto nas áreas mais sensíveis tenha sido minimizado, o problema do ruído persiste em outras partes do campus, especialmente aquelas sob maior influência direta do tráfego externo e onde os valores de L_{den} e L_n ainda excedem os limites.

Prosseguindo com a análise do Cenário 13 que propõe uma combinação de medidas externas que visam reduzir o ruído na fonte: a mudança da velocidade máxima permitida para 30

km/h nas vias externas que circundam o campus, a alteração do pavimento dessas vias para asfalto poroso de duas camadas, e uma redução de 20% no fluxo de tráfego externo com a restrição do tráfego automóvel interno. O objetivo é avaliar o impacto sinérgico destas intervenções no ambiente sonoro do campus do IPB, com especial atenção para as áreas mais sensíveis, como o entorno das escolas.

O mapa de ruído apresentado na Figura 30 mostra a drástica melhoria nos buffers mais próximos das escolas e a conformidade legal alcançada no Buffer 10m e 25m para ambos os indicadores, veríamos uma transformação visual notável em comparação com os mapas do Cenário Base. As áreas correspondentes aos buffers de 10m e 25m mostrariam uma clara predominância de cores verdes e amarelas, que indicam níveis sonoros mais baixos e dentro dos limites legais

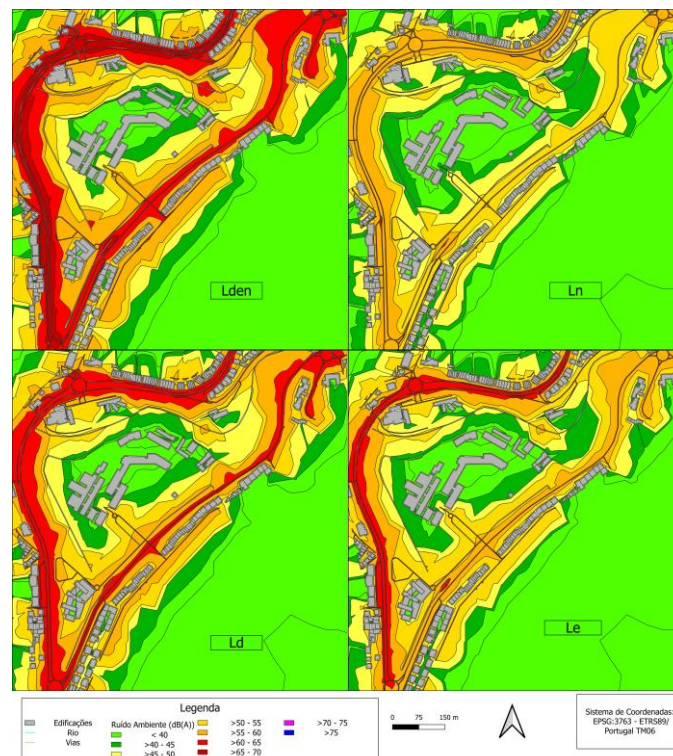


Figura 30: Mapa de Ruído gerado através da modelagem acústica pelo software NoiseModelling para o cenário da mudança da velocidade máxima permitida para 30km/h, com mudança de pavimento para asfalto poroso de duas camadas, com redução do fluxo de trânsito externo em 20% e com restrição de trânsito interno representando os períodos de avaliação.

As cores verdes são particularmente evidentes nas áreas onde o ruído foi mais drasticamente reduzido e atingiu níveis muito baixos, contrastando fortemente com as cores que dominam estas mesmas zonas no Cenário Base. No entanto, as áreas correspondentes ao Buffer de 50m e outras partes do campus mais distantes das escolas, onde os limites legais ainda são

excedidos, continuam a apresentar cores laranjas, que representam níveis sonoros mais elevados e acima da conformidade. A presença de áreas verdes e amarelas nos buffers próximos das escolas e áreas laranjas/vermelhas noutras zonas do campus e no buffer mais externo é a representação gráfica do sucesso localizado deste cenário.

4.3 Comparação de Resultados por Categorias

A Figura 31 sintetiza visualmente o impacto diferenciado das diversas tipologias de medidas de mitigação na qualidade sonora do Campus do IPB, mensurado através do indicador Lden, que avalia o ruído ao longo do dia com penalizações para períodos mais sensíveis.

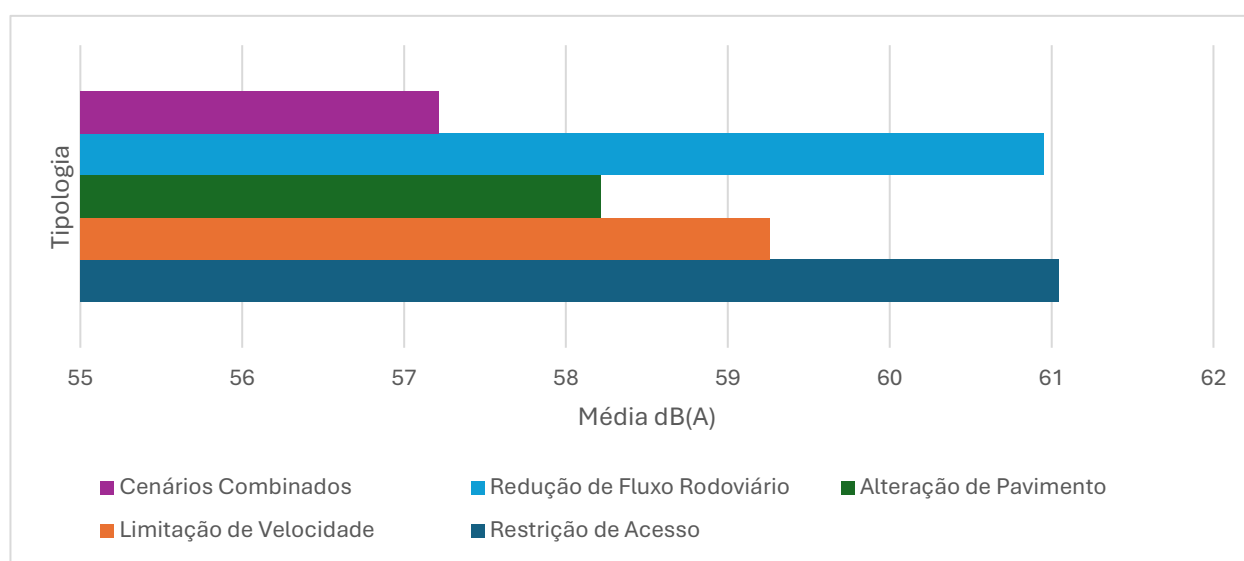


Figura 31: Comparação dos resultados médios de Lden por categorias para o Campus do IPB.

Os gráficos evidenciam que as medidas isoladas, como a restrição de acesso e a redução de fluxo rodoviário, demonstraram um impacto muito limitado na diminuição dos níveis de ruído. A restrição de tráfego interno (Cenário 1), por exemplo, resultou numa redução mínima no Lden para o IPB total (1%), sem alterações significativas nos buffers mais próximos das escolas, o que reforça a conclusão de que o tráfego externo é a principal fonte de ruído no campus. Similarmente, a redução de 20% no fluxo de tráfego externo (Cenários 8 e 9) mostrou-se ineficaz (1%) confirmando que esta estratégia isolada não é suficiente para a conformidade legal.

Em contrapartida, as categorias de limitação de velocidade (4%) e alteração de pavimento (6%) revelaram-se mais promissoras, embora ainda com limitações quando aplicadas isoladamente. A redução da velocidade para 30 km/h nas vias externas (Cenário 4) demonstrou uma redução mais acentuada. Contudo, a alteração de pavimento para asfalto poroso de duas

camadas nas vias externas (Cenário 6) foi particularmente eficaz nas áreas mais próximas, conseguindo que os buffers de 10m e 25m atingissem a conformidade para o Lden. Estes resultados individuais sugerem que a abordagem da fonte de ruído através de modificações na velocidade e no tipo de pavimento é mais impactante do que apenas a restrição de acesso ou a simples redução de fluxo.

No entanto, a categoria de cenários combinados, que apresenta as maiores reduções percentuais de ruído (7%). Conforme discutido, apenas a combinação de estratégias se mostra verdadeiramente eficaz para alcançar reduções significativas e, crucialmente, a conformidade legal. O Cenário 13, que combinou a redução da velocidade para 30 km/h, o uso de asfalto poroso de duas camadas, uma redução de 20% no fluxo externo e a restrição do tráfego interno, foi o mais bem-sucedido. Este cenário conseguiu que o Lden para a área total do IPB atingisse 55 dB(A), ou seja, em plena conformidade com o limite legal para zonas sensíveis, e obteve as maiores reduções nos buffers próximos das escolas.

A Figura 32 complementa a análise prévia sobre a qualidade sonora no Campus do IPB, focando-se especificamente nos resultados médios do indicador Ln por categoria de cenário. A sua representação gráfica visualiza de forma concisa a eficácia das diferentes abordagens de mitigação do ruído durante o Ln, um dos mais sensíveis para a comunidade académica e para o cumprimento dos limites legais estabelecidos para zonas sensíveis, que é de 45 dB(A).

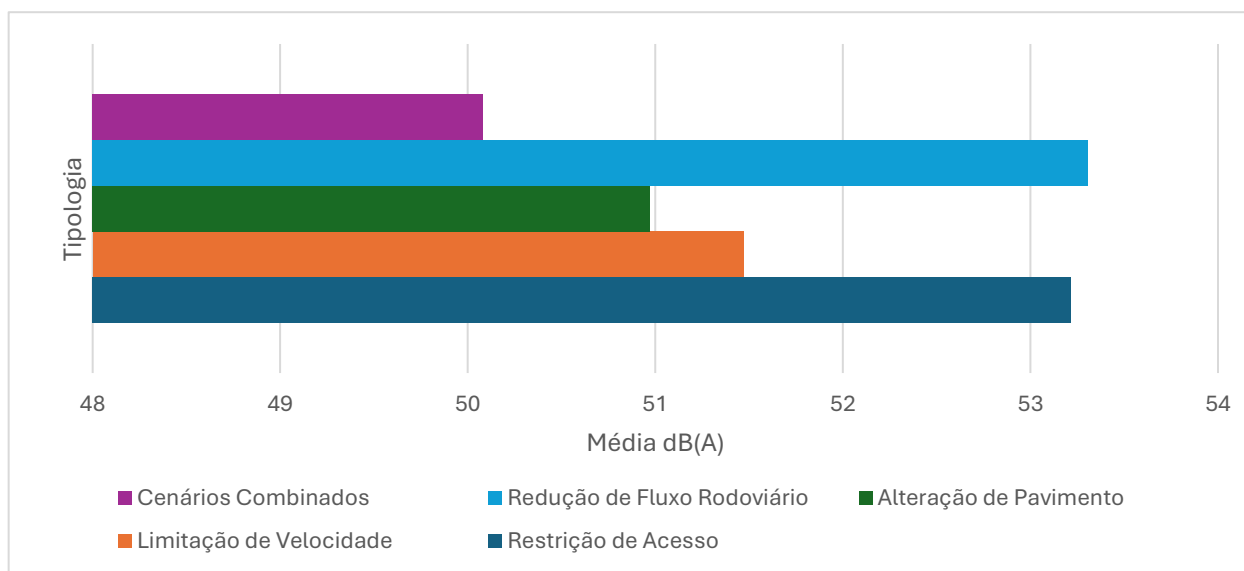


Figura 32: Comparação dos resultados médios de Ln por categorias para o Campus do IPB.

Ao analisar a performance das medidas isoladas, tal como observado para o Lden, a restrição de acesso de tráfego interno (2%) e a redução do fluxo rodoviário externo (2%) mostraram-se marginalmente eficazes para o Ln. As reduções médias para estas categorias são mínimas, com

a redução de fluxo rodoviário revelando-se a estratégia menos impactante, com valores de 0 a 1 dB(A) na maioria das áreas para o Ln. Este facto reitera que o tráfego externo é a fonte de ruído dominante, mesmo durante a noite.

Contudo, a categoria de alteração de pavimento, especificamente a aplicação de asfalto poroso de duas camadas nas vias externas, destaca-se como particularmente promissora para o período Ln (6%). Este é um resultado notável, demonstrando a capacidade do pavimento poroso em atenuar significativamente o ruído de rolamento, que pode ser uma componente importante do ruído Ln do tráfego. Isso mostra que esta categoria atinge uma das maiores reduções percentuais para o Ln entre as medidas isoladas, aproximando os níveis de ruído dos limites desejados nas áreas mais sensíveis.

No entanto, é nos cenários combinados que se observa a maior e mais consistente redução de ruído Ln (8%), evidenciando a necessidade de uma abordagem multifacetada. Estes cenários, ao integrar a redução de velocidade (particularmente para 30 km/h), o uso de asfalto poroso e a restrição de tráfego interno e/ou redução de fluxo externo, foram os únicos capazes de levar as áreas mais sensíveis (buffers de 10m e 25m) à conformidade legal para o Ln.

Apesar do sucesso localizado nas áreas mais sensíveis, os cenários combinados mais eficazes não conseguem levar o Ln para a área total do IPB à conformidade legal (o Cenário 13 atinge 48 dB(A) para o Ln total do IPB, que ainda está acima dos 45 dB(A) exigidos para zonas sensíveis). Isto sugere que, embora as medidas propostas sejam eficazes em proteger os recetores mais próximos das escolas, o desafio da poluição sonora noturna persiste no campus de forma mais abrangente. A complexidade do ambiente universitário e a influência de múltiplas fontes de ruído exigem, portanto, uma vigilância contínua e, potencialmente, a consideração de medidas adicionais ou mais intensivas para atingir a conformidade total e a otimização da qualidade sonora noturna em todo o campus.

4.4 Resultados por Cenário

Os resultados do Lden por área, apresentados na Tabela 5, revela de forma inequívoca o impacto das diversas tipologias de cenários modelados na qualidade sonora do Campus do IPB, em comparação com a situação de base. Inicialmente, observa-se que o cenário base demonstra um claro incumprimento dos limites legais estabelecidos para zonas sensíveis.

O Lden para a área total do IPB registava 62 dB(A), superando o limite de 55 dB(A), e os buffers circundantes às escolas também apresentavam valores acima do permitido (57 dB(A))

para 10m, 58 dB(A) para 25m e 63 dB(A) para 50m). Este dado sublinha a urgência de intervenções para mitigar a poluição sonora, identificada como um desafio ambiental com consequências para a saúde e o bem-estar dos utilizadores, podendo prejudicar o aprendizado e a concentração dos estudantes.

Tabela 5: Resultados do Lden por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.

Cenário	Lden							
	IPB		10m		25m		50m	
	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)
Cenário Base	62	-	57	-	58	-	63	-
1	61	-1	57	0	58	0	64	1
2	61	-1	56	-1	58	-1	62	-2
3	60	-2	55	-2	57	-1	62	-1
4	58	-4	55	-2	57	-2	60	-3
5	58	-3	54	-3	57	-2	61	-2
6	59	-3	53	-4	54	-4	59	-4
7	57	-5	52	-5	54	-4	60	-4
8	61	0	57	0	58	0	63	0
9	60	-1	56	-1	58	0	63	0
10	59	-3	52	-5	54	-5	57	-6
11	56	-6	51	-6	54	-5	58	-5
12	58	-3	51	-6	53	-5	57	-6
13	55	-6	50	-7	53	-5	57	-6

Ao examinar as classificações de cenários, as medidas isoladas revelam um impacto limitado, indicando que apenas a combinação de estratégias se mostra eficaz para reduções significativas. A restrição de acesso de tráfego interno (Cenário 1), por exemplo, resultou em reduções mínimas de apenas 1 dB(A) no Lden para a área total do IPB, sem qualquer alteração nos buffers de 10m e 25m, e até um ligeiro aumento no buffer de 50m, evidenciando a sua insuficiência para alcançar a conformidade legal. Isso reforça a noção de que o tráfego externo é a fonte de ruído mais relevante e dominante no campus.

No que concerne à limitação de velocidade, a redução para 40 km/h nas vias externas (Cenário 2) gerou apenas pequenas diminuições (1 dB(A) na maioria das áreas), sem atingir a conformidade. No entanto, quando esta limitação de 40 km/h foi combinada com a restrição de tráfego interno (Cenário 3), observou-se uma redução de 2 dB(A) no Lden do IPB total e, crucialmente, o buffer de 10m atingiu o limite de 55 dB(A), cumprindo a legislação para esta área

sensível. A intensificação da medida, com a limitação para 30 km/h nas vias externas (Cenário 4), demonstrou uma redução mais acentuada (4 dB(A) no Lden do IPB total), fazendo com que o buffer de 10m também cumprisse o limite legal. A combinação desta velocidade de 30 km/h com a restrição interna (Cenário 5) aprimorou ainda mais o resultado no buffer de 10m, que alcançou 54 dB(A).

No que tange a alteração de pavimento, com a aplicação de asfalto poroso de duas camadas nas vias externas (Cenário 6), mostrou-se particularmente eficaz em áreas próximas. Esta medida isolada resultou numa redução de 3 dB(A) no Lden do IPB total, e, mais notavelmente, conseguiu que os buffers de 10m e 25m atingissem, respetivamente, 53 dB(A) e 54 dB(A), ou seja, em conformidade com a legislação para zonas sensíveis. A combinação desta alteração de pavimento com a restrição de tráfego interno (Cenário 7) aprofundou as reduções, levando o Lden do IPB a diminuir 5 dB(A) e mantendo a conformidade nos buffers de 10m e 25m.

Por outro lado, a redução de fluxo rodoviário externo em 20% (Cenário 8 e Cenário 9) revelou-se a estratégia menos impactante em termos de Lden, com reduções de 0 a 1 dB(A) na maioria das áreas, confirmando a sua ineficácia isolada ou mesmo em combinação com a restrição interna.

Os cenários combinados de múltiplas estratégias demonstram, de facto, ser a abordagem mais robusta e eficaz, como preconizado pelo estudo. O Cenário 11 (redução para 40 km/h + pavimento poroso + redução de 20% no fluxo externo + restrição interna) alcançou uma significativa redução de 6 dB(A) no Lden do IPB total e levou os buffers de 10m e 25m a cumprirem a legislação. No entanto, o Cenário 13 (redução para 30 km/h + pavimento poroso + redução de 20% no fluxo externo + restrição interna) destacou-se como o mais bem-sucedido. Este cenário conseguiu que o Lden para a área total do IPB atingisse 55 dB(A), ou seja, em conformidade com o limite legal, e obteve as maiores reduções nos buffers de 10m (-7 dB(A) para 50 dB(A)) e 25m (-5 dB(A) para 53 dB(A)), ambos também em conformidade. As reduções observadas nestes cenários combinados são cruciais para a criação de um ambiente académico mais saudável e propício ao aprendizado e concentração, que atualmente são prejudicados pelo excesso de ruído.

Os dados apresentados na Tabela 6, referente aos resultados do período Ln nos cenários modelados para o Campus do IPB, revelam a complexidade do desafio da poluição sonora e a eficácia diferenciada das medidas de mitigação propostas. Inicialmente, o cenário base demonstra um claro incumprimento dos limites legais estabelecidos para zonas sensíveis, onde o L_n não deve

ultrapassar os 45 dB(A). Com valores de 54 dB(A) para a área total do IPB e de 49 dB(A), 50 dB(A) e 55 dB(A) para os buffers de 10m, 25m e 50m, respectivamente, a situação atual evidencia a necessidade de intervenção para salvaguardar a qualidade sonora do ambiente acadêmico.

Tabela 6: Resultados para o L_n por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.

Cenário	L_n							
	IPB		10m		25m		50m	
	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)
Cenário Base	54	-	49	-	50	-	55	-
1	53	-1	49	0	50	0	56	1
2	53	-1	47	-1	49	-1	53	-2
3	52	-3	47	-2	49	-1	54	-1
4	50	-4	46	-3	48	-2	52	-3
5	50	-4	46	-3	48	-2	53	-2
6	52	-2	45	-4	46	-4	51	-4
7	49	-5	44	-4	46	-3	52	-3
8	54	0	48	0	49	0	55	0
9	53	-2	48	-1	50	0	55	0
10	52	-3	43	-5	45	-4	50	-6
11	48	-6	43	-6	45	-4	50	-5
12	51	-3	43	-6	45	-5	49	-6
13	48	-6	42	-6	45	-5	49	-6

Levando em conta as categorias de cenários, percebe-se que as medidas isoladas, tal como para o indicador L_{den} , têm um impacto limitado no L_n . A restrição do tráfego interno (Cenário 1) resultou numa redução mínima de apenas 1 dB(A) no L_n para a área total do IPB, mantendo os níveis nos buffers de 10m e 25m inalterados e até registrando um ligeiro aumento no buffer de 50m. Este resultado corrobora a perspectiva de que o tráfego externo é a fonte de ruído mais relevante e dominante no campus, mesmo durante a noite.

Na categoria de limitação de velocidade, a redução para 40 km/h nas vias externas (Cenário 2) e a sua combinação com a restrição interna (Cenário 3) geraram reduções modestas de 1 dB(A) a 3 dB(A) no L_n em algumas áreas, mas nenhum destes cenários isolados ou em combinação permitiu que as áreas sensíveis, como os buffers de 10m e 25m, atingissem a conformidade legal de 45 dB(A). A limitação para 30 km/h nas vias externas (Cenário 4) e a sua combinação com a restrição interna (Cenário 5) demonstraram um desempenho ligeiramente

melhor, com reduções de 2 dB(A) a 4 dB(A), chegando a 46 dB(A) no buffer de 10m, o que ainda assim está acima do limite legal para o L_n .

A alteração de pavimento revelou-se consideravelmente mais eficaz no L_n . A aplicação de asfalto poroso de duas camadas nas vias externas (Cenário 6) resultou numa significativa redução de 4 dB(A) no buffer de 10m, fazendo com que este atingisse os 45 dB(A), ou seja, a conformidade legal para zonas sensíveis. Embora o L_n para a área total do IPB e os buffers de 25m e 50m ainda se mantivessem acima do limite, a redução observada é notável. Quando esta medida foi combinada com a restrição de tráfego interno (Cenário 7), a redução no buffer de 10m foi ainda maior, atingindo 44 dB(A), reforçando a sua eficácia em áreas próximas.

Por outro lado, a redução do fluxo rodoviário externo em 20% (Cenário 8 e Cenário 9) foi a estratégia menos impactante para o L_n , com reduções insignificantes ou nulas na maioria das áreas, confirmando a sua ineficácia como medida isolada para este período.

Finalmente, os cenários combinados de múltiplas estratégias demonstram ser a abordagem mais robusta para a mitigação do ruído noturno. O Cenário alcançou a conformidade legal no buffer de 10m (43 dB(A)) e no buffer de 25m (45 dB(A)). O Cenário 11 aprofundou estas reduções, com o buffer de 10m a atingir 43 dB(A) e o de 25m a manter os 45 dB(A), alcançando a conformidade em ambas as áreas sensíveis. O Cenário 12 também se mostrou altamente eficaz, com 43 dB(A) no buffer de 10m e 45 dB(A) no buffer de 25m. Por fim, o Cenário 13 destacou-se como o mais bem-sucedido, alcançando os valores mais baixos no buffer de 10m (42 dB(A)) e 25m (45 dB(A)), ambos em conformidade legal, e uma redução de 6 dB(A) no L_n total do IPB (48 dB(A)).

Portanto, estes resultados revelam um claro incumprimento dos limites legais de ruído na situação atual, com o tráfego de veículos, especialmente o externo, identificado como a principal fonte de poluição sonora. As medições do cenário base mostram níveis elevados para os indicadores L_{den} e L_n , superando os valores permitidos para zonas sensíveis, como campi universitários, impactando diretamente a saúde e o bem-estar da comunidade académica. Estratégias isoladas, como a restrição do tráfego interno ou pequenas reduções de velocidade, demonstraram um impacto muito limitado na mitigação do ruído, sublinhando a sua insuficiência para alcançar a conformidade legal. Os resultados detalhados para os períodos L_d e L_e , que complementam a caracterização do ambiente sonoro estão disponíveis no ANEXO III.

Por outro lado, a investigação comprova que apenas uma combinação de estratégias integradas é eficaz para reduzir significativamente os níveis de ruído. Cenários que incluíam a

redução da velocidade máxima (particularmente para 30 km/h) nas vias externas e a utilização de asfalto poroso de duas camadas mostraram os melhores resultados. As simulações mais abrangentes, que combinavam estas medidas com a restrição do tráfego interno e uma redução no fluxo de veículos externos, foram as mais bem-sucedidas. Estas abordagens conjuntas foram capazes de levar as áreas mais sensíveis do campus a cumprir a legislação, criando um ambiente acústico mais saudável e propício ao aprendizado e à concentração.

5. CONCLUSÕES

A presente investigação debruçou-se sobre o impacto da mobilidade sustentável na qualidade sonora do campus do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), recorrendo à modelação acústica como ferramenta central de análise. O objetivo geral de avaliar as alterações nos níveis de ruído e os potenciais benefícios para a comunidade académica com a implementação de medidas de mobilidade sustentável foi integralmente cumprido através deste estudo.

Para alcançar este propósito, caracterizou-se o ambiente sonoro atual do campus, desenvolveram-se e simularam-se diversos cenários de mobilidade utilizando um modelo acústico específico para o campus. Analisou-se a influência de medidas como a restrição do tráfego automóvel e a alteração da velocidade ou pavimento nas vias, identificando as principais fontes sonoras. Os resultados da modelação foram comparados com dados de medições reais para validar a precisão do modelo, o que permitiu avaliar os benefícios acústicos e as suas implicações para o bem-estar e conforto da comunidade académica. Por fim, propuseram-se recomendações para a melhoria da qualidade sonora.

O modelo acústico do campus foi validado com sucesso através da comparação entre os dados simulados e os dados reais obtidos nas medições experimentais. A análise da linha de tendência e dos valores de R^2 para diferentes indicadores acústicos, como o L_{den} e os níveis médios diários, demonstrou uma boa correlação e ajuste do modelo aos dados experimentais. Embora os valores de RMSE nos períodos diários individuais estivessem em alguns casos acima de um critério mais rigoroso, o valor para o indicador global L_{den} revelou uma boa precisão, confirmando a fiabilidade do modelo como base para a avaliação de cenários futuros.

No cenário base, que representa a situação atual, verificou-se um incumprimento da legislação acústica para zonas sensíveis como campi universitários. Os níveis de ruído calculados para a área total do campus excederam os limites legais tanto para o indicador L_{den} (62 dB(A) vs 55 dB(A) limite) quanto para o L_n (54 dB(A) vs 45 dB(A) limite). Os buffers em torno das escolas, apesar de apresentarem níveis ligeiramente inferiores, também se encontravam acima dos limites na maioria dos casos. As principais fontes de ruído no campus foram identificadas como o tráfego rodoviário, tanto interno quanto externo. A análise dos resultados dos diferentes cenários simulados demonstrou que o tráfego externo constitui a fonte de ruído mais relevante e dominante que afeta o campus, especialmente as áreas mais distantes das escolas. A restrição do tráfego

interno, quando aplicada isoladamente, resultou em reduções mínimas dos níveis de ruído e não foi suficiente para alcançar a conformidade legal.

A modelação acústica permitiu avaliar eficazmente o impacto das medidas de mobilidade sustentável na qualidade sonora. As medidas que apresentaram os melhores resultados e a maior redução nos níveis de ruído foram aquelas que atuaram diretamente sobre o tráfego externo. Cenários que combinavam a redução da velocidade máxima permitida para 30 km/h nas vias externas e a mudança do pavimento para asfalto poroso de duas camadas revelaram-se particularmente eficazes. Estes cenários combinados, como o Cenário 12 e o Cenário 13, conseguiram atingir a conformidade legal para ambos os indicadores L_{den} e L_n nas áreas mais sensíveis e próximas das escolas (buffers de 10m e 25m). Outros cenários combinados, como a redução de velocidade para 40 km/h com restrição interna (Cenário 3) ou a mudança de pavimento com restrição interna (Cenário 7), também demonstraram melhorias significativas e, nalguns casos, conformidade em áreas específicas, mas os cenários que abordavam simultaneamente velocidade e pavimento externos (Cenários 12 e 13) destacaram-se pela sua abrangência na proteção das áreas sensíveis. Comparativamente, a redução de fluxo de veículos externos em 20% isoladamente (Cenário 8) ou em combinação com a restrição interna (Cenário 9) mostrou-se menos eficaz do que as medidas baseadas na velocidade ou pavimento.

O impacto destas medidas na redução do ruído é crucial para o bem-estar e conforto acústico da comunidade académica, contribuindo para um ambiente mais favorável ao ensino e aprendizagem. Níveis de ruído excessivos em ambientes de ensino podem prejudicar a concentração, a compreensão da fala, a leitura e o desempenho académico. A redução do ruído no campus, especialmente em áreas próximas a salas de aula e espaços de estudo, tem evidências de contribuir para uma melhor qualidade de vida e produtividade académica.

Em suma, a modelação acústica revelou-se uma ferramenta essencial para a avaliação do impacto de diferentes medidas de mobilidade na qualidade sonora do Campus do IPB. Os resultados demonstram que a situação atual excede os limites legais e que as medidas mais eficazes são aquelas que abordam o ruído proveniente do tráfego externo, com destaque para a redução de velocidade e a mudança de pavimento. A implementação destas estratégias, especialmente em combinação, tem o potencial de transformar o ambiente acústico do campus, tornando-o mais saudável e propício às atividades de ensino e aprendizagem. Este estudo fornece, assim, recomendações e informações baseadas em dados para o planeamento futuro do Campus de Santa Apolónia, visando a promoção de ambientes académicos com melhor qualidade sonora.

5.1 Limitações e Impactos nos Resultados

É importante refletir sobre as limitações do estudo. Fatores como a indisponibilidade de medições diretas de velocidade para a modelação, incertezas na modelação, variabilidade temporal das fontes de ruído ou condições ambientais não consideradas em detalhe, podem influenciar os resultados. A validação do modelo, embora considerada boa, revelou desvios nos valores de RMSE em alguns períodos. Além disso, a percepção subjetiva do ruído pela comunidade nem sempre corresponde diretamente aos níveis medidos.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Para aprofundar o conhecimento e a aplicabilidade dos resultados desta investigação, sugere-se a realização de estudos futuros focados em investigar o impacto real das medidas de mobilidade sustentável simuladas, caso venham a ser implementadas no Campus do IPB. Isso envolveria a realização de campanhas de medição acústica comparativas (antes/depois), ao longo de períodos distintos do ano, como já sugerido na conclusão deste estudo para capturar a variabilidade sazonal. A comparação dos dados reais obtidos pós-implementação com os resultados da modelação deste estudo permitiria validar a precisão das previsões do modelo e aferir a eficácia efetiva das intervenções propostas, como a restrição de tráfego interno, a redução de velocidade ou a alteração de pavimentos.

Futuras investigações poderiam beneficiar da implementação de modelações acústicas mais avançadas, com foco em visualizações tridimensionais (3D) integradas a Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Embora o presente estudo tenha utilizado o *NoiseModelling* e integrado dados geográficos e o Modelo Digital de Elevação (MDE) para representar a topografia do campus, utilizou-se apenas a modelação 2D em vez de 3D o que pode limitar a análise dos efeitos de difração em barreiras e dos efeitos meteorológicos em alturas mais elevadas. A migração para modelos 3D permitiria uma maior precisão espacial e uma representação mais realista da propagação sonora, especialmente considerando a complexidade geométrica dos espaços universitários, com edifícios, infraestruturas e elementos naturais. A reconstrução automatizada de dados de entrada 3D para simulação de ruído, como investigado por Stoter et al. (2020), também poderia ser explorada para otimizar este processo.

Seria ainda valioso realizar uma comparação aprofundada da eficácia e precisão entre diferentes ferramentas de modelagem acústica, incluindo as abordagens baseadas em CNOSSOS-EU, softwares comerciais como *SoundPLAN* e *CadnaA*. Tal comparação deveria ser conduzida em

diferentes escalas e contextos, desde o detalhe microclimático de um campus universitário até áreas urbanas mais amplas. Isso permitiria identificar os pontos fortes e fracos de cada ferramenta, as suas limitações, e a sua adequação a distintos objetivos de estudo e recursos disponíveis. Poder-se-ia, por exemplo, investigar como os modelos lidam com a variedade de fontes de ruído presentes em campi ou com a integração de dados complexos, contribuindo para um guia mais robusto na seleção de ferramentas para futuros projetos de planeamento acústico.

REFERÊNCIAS

Agência Portuguesa do Ambiente. (2021). Mapas estratégicos de ruído: Grandes Infraestruturas de Transporte.

https://apambiente.pt/sites/default/files/_Ar_Ruido/Ruido/SituacaoNacional/MER_GIT_rododigos/Mapas%20GITs%20Rodo%202021/RD_PT_01_1006_MD.pdf

Asensio, C., Pavón, I., Ramos, C., López, J. M., Pamiés, Y., Moreno, D., & de Arcas, G. (2021). Estimation of the noise emissions generated by a single vehicle while driving. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102865.

Aumond, P., Can, A., Mallet, V., Gauvreau, B., & Guillaume, G. (2021). Global sensitivity analysis for road traffic noise modelling. *Applied acoustics*, 176, 107899.

Aumond, P., Bocher, E., Ecotièrre, D., Fortin, N., Gauvreau, B., Guillaume, G., & Petit, G. (2021, October). Improvement of city noise map production processes and sensitivity analysis to noise models inputs. In *Proceedings of Euronoise* (pp. 25-27)

Aumond, P., Jacquesson, L., & Can, A. (2018). Probabilistic modeling framework for multisource sound mapping. *Applied Acoustics*, 139, 34-43.

Aumond, P., Fortin, N., & Can, A. (2020, October). Overview of the NoiseModelling open-source software version 3 and its applications. In *INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings* (Vol. 261, No. 4, pp. 2005-2011). Institute of Noise Control Engineering.

Bąkowski, A., Dekýš, V., Radziszewski, L., & Skrobacki, Z. (2019, February). Validation of traffic noise models. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2077, No. 1, p. 020005). AIP Publishing LLC.

Baclet, S., Khoshkhan, K., Pourmoradnasseri, M., Rumpler, R., & Hadachi, A. (2023). Near-real-time dynamic noise mapping and exposure assessment using calibrated microscopic traffic simulations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 124, 103922.

Baclet, S., & Rumpler, R. (2025). Performance of a generalised algorithm for the detection of noise events from road traffic in a real urban area: A simulation study. *Applied acoustics*, 228, 110337.

de Souza, T. B., Alberto, K. C., & Barbosa, S. A. (2020). Evaluation of noise pollution related to human perception in a university campus in Brazil. *Applied Acoustics*, 157, 107023.

- Barros, A., Kampen, J. K., & Vuye, C. (2024). Noise barriers as a mitigation measure for highway traffic noise: Empirical evidence from three study cases. *Journal of environmental management*, 367, 121963.
- Borowska-Stefańska, M., Felcyn, J., Gałuszka, M., Kowalski, M., Majchrowska, A., & Wiśniewski, S. (2023). Effects of speed limits introduced to curb road noise on the performance of the urban transport system. *Journal of Transport & Health*, 30, 101592.
- Cabral, M. F. F. (2018). Poluição sonora gerada pelo tráfego de veículos em vias urbanas. *Revista Transportes*, 26(3). https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/download/675/pdf_4/3262
- Câmara Municipal de Bragança. (2021). Plano Diretor Municipal de Bragança. https://www.cm-braganca.pt/pages/112?news_id=104
- Can, A., Aumond, P., Becarie, C., & Leclercq, L. (2019). *Dynamic approach for the study of the spatial impact of road traffic noise at peak hours*. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.
- CAPS-IST. (2021). Mapa Estratégico de Ruído das Grandes Infraestruturas de Transporte Ferroviário. https://apambiente.pt/sites/default/files/_Ar_Ruido/Ruido/SituacaoNacional/Mapas_GITs_Ferrov_iario/PT_a_Mrail_rl00054_00060_RNT_sul.pdf
- Castro-Fresno, D., Miera-Dominguez, H., Lastra-González, P., Indacoechea-Vega, I., van Loon, R., & van Blokland, G. (2024). Two-layer porous asphalt: main properties to decrease the noise emissions. *Transportation Research Record*, 2678(7), 178-187.
- Cremonesi, J. F., & Bistafa, S. R. (2013). Método de análise do ruído em áreas industriais e controle por enclausuramento acústico das fontes.
- Delgado, B. T. (2021). Monitorização do ruído no Metropolitano de Lisboa [Tese de mestrado, Instituto Politécnico de Lisboa]. Repositório IPL. <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/14026/1/Dissertacao.pdf>
- de Sousa Faria, A. P. (2015). *Modelação de Ruído do Tráfego Automóvel* (Master's thesis, Universidade de Aveiro (Portugal)).
- Driscoll, D. P. P. E., Milk, K., & Burgess, M. (2009). W503-student manual: Noise measurements and its effects. *London: BOHS*.

Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança. (2023). Guia ECTS Arquitetura e Urbanismo.

https://guiaects.ipb.pt/GuiaEcts/PdfService?cod_escola=3043&cod_curso=9089&n_plano=322&n_disciplina=2101&n_opcao=0&ano_lect=2023&locale=1

Espadaler-Clapés, J., Barmponakis, E., & Geroliminis, N. (2023). Traffic congestion and noise emissions with detailed vehicle trajectories from UAVs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103822.

European Environment Agency. (2020). Noise in Europe 2020. <https://www.eea.europa.eu/publications/noise-in-europe>.

Ref, O. I. (2010). State of the art on tradable permits, noise legislation, noise restriction methods and noise modelling.

Foreman, J. (2012). *Sound analysis and noise control*. Springer Science & Business Media.

Peixoto, N. G. D. M., & Azevedo Filho, M. A. N. D. (2020). Modelagem do ruído de tráfego rodoviário urbano: uma revisão da literatura.

Indacochea-Vega, I., Miera-Dominguez, H., Lastra-González, P., & Castro-Fresno, D. (2024). Life cycle approach for evaluating the environmental and economic viability of low-noise asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 466, 142785.

Instituto Politécnico de Bragança. (2023). Campus de Santa Apolónia. <https://www.ipb.pt/campus/>

Kephalopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU)*, 180-p.

Lamas, J. M. R. G. (1993). *Morfologia Urbana e Desenho da Cidade* (3ª ed. 2004). Fundação Calouste Gulbenkian/JNICT.

Lemos, J. P. T. (2023). *Caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã* (Master's thesis, Universidade do Porto (Portugal)).

Baeza, J. L., Sievert, J. L., Landwehr, A., Luft, J., Preuner, P., Bruns-Berentelg, J., ... & Noennig, J. R. (2021). CityScope platform for real-time analysis and decision-support in urban design competitions. *International Journal of E-Planning Research (IJEPR)*, 10(4), 121-137.

- de Sousa Mateus, M. L. O. (2014). *A Influência Dos Parâmetros De Amostragem Na Incerteza Das Medições De Ruído Ambiental* (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra (Portugal)).
- Matos, J., Fradique, J., Tavares, L., Guedes, M., & Leite, M. J. (2011). Guia prático para medições de ruído ambiente-no contexto do Regulamento Geral do Ruído tendo em conta a NP ISO 1996. *Agência Portuguesa do Ambiente*.
- Meller, G., de Lourenço, W. M., de Melo, V. S. G., & de Campos Grigoletti, G. (2023). Use of noise prediction models for road noise mapping in locations that do not have a standardized model: A short systematic review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 740.
- Astudillo Montenegro, A. L., Bolognese, M., Panci, A., Palazzuoli, D., Melluso, D., Stasi, G., ... & Licitra, G. (2024). An open-source pipeline in noise modelling and noise exposure reduction in a port city. In *Proceedings of the 30th International Congress on Sound and Vibration*. International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV).
- Nourmohammadi, Z., Lilasathapornkit, T., Ashfaq, M., Gu, Z., & Saberi, M. (2021). Mapping urban environmental performance with emerging data sources: a case of urban greenery and traffic noise in Sydney, Australia. *Sustainability*, 13(2), 605.
- Nygren, J., Le Bescond, V., Can, A., Aumond, P., Gastineau, P., Boij, S., ... & O'Reilly, C. J. (2024). Agent-specific, activity-based noise impact assessment using noise exposure cost. *Sustainable Cities and Society*, 103, 105278.
- Nygren, J., Boij, S., Rumpler, R., & O'Reilly, C. J. (2023). Vehicle-specific noise exposure cost: Noise impact allocation methodology for microscopic traffic simulations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 118, 103712.
- OFFICE, P. *Commission Directive (EU) 2015/996 - of 19 May 2015 - establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council*. 2015.
- Peixoto, N. G. D. M. (2020). Desenvolvimento de método de mapeamento do ruído de tráfego rodoviário em áreas urbanas utilizando SIG de acesso aberto e validação na cidade de Fortaleza.
- Quintero, G., Aumond, P., Can, A., Balastegui, A., & Romeu, J. (2019). Statistical requirements for noise mapping based on mobile measurements using bikes. *Applied Acoustics*, 156, 271-278.
- Ranpise, R. B., & Tandel, B. N. (2022). Urban road traffic noise monitoring, mapping, modelling, and mitigation: A thematic review. *Noise Mapping*, 9(1), 48-66.

Gozaló, G. R., Morillas, J. M. B., González, D. M., & Moraga, P. A. (2018). Relationships among satisfaction, noise perception, and use of urban green spaces. *Science of the total environment*, 624, 438-450.

Rey-Gozaló, G., Barrigón Morillas, J. M., & Montes González, D. (2022). Analysis and management of current road traffic noise. *Current Pollution Reports*, 8(4), 315-327.

RGR DL n.º 9/2007, de 17 de janeiro. Diário da República, 1.ª série, n.º 147, 1 de agosto de 2007.

Servilha, E. A. M., & Delatti, M. D. A. (2014). College students' perception of classroom noise and its consequences on learning quality. *Audiology-Communication Research*, 19, 138-144.

Ribeiro, J. M., Sousa, S., & Correia, T. (2021). Impacto do ruído na saúde e qualidade de vida das pessoas. RepositóriUM, Universidade do Minho. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/63257/1/3083-IMPACTO%20DO%20RU%20C3%8DDO%20NA%20SA%20C3%9ADE%20E%20QUALIDADE%20DE%20VIDA%20DAS%20PESSOAS.pdf>

Śmieszek, M., Lavrov, A., Mateichyk, V., Mościszewski, J., Fedorov, V., & Yanovskyi, V. (2023). Analysis of Traffic Noise Pollution Using Siemens Tecnomatix Plant Simulation. *Transportation Research Procedia*, 74, 157-163.

Molina, I. S., Otegui, L. S., Prieto, M. A., Ruiz, R. M. A., & Eurocontrol, S. A. (2023). Análisis comparativo de softwares de simulación de ruido ambiental: comparación entre una solución comercial y una de código abierto.

SOUZA, M. M. (2013). Avaliação dos níveis de ruído e das soluções arquitetônicas adotadas em ambientes das unidades de urgência e emergência no município de Belém-PA.

Specht, L. P. (2009). Avaliação do ruído através do SPBI (Statistical Pass-By Index). *Revista Engenharia Mecânica*, 10(4). <https://www.scielo.br/j/rem/a/MhHVbZsPXTR7X4QczCLRWF/?lang=pt>

Stoter, J., Peters, R., Commandeur, T., Dukai, B., Kumar, K., & Ledoux, H. (2020). Automated reconstruction of 3D input data for noise simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80, 101424.

Tiwari, S. K., Kumaraswamidhas, L. A., Patel, R., Garg, N., & Vallisree, S. (2024). Traffic noise measurement, mapping, and modeling using soft computing techniques for mid-sized smart Indian city. *Measurement: Sensors*, 33, 101203.

Tang, J. H., Lin, B. C., Hwang, J. S., Chen, L. J., Wu, B. S., Jian, H. L., ... & Chan, T. C. (2022). Dynamic modeling for noise mapping in urban areas. *Environmental Impact Assessment Review*, 97, 106864.

Ventura, J. (2008). Modelação do Ruído Ambiente no Campus da ESTG. Comparação entre a utilização de uma técnica geoestatística (Kriging) e software de previsão acústica. *Acústica, Coimbra*, 22.

Wu, H., Zhi, D., Yin, B., Lu, C., Liu, L., & Antoniou, C. (2025). Simulation-based impact assessment framework for driving restriction zone policies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 141, 104615.

Yadav, A., Mandhani, J., Parida, M., & Kumar, B. (2022). Modelling of traffic noise in the vicinity of urban road intersections. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112, 103474.

Zannin, P. H. T., Engel, M. S., Fiedler, P. E. K., & Bunn, F. (2013). Characterization of environmental noise based on noise measurements, noise mapping and interviews: A case study at a university campus in Brazil. *Cities*, 31, 317-327.

ANEXO I

Coeficientes definidos pela CNOSOS-EU para o cálculo do ruído de tráfego.

Tabela 7: Coeficientes para veículos leves rápidos (m=1).

Octave band centre frequency (Hz)	A _R	A _R	A _P	A _P	a	b
63	79,7	30	94,5	-1,3	0	0
125	85,7	41,5	89,2	7,2	0	0
250	84,5	38,9	88	7,7	0	0
500	90,2	25,7	85,9	8	2,6	-3,1
1000	97,2	32,5	84,2	8	2,9	-6,4
2000	93,9	37,2	86,9	8	1,5	-14
4000	84,1	39	83,3	8	2,3	-22,4
8000	74,3	40	76,1	8	9,2	-11,4

Tabela 8: Coeficientes para veículos médios pesados (m=2)

Octave band centre frequency (Hz)	A _R	A _R	A _P	A _P
63	84	30	101	-1,9
125	88,7	25,8	96,5	4,7
250	91,5	32,6	98,8	6,4
500	96,7	23,8	96,8	6,5
1000	97,4	30,1	98,6	6,5
2000	90,9	36,2	95,2	6,5
4000	83,8	38,3	88,8	6,5
8000	80,5	40,1	82,7	6,5

Tabela 9: Coeficientes para veículos pesados (m=3).

Octave band centre frequency (Hz)	A _R	A _R	A _P	A _P
63	87	30	104,4	0
125	91,7	33,5	100,6	3
250	94,1	31,3	101,7	4,6
500	100,7	25,4	101	5
1000	100,8	31,8	100,1	5
2000	94,3	37,1	95,9	5
4000	87,1	38,6	91,3	5
8000	82,5	40,6	85,3	5

Tabela 10: Coeficientes para vínculos de duas rodas de menos de 50 cilindradas (m=4a).

Octave band centre frequency (Hz)	A _R	A _R	A _P	A _P
63	0	0	88	4,2
125	0	0	87,5	7,4
250	0	0	89,5	9,8
500	0	0	93,7	11,6
1000	0	0	96,6	15,7
2000	0	0	98,8	18,9
4000	0	0	93,0	20,3
8000	0	0	88,7	20,6

Tabela 11: Coeficientes para vínculos de duas rodas de mais de 50 cilindradas (m=4b).

Octave band centre frequency (Hz)	A _R	A _R	A _P	A _P
63	0	0	95	3,2
125	0	0	97,2	5,9
250	0	0	92,7	11,9
500	0	0	92,9	11,6
1000	0	0	94,7	11,5
2000	0	0	93,2	12,6
4000	0	0	90,1	11,1
8000	0	0	86,5	12

ANEXO II

Frequência nominal em Hz	Frequência exata	Filtro A
10	10.00	-70.4
2.5	12.59	-63.4
16	15.85	-56.7
20	19.95	-50.5
25	25.12	-44.7
31.5	31.62	-39.4
40	39.81	-34.6
50	50.12	-30.2
63	63.10	-26.2
80	79.43	-22.5
100	100.0	-19.1
125	125.9	-16.1
160	158.5	-13.4
200	199.5	-10.9
250	251.2	-8.6
315	316.2	-6.6
400	398.1	-4.8
500	501.2	-3.2
630	631.0	-1.9
800	794.3	-0.8
1000	1000	0
1250	1259	+0.6
1600	1585	+1.0
2000	1995	+1.2
2500	2512	+1.3
3150	3162	+1.2
4000	3981	+1.0
5000	5012	+0.5
6300	6310	-0.1
8000	7943	-1.1
10000	10000	-2.5
12500	12590	-4.3
16000	15850	-6.6
20000	19950	-9.3

Figura 33: Filtro de calibração de ponderação A por frequência Autor: Cremonesi, 2013

ANEXO III

Tabela 12: Resultados do Período Ld por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.

Cenário	Ld							
	IPB		10m		25m		50m	
	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)
Cenário Base	59	-	55	-	57	-	61	-
1	59	0	54	-1	57	0	62	1
2	58	-1	54	-1	56	-1	59	-1
3	57	-2	53	-2	55	-1	60	-1
4	56	-3	53	-2	55	-1	58	-3
5	56	-3	52	-3	55	-2	59	-2
6	55	-4	50	-5	52	-4	56	-5
7	54	-5	50	-5	52	-5	57	-4
8	58	0	55	0	57	0	60	0
9	58	-1	54	-1	56	-1	61	0
10	54	-4	49	-6	52	-5	55	-6
11	53	-6	48	-7	51	-5	55	-6
12	54	-5	49	-6	51	-5	54	-7
13	52	-7	48	-7	51	-6	54	-6

Tabela 13: Resultados do Período do Le por Áreas dos Cenários Modelados para o IPB.

Cenário	Le							
	IPB		10m		25m		50m	
	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)	dB(A)	Redução Cenário Base dB(A)
Cenário Base	56	-	52	-	54	-	58	-
1	56	0	52	0	54	0	59	1
2	56	-1	52	-1	54	0	57	-1
3	55	-2	50	-2	53	-1	57	-1
4	53	-3	50	-2	53	-1	55	-3
5	54	-3	49	-3	53	-1	56	-2
6	54	-3	48	-4	50	-4	54	-4
7	52	-4	48	-5	50	-4	55	-4
8	56	0	52	0	54	0	58	0
9	56	-1	51	-1	54	0	58	0
10	53	-4	47	-5	49	-5	53	-6
11	51	-6	46	-6	49	-5	53	-5
12	53	-4	47	-6	49	-5	52	-6
13	50	-6	46	-7	49	-5	52	-6