



**ESCOLA SUPERIOR DE CONSERVAÇÃO AMBIENTAL E
SUSTENTABILIDADE**

**RUÍDO AMBIENTAL NO SETOR EÓLICO:
CARACTERIZAÇÃO E MITIGAÇÃO**

Por

JARBAS AMARO DE SOUZA FILHO

Nazaré Paulista, 2026



**ESCOLA SUPERIOR DE CONSERVAÇÃO AMBIENTAL E
SUSTENTABILIDADE**

**RUÍDO AMBIENTAL NO SETOR EÓLICO:
CARACTERIZAÇÃO E MITIGAÇÃO**

Por

JARBAS AMARO DE SOUZA FILHO

COMITÊ DE ORIENTAÇÃO

Prof. Dr. Alexandre Uezu – Orientador (ESCAS)

Prof. Dr. Marco Antônio de Mendonça Vecchi – Coorientador (UFMG)

**TRABALHO FINAL APRESENTADO AO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL COMO REQUISITO PARCIAL À
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**

IPÊ – INSTITUTO DE PESQUISAS ECOLÓGICAS

Nazaré Paulista, 2026

Ficha Catalográfica

Amaro de Souza Filho, Jarbas

Ruído Ambiental no Setor Eólico, 2026. 239 p.

Trabalho Final (mestrado): IPÊ – Instituto de
Pesquisas Ecológicas

Mitigação de Ruído Ambiental

Ruído Aerogeradores

Acústica Ambiental

Escola Superior de Conservação
Ambiental e Sustentabilidade, IPÊ

BANCA EXAMINADORA

NAZARÉ PAULISTA – SÃO PAULO

04/09/2026

Alexandre Uezu

Prof. Dr.

Cláudio Benedito Valladares-Pádua

Prof. Dr.

Elizabeth Nogueira Fernandes

Prof. Dra.

Dedico este trabalho à minha esposa, Grazielle, e aos meus filhos Rayna e Ryan, pelo amor, compreensão e incentivo durante toda esta jornada.

Aos meus pais Jarbas e Elizabeth e familiares, pelos valores, pelo exemplo de perseverança e pelo apoio constante em cada etapa da minha vida.

Dedico também às pessoas das comunidades que residem no entorno dos complexos eólicos, na convicção que essa pesquisa contribua para promover o desenvolvimento sustentável, equilibrando a evolução das energias renováveis com a sustentabilidade socioambiental e a qualidade de vida das comunidades.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder vida, saúde, sabedoria e perseverança para superar os desafios desta jornada.

À minha esposa, Grazielle, pelo amor, pela compreensão diante das inúmeras horas dedicadas aos estudos e pelo incentivo permanente nos momentos mais desafiadores desta jornada. Aos meus filhos, Rayna e Ryan, que representam minha maior motivação para buscar continuamente o crescimento pessoal e profissional.

Aos meus pais, Jarbas e Elizabeth, aos familiares e aos amigos, pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e pela compreensão durante os períodos de dedicação intensa ao mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Uezu, pela confiança, orientação segura, disponibilidade, rigor científico e valiosas contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu coorientador, Prof. Marco Antônio Vecchi, pelas relevantes contribuições técnicas, pelas sugestões sempre oportunas e pelo incentivo ao longo de toda a pesquisa.

Ao Dr. Leandro Celestino, pelo constante incentivo, pelas discussões técnicas e pelo compartilhamento de conhecimentos científicos que enriqueceram este trabalho.

Aos professores e à equipe da ESCAS/IPÊ, pelos ensinamentos, pelo acolhimento e pela formação de excelência proporcionada durante todo o curso.

À Universidade Federal de Minas Gerais — UFMG, pelo suporte e cessão do professor Marco Vecchi.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite para avaliar este trabalho e pelas valiosas contribuições que certamente contribuirão para seu aperfeiçoamento.

À Auren Energia, pelo apoio institucional e financeiro, bem como pela oportunidade de desenvolver uma pesquisa aplicada a um tema de elevada relevância para o setor elétrico brasileiro. Estendo meus agradecimentos aos colegas que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste estudo.

Às comunidades participantes do estudo, que gentilmente abriram suas casas, compartilharam suas experiências e tornaram possível a realização deste trabalho. Sem sua confiança e colaboração, esta pesquisa não teria sido possível.

Aos pesquisadores cujos estudos serviram de referência e inspiração para esta dissertação, especialmente aqueles dedicados ao avanço do conhecimento em acústica ambiental, percepção do ruído e gestão sustentável de empreendimentos eólicos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista. Espero que este trabalho represente uma contribuição para o aprimoramento da gestão do ruído ambiental em complexos eólicos no Brasil, fortalecendo o diálogo entre ciência, inovação, sustentabilidade e qualidade de vida das comunidades.

“De tudo ficaram três coisas

A certeza de que estamos começando

A certeza de que é preciso continuar

A certeza de que podemos ser interrompidos
antes de terminar.

Façamos da interrupção um caminho novo

Da queda, um passo de dança

Do medo, uma escada

Do sonho, uma ponte

Da procura, um encontro!”

Fernando Sabino, O Encontro Marcado.

RESUMO

Resumo do Trabalho Final apresentado ao Programa de Mestrado Profissional em Conservação da Biodiversidade e Desenvolvimento Sustentável como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre

RUÍDO AMBIENTAL NO SETOR EÓLICO: CARACTERIZAÇÃO E MITIGAÇÃO

Por

JARBAS AMARO DE SOUZA FILHO

Setembro de 2026

Orientador: Prof. Dr. ALEXANDRE UEZU

A expansão das energias renováveis, entre as quais se destaca a energia eólica, essencial à transição e à segurança energética do Brasil, tem ampliado a necessidade de aperfeiçoamento dos instrumentos de avaliação e gestão do ruído ambiental em empreendimentos eólicos. Embora a energia eólica desempenhe papel estratégico na segurança energética e na descarbonização da matriz elétrica, os critérios tradicionalmente utilizados no licenciamento ambiental, baseados predominantemente em limites de níveis de pressão sonora e distâncias fixas, mostram-se insuficientes para representar a complexidade do tema.

Esta dissertação teve como objetivo desenvolver e aplicar uma abordagem integrada para gestão do ruído ambiental em complexos eólicos, desde a caracterização sonora até a avaliação e gestão do ruído ambiental em complexos eólicos no contexto do semiárido brasileiro, considerando os aspectos físicos, ecológicos, construtivos, psicoacústicos e psicossociais. O estudo foi conduzido em um complexo eólico localizado em municípios do Agreste de Pernambuco, envolvendo campanhas de medições acústicas, modelagem computacional da propagação sonora conforme a ISO 9613-2, avaliação do nível de pressão sonora do som residual,

específico e total, investigação de infrassom e sons de baixas frequências, análise da influência da cobertura vegetal nativa por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), onde foi possível verificar os efeitos complementares da mitigação do nível de pressão sonora do som específico, através da conservação da cobertura vegetal nativa e fazer uma projeção dos ganhos com a restauração das áreas no entorno dos receptores no bioma Caatinga, foi realizado também ensaios de isolamento acústico em residências e aplicação de questionários de percepção e incômodo baseados na ABNT NBR ISO 15666.

Os resultados demonstraram elevada confiabilidade da modelagem acústica, validada em 235 receptores, com índice de assertividade de 97,02%. A cobertura vegetal apresentou importante associação com os níveis de pressão sonora do som específico, indicando potencial de mitigação acústica associado à conservação e à restauração da cobertura vegetal nativa. As avaliações de infrassom e sons de baixas frequências atenderam aos critérios estabelecidos pela norma alemã de referência DIN 45680, enquanto os ensaios de isolamento de fachada nas residências receptoras evidenciaram a necessidade de melhorias construtivas nas edificações avaliadas, cenário típico do semiárido brasileiro. Os resultados perceptivos confirmaram que a percepção de incômodo com o ruído proveniente dos aerogeradores é influenciada não apenas pela exposição sonora, mas também pelas características construtivas das residências e pela sensibilidade individual dos moradores, bem como pelo histórico de relacionamento socioambiental com o empreendimento.

Como principal contribuição, a pesquisa demonstra que a gestão do ruído ambiental em complexos eólicos deve adotar uma abordagem integrada e multifatorial, baseada em evidências e capaz de articular caracterização acústica, modelagem, monitoramento, percepção humana e estratégias socioambientais de mitigação. Como produto técnico, foi desenvolvido o Guia Técnico para Gestão Integrada do Ruído Ambiental em Complexos Eólicos, estruturado para apoiar empreendedores, profissionais, consultorias e órgãos ambientais na tomada de decisão durante as fases de planejamento, licenciamento, operação e monitoramento de empreendimentos eólicos. A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento científico sobre acústica ambiental aplicada à energia eólica e fornece subsídios para o aperfeiçoamento das práticas de gestão socioambiental e da futura regulamentação brasileira sobre o tema.

Palavras-chave: ruído ambiental; energia eólica; acústica ambiental; modelagem acústica; NDVI; percepção de incômodo; mitigação acústica; gestão socioambiental; parques eólicos.

ABSTRACT

Abstract of the Final Work presented to the Professional Master's Program in Biodiversity Conservation and Sustainable Development in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master

RUÍDO AMBIENTAL NO SETOR EÓLICO: CARACTERIZAÇÃO E MITIGAÇÃO

By

JARBAS AMARO DE SOUZA FILHO

September 2026

Advisor: Prof. Dr. ALEXANDRE UEZU

The expansion of renewable energy sources, among which wind power stands out as essential to Brazil's energy transition and energy security, has increased the need to improve the instruments used for environmental noise assessment and management in wind power projects. Although wind energy plays a strategic role in energy security and in the decarbonization of the electricity matrix, the criteria traditionally applied in environmental licensing, based predominantly on sound pressure level limits and fixed distances, have proven insufficient to represent the complexity of the subject.

This dissertation aimed to develop and apply an integrated approach to environmental noise management in wind farm complexes, from sound characterization to the assessment and management of environmental noise in the context of the Brazilian semi-arid region, considering physical, ecological, constructive, psychoacoustic, and psychosocial aspects. The study was conducted at a wind farm complex located in municipalities of the Agreste region of Pernambuco and involved acoustic measurement campaigns; computational modeling of sound propagation in

accordance with ISO 9613-2; assessment of residual, specific, and total sound pressure levels; investigation of infrasound and low-frequency sounds; and analysis of the influence of native vegetation cover using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which made it possible to verify the complementary mitigation effects on specific sound pressure levels provided by the conservation of native vegetation cover and to project the gains achievable through the restoration of areas surrounding the receptors in the Caatinga biome. Façade sound insulation tests were also carried out in residences, together with the application of perception and annoyance questionnaires based on ABNT NBR ISO 15666.

The results demonstrated the high reliability of the acoustic modeling, validated at 235 receptors with an accuracy rate of 97.02%. Vegetation cover showed a relevant association with specific sound pressure levels, indicating an acoustic mitigation potential associated with the conservation and restoration of native vegetation. The infrasound and low-frequency sound assessments met the criteria established by the German reference standard DIN 45680, while the façade insulation tests at the receiving residences revealed the need for constructive improvements in the buildings assessed, a typical scenario in the Brazilian semi-arid region. The perception results confirmed that noise annoyance related to wind turbines is influenced not only by sound exposure, but also by the constructive characteristics of the dwellings, the individual sensitivity of residents, and the history of the social and environmental relationship with the project.

As its main contribution, this research demonstrates that environmental noise management in wind farm complexes should adopt an integrated, multifactorial, evidence-based approach capable of articulating acoustic characterization, modeling, monitoring, human perception, and social-environmental mitigation strategies. As a technical product, the Technical Guide for the Integrated Management of Environmental Noise in Wind Farm Complexes was developed, structured to support developers, professionals, consultancies, and environmental agencies in decision-making throughout the planning, licensing, operation, and monitoring phases of wind power projects. This research contributes to the advancement of scientific knowledge on environmental acoustics applied to wind energy and provides support for the improvement of social-environmental management practices and of future Brazilian regulation on the subject.

Keywords: environmental noise; wind energy; environmental acoustics; acoustic modeling; NDVI; noise annoyance perception; acoustic mitigation; social-environmental management; wind farms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Curva de ponderação em frequência A	51
Figura 1.2 – Curva de ponderação em frequência C	53
Figura 1.3 – Curvas de ponderação A e C em função da frequência	54
Figura 1.4 – Esquema do ambiente aerodinâmico de uma pá de aerogerador, destacando a turbulência atmosférica incidente, a camada limite da pá, a formação de vórtices de ponta e o mecanismo de geração de ruído no bordo de fuga	57
Figura 1.5 – Representação esquemática do cisalhamento vertical e horizontal do vento no plano do rotor de aerogeradores	67
Figura 1.6 – Representação esquemática da modulação de amplitude em um sinal sonoro	70
Figura 2.1 – Perfil horário médio anual da velocidade do vento a 80 m de altura (W_{80})	106
Figura 2.2 – Distribuição de frequência dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) para $W_{80} = 7,0$ m/s ($n = 239$ receptores)	108
Figura 2.3 – Boxplot dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) para $W_{80} = 7,0$ m/s ($n = 239$ receptores)	108
Figura 2.4 – Distribuição dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) por faixa de distância ao aerogerador mais próximo ($W_{80} = 7,0$ m/s)	109
Figura 2.5 – Relação entre os níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) e a distância ao aerogerador mais próximo, com curva de regressão logarítmica ajustada ($W_{80} = 7,0$ m/s, $n = 239$ receptores)	112
Figura 2.6 – Mapa coroplético e curvas de isófonas do zoneamento acústico proposto para o Complexo Eólico	115
Figura 2.7 – Comparação entre níveis L_{Aeq} simulados e L_{sp} medidos em campo ($n = 235$ receptores, $U = \pm 5$ dB)	121
Figura 2.8 – Resíduos da validação acústica: diferença entre L_{Aeq} simulado e L_{sp} medido em campo por distância ao aerogerador mais próximo ($n = 235$ receptores, $U = \pm 5$ dB)	122

Figura 3.1 – Frequência da velocidade do vento na nacele, agrupada por faixas de 2 m/s, durante as campanhas de medição (n = 237 receptores)	132
Figura 3.2 – Distribuição dos níveis de L_{Aeq} do som residual nos receptores avaliados, com linhas de referência normativa de 35 dB(A) e 40 dB(A) (ABNT NBR 10151:2019 – Área Rural)	136
Figura 3.3 – Boxplot dos níveis de L_{Aeq} do som residual, com indicação dos limites normativos rurais de 35 dB(A) e 40 dB(A) (ABNT NBR 10151:2019)	136
Figura 3.4 – Som residual (L_{Aeq}) registrado por receptor, ordenado por distância crescente ao aerogerador mais próximo	137
Figura 3.5 – Distribuição do som residual por classe de distância (boxplot), considerando os 237 receptores com dados válidos	138
Figura 3.6 – Relação entre NDVI e nível de pressão sonora do som residual por classe de distância, com reta de regressão linear simples (n = 225)	145
Figura 3.7 – Diagrama de dispersão do nível de pressão sonora do som residual em função do NDVI, com reta de regressão linear simples e intervalo de confiança de 95% (n = 225)	146
Figura 4.1 – Área de estudo: estado de Pernambuco, Brasil, com a localização do complexo eólico e dos receptores de medição	155
Figura 4.2 – Distribuição espacial dos receptores de medição sobrepostos ao mapa de cobertura vegetal (NDVI) derivado do Sentinel-2 (10 m). Tons de verde mais escuros indicam maior densidade de vegetação	157
Figura 4.3 – Classificação ecológica dos valores de NDVI em quatro classes de cobertura vegetal, calibrada em relação às fisionomias da Caatinga	158
Figura 4.4 – Diagrama de dispersão de L_{sp} versus $\log_{10}(\text{distância})$ com ajuste de regressão log-linear e intervalo de confiança de 95%	159
Figura 4.5 – Diagrama de dispersão de L_{sp} versus NDVI com reta de regressão	160
Figura 4.6 – Diagramas de dispersão estratificados por distância de L_{sp} versus NDVI por classe de distância, com retas de regressão e intervalos de confiança de 95%	162

Figura 4.7 – Redução projetada de L_{sp} em função do nível de restauração da vegetação ($\Delta NDVI$), estratificada por classe de distância	163
Figura 5.1 – Curvas de resposta em frequência das ponderações (a) A e (b) C	172
Figura 5.2 – Diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ por receptor, com linha de referência normativa de 20 dB (DIN, 1997). Receptores ordenados por distância crescente ao aerogerador mais próximo	179
Figura 5.3 – Níveis sonoros equivalentes contínuos ponderados L_{Ceq} e L_{Aeq} em função da distância ao aerogerador mais próximo	180
Figura 5.4 – Espectro externo em 1/3 de oitava do som total (8 Hz a 100 Hz) nos dez receptores, com a faixa de infrassom (< 20 Hz) destacada e a média energética do conjunto	181
Figura 5.5 – Projeção dos níveis equivalentes ponderados L_{Ceq} e L_{Aeq} até 1.000 m, com distinção entre a faixa medida e a faixa extrapolada	183
Figura 5.6 – Projeção da diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ até 1.000 m, com a linha de referência normativa de 20 dB (DIN, 1997) e distinção entre a faixa medida e a faixa extrapolada	184
Figura 6.1 – Diferença padronizada de nível por banda de um terço de oitava na residência R1 (345 m), antes e depois da intervenção	200
Figura 6.2 – Diferença padronizada de nível por banda de um terço de oitava na residência R2 (449 m), antes e depois da intervenção	200
Figura 6.3 – Ganho de isolamento de fachada por banda de um terço de oitava nas residências R1 e R2	202
Figura 7.1 – Modelo conceitual da percepção de impacto do ruído de aerogeradores adotado no estudo	210
Figura 7.2 – Incômodo geral relatado antes e depois das intervenções, por residência	217
Figura 7.3 – Frequência de percepção do ruído antes e depois das intervenções, por residência	218

Figura 8.1 – Modelo conceitual do guia técnico de gestão integrada do ruído ambiental em complexos eólicos, com retroalimentação do monitoramento às três dimensões condicionantes 232

Figura 8.2 – Comparação entre o critério de raio fixo e o zoneamento acústico variável validado, com as implicações sociais de cada abordagem (n = 239 receptores) 235

Figura 9.1 – Integração das dimensões do ruído ambiental e dos capítulos da dissertação 246

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Fatores de ponderação A por bandas de oitava	52
Tabela 1.2 – Fatores de ponderação C por bandas de oitava	53
Tabela 1.3 – Correções aplicadas pelas ponderações A e C por bandas de oitava	54
Tabela 1.4 – Níveis máximos de pressão sonora equivalentes permitidos pela ABNT NBR 10151:2019, em dB(A)	72
Tabela 2.1 – Espectro de potência sonora por banda de oitava (LW [dB]) por faixa de velocidade do vento (W_{80}) – Aerogerador GE 1.7-100, nacele a 80 m	103
Tabela 2.2 – Potência sonora global (LwA) ajustada e declarada pelo fabricante por faixa de velocidade – Aerogerador GE 1.7-100	104
Tabela 2.3 – Distribuição anual dos registros horários de W_{80} por faixa de velocidade do vento a 80 m de altura (complexo eólico)	105
Tabela 2.4 – Estatísticas descritivas dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) para $W_{80} = 7,0$ m/s ($n = 239$ receptores)	107
Tabela 2.5 – Estatística descritiva do som total, do som residual e da diferença aritmética total – residual por classe de distância ao aerogerador mais próximo ($n = 225$ receptores com dados válidos para Lsp)	113
Tabela 2.6 – Comparação entre níveis sonoros simulados e som residual em função da distância ao aerogerador ($W_{80} = 7,0$ m/s)	114
Tabela 2.7 – Comparação entre critério radial fixo e modelo acústico variável ($n = 239$ receptores)	117
Tabela 2.8 – Indicadores estatísticos da validação da modelagem acústica ($n = 235$ receptores, critério ± 5 dB)	118
Tabela 3.1 – Estatísticas descritivas da velocidade do vento na nacele durante as campanhas de medição de som residual ($n = 237$ receptores)	132
Tabela 3.2 – Estatísticas descritivas do som residual (L_{Aeq}) nos receptores avaliados ($n = 237$)	134
Tabela 3.3 – Estatística descritiva do L_{Aeq} simulado ($W_{80} = 7,0$ m/s), do som residual e do Lsp calculado por classe de distância	139

Tabela 3.4 – Comparação entre L_{Aeq} simulado, som residual e diferença média por grupo de distância ($n = 235$)	140
Tabela 3.5 – Avaliação do ambiente sonoro natural pelos respondentes ($n = 5$, estudo piloto)	143
Tabela 4.1 – Distribuição dos receptores de medição por classe de distância	158
Tabela 4.2 – Modelos de regressão linear simples para o nível sonoro específico L_{sp} [dB(A)]. Erros padrão robustos HC3 aplicados	159
Tabela 4.3 – Modelo de regressão linear múltipla ($n = 225$). Erros padrão robustos HC3	161
Tabela 4.4 – Regressão linear simples estratificada por distância de NDVI versus L_{sp} por classe de distância. Classes de distância definidas por medição contínua até a turbina mais próxima	162
Tabela 4.5 – Redução projetada de L_{sp} [dB(A)] em função do nível de restauração da vegetação ($\Delta NDVI$) e da classe de distância. Coluna Geral derivada do modelo de regressão múltipla ($\beta = -7,68$; HC3); colunas estratificadas provenientes das regressões simples por classe de distância	162
Tabela 5.1 – Fatores das ponderações A e C por bandas de oitava, em dB	173
Tabela 5.2 – Níveis de pressão sonora ponderados em C e em A e diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ nos receptores avaliados, em ambiente externo às edificações residenciais (som total; $W_{80} > 7,0$ m/s)	178
Tabela 5.3 – Níveis de pressão sonora em 1/3 de oitava nas bandas de infrassom (8 Hz a 20 Hz) e nível global de infrassom por receptor, em ambiente externo	181
Tabela 5.4 – Comparação entre o decaimento teórico (divergência geométrica, ISO 9613-2) e o decaimento observado por regressão log-linear, e níveis projetados a 1.000 m	182
Tabela 6.1 – Diferença padronizada de nível ponderada de fachada antes e depois das intervenções de mitigação	198
Tabela 6.2 – Diferença padronizada de nível por bandas de um terço de oitava (dB), antes e depois das intervenções	199

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Estrutura do zoneamento acústico proposto para o complexo eólico (n = 239 receptores, $W_{80} = 7,0$ m/s)	116
Quadro 4.1 – Classificação da cobertura vegetal com base nos intervalos de NDVI observados, calibrada em relação às fisionomias da Caatinga (RODRIGUES LEMOS et al., 2018)	157
Quadro 6.1 – Caracterização construtiva das residências avaliadas em sua condição anterior à intervenção	195
Quadro 6.2 – Critérios e níveis de desempenho mínimo de isolamento a ruído aéreo de vedações externas (dormitórios), conforme a ABNT NBR 15575-4:2021	198
Quadro 7.1 – Residências e delineamento da avaliação antes e depois	215
Quadro 7.2 – Incômodo geral e noturno, avaliação do ambiente sonoro e sensibilidade, antes e depois, por residência	216
Quadro 7.3 – Frequência e período de percepção do ruído, antes e depois, por residência	217
Quadro 7.4 – Modelo construtivo das residências e incômodo geral relatado	219
Quadro 7.5 – Síntese dos achados e diálogo com a literatura	222
Quadro 8.1 – Referenciais normativos nacionais e internacionais aplicados no guia técnico	233
Quadro 8.2 – Síntese operacional do guia técnico de gestão integrada do ruído em complexos eólicos	238
Quadro 8.3 – Hierarquia de controle do ruído e evidência correspondente	239
Quadro 8.4 – Recomendações para o setor e para os órgãos ambientais	239
Quadro 9.1 – Síntese integrada dos resultados por capítulo	247
Quadro 9.2 – Atendimento aos objetivos específicos da pesquisa	249

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT NBR ISO 15666	Acústica – Avaliação do incômodo causado por ruído ambiental (questionários)
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
dB	Decibel
dB(A)	Decibel ponderado em A
ΔL	Incremento sonoro (diferença entre níveis sonoros)
DIN 45680	Norma alemã para avaliação de ruído de baixa frequência
GW	Gigawatt
GWEC	Global Wind Energy Council
HC3	Estimador de erros-padrão robustos à heterocedasticidade (tipo 3)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEC	International Electrotechnical Commission
IFC	International Finance Corporation
ISO	International Organization for Standardization
ISO 9613-1/2	Normas para modelagem e propagação sonora
ISO/TS 15666	Norma para avaliação de incômodo pelo ruído (socioacústica)
L_{Aeq}	Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A
L_{Ceq}	Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em C
LCOE	Custo nivelado de energia (Levelized Cost of Energy)
L_{sp}	Nível de pressão sonora específica (som específico)
MAE	Erro médio absoluto (Mean Absolute Error)

MW	Megawatt
NBR	Norma Brasileira
NBR 10151	Norma para medição e avaliação de ruído ambiental no Brasil
NBR 10152	Níveis de conforto acústico em ambientes internos
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NIR	Near Infrared / Infravermelho próximo
QGIS	Quantum GIS
RMSE	Erro quadrático médio (Root Mean Square Error)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIN	Sistema Interligado Nacional
VLF	Very Low Frequency / Baixa Frequência
W₈₀	Velocidade do vento na altura de 80 m
WG-AEN	Working Group – Assessment of Exposure to Noise
WHO	World Health Organization (Organização Mundial da Saúde)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	29
RUÍDO AMBIENTAL EM PARQUES EÓLICOS	29
1 INTRODUÇÃO	29
1.1 Segurança energética e expansão da energia eólica	29
1.2 Fundamentos físicos do ruído de aerogeradores	30
1.3 Baixas frequências, infrassom e critérios técnicos	31
1.4 Modulação de amplitude e características temporais	31
1.5 Incômodo sonoro e dimensão psicossocial	32
1.6 Marco regulatório brasileiro	32
1.7 Lacuna científica e justificativa	33
1.8 Problema de pesquisa	33
2 REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1 Histórico mundial da energia eólica e sua relevância na matriz e transição energética	35
2.2 Contextualização da energia eólica no Brasil e sua relevância na matriz e transição energética	38
2.3 Ruído ambiental no setor eólico: sua relevância, desafios e evolução do tema	41
2.4 Dimensão social do ruído em parques eólicos e percepção das comunidades	42
2.5 Desafios da gestão socioambiental do ruído em parques eólicos	43
2.6 Arcabouço regulatório e normativo aplicável ao ruído ambiental	45
2.7 Conceitos básicos de acústica	45
2.7.1 Nível de pressão sonora e nível sonoro equivalente (L_{Aeq})	47
2.7.2 Nível de potência sonora	48
2.7.3 Ponderação em frequência	49
2.8 Mecanismos físicos de geração do ruído em parques eólicos: fundamentos de dinâmica dos fluidos e aeroacústica	54
2.8.1 Turbulência atmosférica e produção sonora	56
2.8.2 Ruído de camada limite e bordo de fuga	57
2.8.3 Estol, separação de escoamento e não estacionariedade aerodinâmica	58

2.8.4 Vórtices de ponta e estruturas coerentes	59
2.8.5 Interação pá–torre	60
2.8.6 Ruído mecânico e transmissão vibroacústica	60
2.8.7 Síntese física do processo de geração sonora	61
2.9 Infrassom e ruído de baixa frequência: fundamentação normativa segundo a DIN 45680:1997	62
2.10 Caracterização do ruído ambiental: conceitos, variáveis e desafios técnicos	63
2.10.1 Fluxo de vento, cisalhamento e implicações para o ruído ambiental em aerogeradores	63
2.10.2 Estol dinâmico e sua relação com o ruído em aerogeradores	64
2.10.3 Modelos de propagação sonora e acurácia preditiva	65
2.10.4 Cisalhamento do vento e implicações para o ruído ambiental	65
2.10.5 Modelos de Propagação Sonora: Avanços e Limitações	66
2.10.6 Modulação de Amplitude e sua Relevância no Ruído Ambiental de Aerogeradores	68
2.11 Papel do licenciamento ambiental e lacunas normativas no Brasil	70
2.12 Conflitos socioambientais, ruído ambiental e riscos para empreendimentos eólicos	73
2.13 Importância da percepção sonora: aspectos psicossocial e psicoacústico	75
2.14 Justificativa científica: lacunas na literatura brasileira	78
2.15 Problema de pesquisa	78
3 OBJETIVOS	79
3.1 Objetivo geral	79
3.2 Objetivos específicos	79
4 CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO GERAL	80
4.1 Caracterização do contexto socioambiental do complexo eólico	80
4.2 Bioma Caatinga	82
4.3 Comunidades	83
4.4 Dados do complexo eólico	85
4.5 Uso e ocupação do solo	85

4.6 Histórico socioambiental	86
REFERÊNCIAS	88
CAPÍTULO 2	94
CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO AMBIENTAL EM PARQUES EÓLICOS	94
1 INTRODUÇÃO	95
2 REFERENCIAL TEÓRICO	96
2.1 Som específico e sua relevância para a gestão territorial do ruído	96
2.2 Modelos de propagação sonora: comparação e seleção	97
2.3 Contextualização normativa	98
3 METODOLOGIA	99
3.1 Área de estudo e caracterização do complexo	99
3.2 Modelo de propagação sonora e parâmetros da simulação	99
3.3 Potências sonoras: ajuste por medições in situ	100
3.4 Regime anemométrico e cenário de referência ($W_{80} = 7,0$ m/s)	100
3.5 Análise estatística e zoneamento acústico	101
3.6 Validação por medições de campo	101
4 RESULTADOS	102
4.1 Potências sonoras utilizadas no modelo de simulação	102
4.2 Regime anemométrico e justificativa do cenário $W_{80} = 7,0$ m/s	104
4.3 Estatísticas descritivas dos níveis L_{Aeq} simulados	105
4.4 Correlação entre L_{Aeq} simulado e distância ao aerogerador	108
4.4.1 Fundamentação física da atenuação sonora	109
4.4.2 Resultados da correlação	109
4.4.3 Regressão logarítmica	109
4.5 Som específico por classe de distância e sua relevância para a gestão territorial	111
4.6 Predominância do nível de pressão sonora do som específico em relação ao som residual	112
4.7 Mapa coroplético e curvas de isófonas: caracterização espacial do ruído	113
4.8 Estrutura do zoneamento acústico proposto	114
4.9 Análise comparativa: modelo variável por zonas versus critério de raio fixo de 500 m	115
4.10 Validação da caracterização acústica - modelagem computacional	117

5 DISCUSSÃO	121
6 CONCLUSÕES	123
REFERÊNCIAS	124
CAPÍTULO 3	127
SOM RESIDUAL E PAISAGEM SONORA	127
1 INTRODUÇÃO	128
1.1 Conceito de som residual no contexto do estudo	128
2 PROCEDIMENTO DE CARACTERIZAÇÃO DO SOM RESIDUAL	130
2.1 Critério de desligamento e raio de exclusão	130
2.2 Condições meteorológicas das campanhas	130
2.3 Incerteza associada às medições de som residual	132
3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO SOM RESIDUAL	133
3.1 Estatísticas descritivas	133
3.2 Distribuição dos níveis de som residual	134
3.3 Distribuição por classe de distância	136
4 RELAÇÃO ENTRE SOM RESIDUAL, OPERAÇÃO DOS AEROGERADORES E SOM ESPECÍFICO	137
4.1 Distinção conceitual e metodológica	137
4.2 Nível de pressão sonora simulado, residual e específico por classe de distância	138
4.3 Predominância do som específico em relação ao som residual	139
4.4 Validação da modelagem acústica	141
5 ELEMENTOS DA PAISAGEM SONORA NO ENTORNO DOS RECEPTORES	142
5.1 Composição do ambiente acústico preexistente	142
5.2 Percepção do ambiente sonoro natural pelos moradores	143
6 INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS LOCAIS	144
6.1 Cobertura vegetal Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e nível de pressão sonora do som residual	144
6.1.1 Base de dados e procedimento de cálculo do NDVI	144
6.1.2 Resultados da análise global e por classe de distância	144
6.2 Velocidade do vento e ambiente acústico preexistente	146
6.3 Bioma Caatinga: contexto ecológico e sonoro	147

7 IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO ACÚSTICA E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	148
8 LIMITAÇÕES DA ANÁLISE	149
REFERÊNCIAS	150
CAPÍTULO 4	152
EFEITO DA COBERTURA VEGETAL NA PROPAGAÇÃO DO RUÍDO DE	152
TURBINAS EÓLICAS NO BIOMA CAATINGA, BRASIL	152
RESUMO	153
1 INTRODUÇÃO	154
2 METODOLOGIA	155
2.1 Área de estudo	155
2.2 Medições acústicas e cálculo do nível sonoro específico	156
2.3 Dados do NDVI	156
2.4 Análise estatística	158
3 RESULTADOS	159
3.1 Estatísticas descritivas e modelos de regressão simples	159
3.2 Decaimento do nível sonoro específico com a distância	159
3.3 Associação entre NDVI e nível sonoro específico	160
3.4 Modelo de regressão múltipla	160
3.5 Análise estratificada por distância	161
3.6 Projeção da redução do ruído por restauração da vegetação	162
4 DISCUSSÃO	163
5 CONCLUSÕES	165
REFERÊNCIAS	166
CAPÍTULO 5	168
INFRASSOM E RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA EM PARQUES EÓLICOS:	
AVALIAÇÃO EM RECEPTORES RESIDENCIAIS	168
RESUMO	169
1 INTRODUÇÃO	169
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	171
2.1 Ponderações em frequência A, C e G e sua relevância para baixas frequências	171
2.2 Fundamentação normativa: DIN 45680	172

2.3 Infrassom e modulação de amplitude de baixa frequência: distinção técnica	173
2.4 Lacuna normativa brasileira e o contexto do setor eólico	174
3 METODOLOGIA	174
3.1 Área de estudo e caracterização do empreendimento	174
3.2 Critério normativo e procedimento de avaliação	174
3.3 Receptores e condições de medição	175
3.4 Instrumentação	175
3.5 Incerteza e representatividade das medições	176
4 RESULTADOS	176
4.1 Diferença aritmética $L_{\sim Ceq} - L_{\sim Aeq}$ por receptor	176
4.2 Análise gráfica dos resultados	177
4.3 Caracterização espectral do infrassom e da baixa frequência	179
4.4 Projeção dos níveis até 1.000 m	181
5 DISCUSSÃO	183
6 LIMITAÇÕES DA ANÁLISE	184
7 CONCLUSÕES	185
REFERÊNCIAS	185
CAPÍTULO 6	188
MITIGAÇÃO ACÚSTICA RESIDENCIAL EM COMUNIDADES DO ENTORNO DE COMPLEXOS EÓLICOS NO SEMIÁRIDO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ISOLAMENTO DE FACHADA EM CENÁRIO ANTES E DEPOIS	188
RESUMO	188
1 INTRODUÇÃO	189
2 REFERENCIAL TEÓRICO	190
2.1 Estratégias de mitigação do ruído eólico: fonte, trajetória e receptor	190
2.2 Desempenho acústico de fachada e marco normativo	191
2.3 Construção rural do semiárido e suscetibilidade ao ruído	191
2.4 Critérios de priorização e aceitabilidade social das intervenções	192
2.5 A mitigação como opção técnica, social e estratégica de gestão do ruído	192
3 METODOLOGIA	193
3.1 Área de estudo e residências avaliadas	193
3.2 Ensaio de isolamento de ruído aéreo de fachada	195

3.3 Intervenção de mitigação executada	195
3.4 Avaliação perceptiva complementar	196
4 RESULTADOS	196
4.1 Critério normativo de referência	196
4.2 Desempenho de isolamento antes e depois das intervenções	197
4.3 Caracterização espectral do isolamento	197
4.4 Resposta perceptiva posterior às intervenções	201
5 DISCUSSÃO	202
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	204
REFERÊNCIAS	204
CAPÍTULO 7	207
PERCEPÇÃO DE IMPACTO DO RUÍDO EM COMUNIDADES DO ENTORNO DE COMPLEXOS EÓLICOS NO SEMIÁRIDO: UMA AVALIAÇÃO ANTES E DEPOIS DE INTERVENÇÕES DE MITIGAÇÃO ACÚSTICA	207
RESUMO	207
1 INTRODUÇÃO	208
2 REFERENCIAL TEÓRICO	209
2.1 O incômodo sonoro como fenômeno multifatorial	209
2.2 Sensibilidade individual ao ruído	210
2.3 O modelo conceitual de Guski	210
2.4 Fatores não acústicos e contexto rural do semiárido	211
2.5 Modelo construtivo rural e transmissão do ruído ao interior	211
2.6 O instrumento ABNT NBR ISO 15666	212
3 METODOLOGIA	212
3.1 Área de estudo, amostra e delineamento	212
3.2 Instrumento e variáveis	213
3.3 Análise dos dados	213
4 RESULTADOS	214
4.1 Caracterização da amostra	214
4.2 Incômodo relatado antes e depois	214
4.3 Frequência e período de percepção: avaliação qualitativa	216
4.4 Modelo construtivo das residências e percepção de impacto	218
5 DISCUSSÃO	219
6 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	222

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	223
REFERÊNCIAS	223
CAPÍTULO 8	226
GUIA PARA A GESTÃO INTEGRADA DO RUÍDO AMBIENTAL EM COMPLEXOS EÓLICOS	226
RESUMO	226
ABSTRACT	226
1 INTRODUÇÃO	227
1.1 Principais contribuições	228
2 FUNDAMENTOS DA GESTÃO INTEGRADA DO RUÍDO AMBIENTAL	228
2.1 Da conformidade pontual à governança socioambiental	228
2.2 As três dimensões de fatores condicionantes	229
2.3 Base normativa e a lacuna regulatória brasileira	230
3 ESTRUTURA DO GUIA TÉCNICO: METODOLOGIA DE GESTÃO INTEGRADA	231
3.1 Eixo 1: caracterização e diagnóstico acústico	231
3.2 Eixo 2: análise integrada e zoneamento acústico	232
3.3 Eixo 3: plano de ação e priorização de medidas	233
3.4 Eixo 4: implementação das medidas de mitigação	233
3.5 Eixo 5: monitoramento, avaliação e melhoria contínua	234
4 SÍNTESE OPERACIONAL E RESULTADOS DE REFERÊNCIA	234
5 RECOMENDAÇÕES PARA O SETOR E PARA OS ÓRGÃOS REGULADORES	235
6 LIMITAÇÕES E CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO	236
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	237
REFERÊNCIAS	237
CAPÍTULO 9	240
INTEGRAÇÃO E CONCLUSÕES GERAIS	240
1 RETOMADA DO PROBLEMA E DOS OBJETIVOS	240
2 SÍNTESE INTEGRADA DOS RESULTADOS	241
3 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS	244
4 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	245
4.1 Contribuição científica	245
4.2 Contribuição metodológica	246

4.3 Contribuição aplicada	246
4.4 Contribuição regulatória	246
5 LIMITAÇÕES GERAIS DO ESTUDO	247
6 RECOMENDAÇÕES E PESQUISAS FUTURAS	247
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	248
REFERÊNCIAS	249

APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em nove capítulos, estruturados de modo a conduzir o leitor da contextualização do problema à proposição de um instrumento de gestão integrada do ruído ambiental em complexos eólicos. Os Capítulos 2 a 8 foram concebidos como estudos autônomos, em formato de artigo, cada um com introdução, material e métodos, resultados, discussão e referências próprias, o que permite a leitura independente de cada capítulo; por essa razão, informações essenciais de contexto são retomadas, de forma sucinta, em cada um deles. Apresentam-se, a seguir, o conteúdo e o objetivo de cada capítulo.

O Capítulo 1 contextualiza a expansão da energia eólica no Brasil e o desafio do ruído ambiental no semiárido nordestino, apresenta o referencial teórico, a lacuna científica, o problema de pesquisa, os objetivos e a caracterização do contexto socioambiental do complexo eólico estudado.

O Capítulo 2 tem por objetivo caracterizar acusticamente o complexo eólico por meio de modelagem computacional fundamentada na ISO 9613-2, calibrada por medições *in situ*, analisando o som específico e sua relação com a distância, propondo o zoneamento acústico do território como instrumento de gestão e validando o modelo por medições de campo.

O Capítulo 3 tem por objetivo caracterizar o som residual e a paisagem sonora do território, analisando os fatores meteorológicos, ecológicos e de infraestrutura que condicionam o ambiente acústico preexistente e sua relação com o som específico dos aerogeradores.

O Capítulo 4 reproduz o artigo publicado nos Proceedings of INTER-NOISE 2026 e tem por objetivo avaliar o efeito da cobertura vegetal, expressa pelo NDVI, sobre a propagação do ruído de aerogeradores no bioma Caatinga.

O Capítulo 5 tem por objetivo caracterizar o conteúdo de baixa frequência e infrassom do som na área de influência do complexo, empregando o critério de triagem LCeq – LAeq da norma DIN 45680 e a caracterização espectral em bandas de 1/3 de oitava.

O Capítulo 6 tem por objetivo avaliar, sob delineamento quase-experimental do tipo antes e depois, o desempenho de intervenções de isolamento acústico de fachada em duas residências do entorno do complexo, comparando os resultados aos patamares normativos da ABNT NBR 15575-4:2021.

O Capítulo 7 tem por objetivo avaliar a percepção de impacto sonoro dos moradores, com foco nas dimensões psicoacústica e psicossocial do incômodo, verificando se as intervenções de mitigação acústica de fachada se associam à redução do incômodo relatado, por meio do instrumento da ABNT NBR ISO 15666:2022.

O Capítulo 8 tem por objetivo consolidar um guia técnico para a gestão integrada do ruído ambiental em complexos eólicos, estruturado em cinco eixos e fundamentado nas evidências produzidas nos capítulos anteriores.

O Capítulo 9, por fim, integra os resultados, retoma o problema e as perguntas de pesquisa, avalia o atendimento aos objetivos e apresenta as contribuições, limitações e desdobramentos da pesquisa.

CAPÍTULO 1

RUÍDO AMBIENTAL EM PARQUES EÓLICOS

1 INTRODUÇÃO

1.1 Segurança energética e expansão da energia eólica

A geração de energia eólica é uma das principais fontes de energia renovável no mundo, com capacidade instalada de 1.136 GW em 2024 (GWEC, 2025).

No Brasil, a eólica já representa uma das principais fontes renováveis da matriz elétrica, com destaque para o Nordeste, que reúne condições excepcionais de vento, alto fator de capacidade e disponibilidade territorial. Esse cenário fortalece a projeção de que a participação da eólica continuará crescendo nas próximas décadas, desempenhando papel central na segurança energética e na redução de emissões de gases de efeito estufa. Contudo, essa expansão intensifica as interações com comunidades locais e evidencia a necessidade de aprimoramento do conhecimento socioambiental, bem como das ferramentas de avaliação, gestão e mitigação de impactos, de modo a garantir que o setor avance de forma sustentável, contribuindo para uma transição energética limpa, de baixo carbono e socialmente justa.

A transição energética global tem sido estruturada a partir da necessidade de mitigação das mudanças climáticas, redução das emissões de gases de efeito estufa e diversificação das matrizes energéticas nacionais, consolidando as fontes renováveis como eixo central das políticas energéticas contemporâneas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022; GWEC, 2023).

Nesse contexto, a energia eólica destaca-se como uma das tecnologias de maior crescimento nas últimas duas décadas, impulsionada por avanços tecnológicos e ganhos de escala industrial.

O desenvolvimento tecnológico dos aerogeradores, com aumento da altura das torres, do diâmetro dos rotores e da potência unitária instalada, contribuiu para a redução do custo de energia, ampliando a competitividade da fonte frente a alternativas convencionais (GWEC, 2023). Tais avanços consolidaram a energia eólica como componente estratégico da descarbonização dos sistemas elétricos nacionais (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).

A participação crescente da fonte na matriz elétrica nacional reforça seu papel estruturante na segurança energética e na redução da dependência hidrológica sazonal.

Entretanto, a expansão territorial dos parques eólicos tem intensificado a interface entre empreendimentos e comunidades locais, trazendo novos desafios socioambientais associados à implantação e operação desses sistemas de geração (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Entre tais desafios, o ruído ambiental emerge como dimensão técnica complexa e socialmente sensível.

1.2 Fundamentos físicos do ruído de aerogeradores

O som emitido por aerogeradores é predominantemente de origem aerodinâmica, estando associado à interação entre as pás e o escoamento atmosférico incidente (BROOKS; POPE; MARCOLINI, 1989). Estudos clássicos de aeroacústica demonstram que o ruído de bordo de fuga (*trailing-edge noise*) constitui a principal fonte sonora em condições normais de operação.

A geração do ruído aerodinâmico decorre das flutuações turbulentas da camada limite desenvolvida sobre a superfície das pás, cuja interação com descontinuidades geométricas converte energia cinética em energia acústica propagante (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). A intensidade sonora apresenta dependência não linear da velocidade do vento, sendo frequentemente descrita por relações de potência entre velocidade do escoamento e nível de emissão sonora.

Além do ruído aerodinâmico, componentes mecânicos associados ao conjunto multiplicador e gerador podem contribuir para o espectro sonoro, embora em turbinas modernas tais componentes sejam significativamente mitigados por avanços de engenharia e encapsulamento estrutural (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Dessa forma, o perfil espectral típico de aerogeradores contemporâneos apresenta predominância em faixas médias de frequência.

A propagação do som em ambientes externos é influenciada por divergência geométrica, fatores ambientais, absorção atmosférica dependente da frequência, efeito do solo e condições meteorológicas, sendo amplamente modelada segundo a metodologia estabelecida na ISO 9613-2 (ISO, 1996). Essa modelagem considera parâmetros como coeficiente de absorção do solo, gradientes térmicos e distância fonte-receptor.

Em regiões semiáridas, as características de rugosidade do terreno, cobertura vegetal e variabilidade térmica podem alterar significativamente os padrões de propagação sonora, influenciando os níveis percebidos nas áreas receptoras (ISO, 1996). Tal complexidade reforça a necessidade de avaliações locais fundamentadas em medições e modelagens consistentes.

1.3 Baixas frequências, infrassom e critérios técnicos

A discussão sobre baixas frequências e infrassom em parques eólicos tem sido recorrente na literatura, especialmente no que se refere à sua possível relevância perceptiva (DIN, 1997). A norma alemã DIN 45680 estabelece critérios para avaliação de componentes tonais e dominância de baixa frequência em ambientes.

A diferença entre níveis ponderados em C e A ($L_{Ceq} - L_{Aeq}$) é frequentemente utilizada como critério indicativo de predominância de baixa frequência, sendo valores superiores a 20 dB considerados potencialmente relevantes do ponto de vista perceptivo (DIN, 1997). Entretanto, estudos indicam que aerogeradores modernos raramente apresentam dominância significativa nessa faixa quando avaliados em condições típicas de operação (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

1.4 Modulação de amplitude e características temporais

A modulação de amplitude caracteriza-se por variações periódicas do nível sonoro ao longo do tempo, frequentemente associadas ao cisalhamento vertical do vento e à interação pá–torre (VAN DEN BERG, 2006). Esse fenômeno pode aumentar a percepção de impacto do ruído mesmo quando os níveis médios permanecem dentro dos limites normativos.

Estudos indicam que a presença de flutuações rítmicas pode intensificar a percepção de intrusividade, influenciando a resposta subjetiva ao ruído (VAN DEN BERG, 2006).

1.5 Incômodo sonoro e dimensão psicossocial

O incômodo sonoro é reconhecido como fenômeno multifatorial, envolvendo a interação entre exposição acústica objetiva e variáveis psicossociais (GUSKI, 1999). A resposta ao ruído não depende exclusivamente do nível de pressão sonora, mas também de fatores como sensibilidade individual, saúde, fatores sociais e histórico com o empreendimento.

A Organização Mundial da Saúde destaca que o incômodo ambiental constitui efeito adverso à saúde, podendo impactar bem-estar, qualidade do sono e percepção de qualidade de vida (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Nesse sentido, a avaliação do ruído deve incorporar dimensões perceptivas sociais além dos parâmetros físicos tradicionais.

Pesquisas em psicoacústica demonstram que características espectrais e temporais do som influenciam sua percepção subjetiva (SCHROEDER; FASTL, 1999). Assim, a análise integrada entre dados instrumentais e avaliação perceptiva torna-se fundamental em estudos aplicados.

1.6 Marco regulatório brasileiro

No Brasil, a ABNT NBR 10151:2019 estabelece os procedimentos para medição e avaliação de ruído ambiental, definindo critérios de aceitabilidade vinculados ao zoneamento urbano municipal (ABNT, 2019). A Resolução CONAMA nº 01/1990 complementa esse arcabouço normativo ao estabelecer diretrizes gerais para o controle da poluição sonora no país. Por sua vez, a Resolução CONAMA nº 462/2014 dispõe sobre os procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre, estabelecendo critérios para o enquadramento ambiental e para a definição da necessidade de estudos ambientais específicos, com base na sensibilidade ambiental da área e nos potenciais impactos socioambientais associados à atividade.

Entretanto, muitos municípios onde se localizam parques eólicos não dispõem de zoneamento urbano formalizado, o que gera incertezas quanto à aplicação prática dos limites estabelecidos pela norma (ABNT, 2019). Soma-se a isso o fato de a legislação brasileira ainda apresentar limitações quanto à definição objetiva de critérios específicos para a avaliação e a gestão do ruído em empreendimentos

eólicos, sobretudo no que se refere a distâncias mínimas de instalação, métricas acústicas complementares e avaliação da percepção das comunidades receptoras. Essa ausência de normatização específica, clara e de interpretação uniforme pode resultar em heterogeneidade de entendimento entre empreendimentos e órgãos licenciadores, ampliando a insegurança técnica e jurídica no setor (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

1.7 Lacuna científica e justificativa

Apesar da existência de literatura sobre ruído de turbinas eólicas em diversos países, ainda há escassez de estudos integrados no contexto brasileiro que integrem, de forma estratégica, todas as camadas para gestão da temática, em suas dimensões físicas, ecológicas e sociais, como medições acústicas, modelagem de caracterização do ruído, análise do espectro sonoro, som específico, total e residual e avaliações de infrassom, além das questões social e perceptiva estruturadas (ISO, 1996; GUSKI, 1999).

Grande parte dos estudos disponíveis concentra-se em contextos europeus, australianos e japoneses cujas condições climáticas, construtivas e normativas diferem substancialmente do semiárido nordestino brasileiro (GWEC, 2023). Tal diferença limita a extrapolação direta de resultados, impactos e ações de mitigação socioambiental no contexto brasileiro.

Com isso, torna-se relevante desenvolver estudos e pesquisas alinhadas ao contexto brasileiro, integrando dimensões físicas, sociais, normativas e psicossociais, de modo a subsidiar decisões técnicas baseadas em evidências científicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A expansão da energia eólica no Brasil consolidou o país como uma das principais referências mundiais na produção de energia renovável (ABEEÓLICA, 2024). Sua rápida inserção na matriz elétrica nacional tem contribuído significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, e para a diversificação das fontes energéticas (ABEEÓLICA, 2024). Entretanto, o crescimento da indústria eólica também trouxe novos desafios socioambientais, entre eles o debate sobre o ruído ambiental proveniente da operação de aerogeradores, especialmente em regiões do Nordeste brasileiro. Nesse contexto, a compreensão da dinâmica do ruído ambiental, de suas implicações técnicas e de seus desdobramentos sociais torna-se essencial para o fortalecimento das práticas socioambientais e para a convivência harmônica entre empreendimentos e comunidades do entorno. Diante desse cenário, esta dissertação analisará o ruído ambiental em parques eólicos sob múltiplas dimensões, combinando elementos técnicos, sociais e operacionais. Os resultados contemplam um conjunto articulado de avaliações, entre as quais se destacam: (i) métodos de caracterização e simulação da propagação sonora gerada pelos aerogeradores; (ii) análise do som residual e de suas variações territoriais; (iii) investigação dos componentes de baixa frequência e infrassom; (iv) definição de áreas de sensibilidade acústica e de zonas de gestão socioambiental; (v) avaliação de estratégias de realocação de residências quando tecnicamente indispensáveis; (vi) proposição de medidas de mitigação de ruído aplicáveis às residências e ao entorno; (vii) comparação entre metodologias de gestão socioambiental baseadas em critérios de distância fixa e abordagens derivadas de modelagem acústica; (viii) análise dos aspectos sociais e da percepção comunitária sobre o ruído; e (ix) consolidação de um guia técnico-operacional para orientar empreendedores, profissionais e órgãos ambientais na gestão do ruído em complexos eólicos.

2.1 Histórico mundial da energia eólica e sua relevância na matriz e transição energética

O desenvolvimento moderno da energia eólica está diretamente associado às crises energéticas da década de 1970, que estimularam países industrializados a buscar alternativas aos combustíveis fósseis e a diversificar suas matrizes energéticas. A partir desse período, sobretudo na Europa e nos Estados Unidos, intensificaram-se os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e demonstração tecnológica, culminando na consolidação dos aerogeradores de eixo horizontal como padrão dominante. Desde então, o setor eólico tem apresentado crescimento acelerado, caracterizado pelo aumento da potência unitária das máquinas, elevação da altura das torres, ampliação do diâmetro dos rotores e significativa redução dos custos de geração ao longo do tempo (GWEC, 2023).

Nas últimas duas décadas, a energia eólica assumiu papel estratégico no contexto da transição energética global, tornando-se uma das principais fontes renováveis responsáveis pela expansão da capacidade instalada de geração elétrica no mundo. De acordo com a Agência Internacional de Energia, a energia eólica figura entre as tecnologias-chave para a mitigação das mudanças climáticas, em função de sua elevada maturidade tecnológica, competitividade econômica e baixo impacto em emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022). Esse protagonismo é reforçado por compromissos internacionais voltados à descarbonização dos sistemas energéticos, como o Acordo de Paris, que estabelecem metas de redução de emissões e incentivam a substituição progressiva de fontes fósseis por fontes renováveis.

Além de sua contribuição ambiental, a energia eólica apresenta relevância crescente na segurança energética e no desenvolvimento socioeconômico, ao reduzir a dependência de recursos energéticos importados, diversificar a matriz elétrica e estimular cadeias produtivas locais. Em diversos países, a expansão da energia eólica tem sido associada à geração de empregos, ao desenvolvimento regional e à interiorização da produção de energia, especialmente em áreas rurais e periféricas. Nesse sentido, a consolidação da energia eólica como componente estruturante da matriz elétrica mundial reflete não apenas avanços tecnológicos, mas também transformações econômicas, políticas e sociais inerentes ao processo de transição e

segurança energética em escala global (REN21, 2023; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022; GWEC, 2023).

A análise da evolução histórica da capacidade eólica instalada evidencia trajetórias distintas entre os continentes, refletindo diferenças em políticas energéticas, maturidade tecnológica, disponibilidade de recursos e arranjos institucionais.

A Europa desempenhou papel pioneiro na consolidação da energia eólica moderna, liderando a expansão global até o início da década de 2010, impulsionada por políticas de incentivo, metas climáticas e forte integração ao planejamento energético (GWEC, 2023).

A Ásia, por sua vez, apresenta crescimento acelerado a partir de 2010, assumindo a liderança global em capacidade instalada, sobretudo em função da rápida expansão da China e de investimentos em larga escala voltados à segurança energética e à redução de emissões (GWEC, 2023).

A América do Norte registra crescimento contínuo e consistente, com destaque para os Estados Unidos, onde a energia eólica tornou-se componente relevante da matriz elétrica em diversos estados, apoiada por mecanismos de incentivo e leilões competitivos (GWEC, 2023).

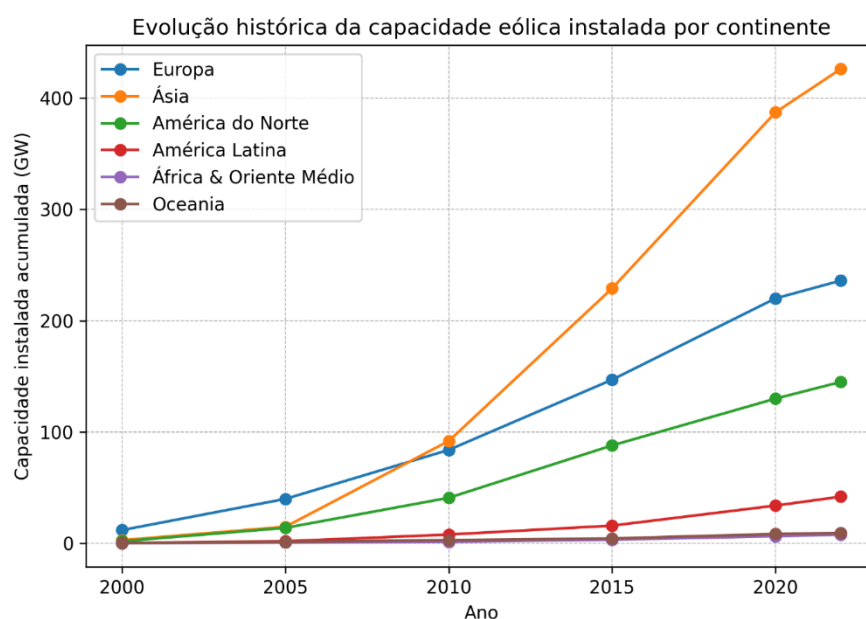
A América Latina apresenta expansão mais recente, intensificada a partir de 2015, com destaque para Brasil, México e Chile, refletindo a incorporação da energia eólica como alternativa competitiva e estratégica em sistemas elétricos em expansão (GWEC, 2023).

A África e o Oriente Médio, bem como a Oceania, exibem participação ainda modesta no total global, embora com tendência de crescimento, associada à ampliação de investimentos, à redução de custos tecnológicos e à busca por diversificação da matriz energética (GWEC, 2023).

A Austrália destaca-se como um dos principais mercados da Oceania, apresentando crescimento consistente da capacidade instalada ao longo das últimas duas décadas. A expansão da energia eólica no país está fortemente associada à

abundância de recursos eólicos de alta qualidade, especialmente nas regiões costeiras e no sul do território, bem como à adoção de políticas nacionais voltadas à redução de emissões de gases de efeito estufa e à diversificação da matriz elétrica (GWEC, 2023). A Austrália vem ampliando de forma contínua sua capacidade eólica onshore, consolidando essa fonte como um componente relevante de seu sistema elétrico (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). A International Energy Agency ressalta que a energia eólica desempenha papel estratégico na transição energética australiana, ao contribuir para a redução da dependência de combustíveis fósseis, historicamente predominantes no país, e para o fortalecimento da segurança energética. Nesse sentido, embora a participação australiana no total global ainda seja modesta quando comparada a grandes mercados como Europa, Ásia e América do Norte, o país representa um exemplo de integração progressiva da energia eólica em uma matriz elétrica em transformação.

De forma geral, a evolução da capacidade instalada ao longo das últimas duas décadas demonstra a consolidação da energia eólica como uma das principais fontes renováveis no contexto da transição e segurança energética global, com papel crescente na descarbonização dos sistemas elétricos e na diversificação das matrizes energéticas em diferentes regiões do mundo.



A Figura apresenta a evolução histórica da capacidade eólica instalada por continente, evidenciando a liderança inicial da Europa e a posterior

ascensão da Ásia como principal polo de expansão da energia eólica em escala global. Observa-se ainda o crescimento consistente da América do Norte e a expansão recente da América Latina, enquanto África, Oriente Médio e Oceania mantêm participação relativa menor, porém em trajetória ascendente.

Fonte dos dados: relatórios do **Global Wind Energy Council (GWEC)** – valores consolidados e arredondados para fins acadêmicos (2000–2022).

2.2 Contextualização da energia eólica no Brasil e sua relevância na matriz e transição energética

Nas últimas duas décadas, a energia eólica consolidou-se como uma das principais fontes renováveis da matriz elétrica brasileira, desempenhando papel estratégico na expansão da geração limpa e na transição e segurança energética do país. O setor apresentou crescimento acelerado, impulsionado por condições favoráveis de vento, avanços tecnológicos e sucessivos ciclos de investimentos e incentivos governamentais. Em 2024, o Brasil encerrou o ano com 33,7 GW de potência instalada, distribuídos em 1.103 usinas e 11.720 aerogeradores em operação, um crescimento de 10,76% em relação ao ano anterior, representando 16,1% da matriz elétrica nacional e consolidando a fonte eólica como a segunda maior da geração elétrica do país (ABEEÓLICA, 2024). No cenário global, o setor registrou em 2024 um recorde histórico de 117 GW de nova capacidade instalada, com projeção de quase 1 TW de instalações adicionais até 2030, sinalizando o papel central da energia eólica na agenda climática e energética internacional (GWEC, 2025).

A representatividade da energia eólica no Sistema Interligado Nacional (SIN) vem crescendo de forma consistente, atingindo 22,6% da geração total nos meses de maior intensidade dos ventos, especialmente no segundo semestre, o que reforça seu papel como fonte confiável e essencial para o atendimento energético do país (ABEEÓLICA, 2024). Em termos de eficiência, ao longo de 2024 a geração eólica totalizou 107,58 TWh, um aumento de 12% em relação ao ano anterior. Em seu pico, a fonte chegou a suprir 129% da demanda do Nordeste, exportando excedentes para outras regiões, resultado da elevada concentração de parques nos estados da Bahia,

Rio Grande do Norte e Piauí, que se destacaram entre os maiores produtores de energia eólica do país (ABEEÓLICA, 2024).

Apesar desse desempenho robusto, o ano de 2024 também marcou um momento de inflexão. O setor registrou, pela primeira vez em sua história, uma desaceleração na adição de nova capacidade, com apenas 76 novas usinas e 3,3 GW instalados, em comparação aos 4,8 GW e 123 usinas em 2023 (ABEEÓLICA, 2024). O volume de investimentos totalizou R\$ 10,1 bilhões, reflexo de uma crise iniciada ao final de 2023, caracterizada pela redução na contratação de novos projetos e pelos cortes de geração impostos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Ainda assim, o Brasil subiu uma posição no ranking mundial, alcançando o 5º lugar em capacidade eólica onshore instalada, atrás apenas de China (478,8 GW), Estados Unidos (154,1 GW), Alemanha (63,7 GW) e Índia (48,2 GW) (GWEC, 2025). Esse cenário reforça a relevância estratégica da fonte, mas também evidencia a necessidade de aperfeiçoamento regulatório, fortalecimento institucional e maior integração entre aspectos técnicos, sociais e ambientais.

O crescimento da energia eólica no Brasil tem ampliado o debate sobre seus impactos socioambientais, entre os quais o ruído ambiental se destaca como um dos temas mais importantes e menos compreendidos. À medida que os aerogeradores se aproximam de comunidades rurais e povoados, especialmente no Nordeste, emergem conflitos que extrapolam a dimensão técnica. Estudos nacionais documentam que os principais impactos sobre essas comunidades incluem conflitos fundiários, discussões contratuais em arrendamentos, e questões relacionadas à saúde associados ao ruído (SANTANA; SILVA, 2021; CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017).

Compreender o ruído ambiental em parques eólicos vai além da medição objetiva em decibel (dB). Essa compreensão envolve a integração de variáveis técnicas, físicas, sociais, psicossociais e psicoacústicas, considerando fatores como condições meteorológicas, distâncias, padrões de ocupação territorial e, sobretudo, a percepção humana, que não se limita à intensidade sonora, mas abrange significado, contexto e vulnerabilidade socioambiental (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). A pesquisa científica demonstra que fatores subjetivos, como atitudes em relação aos complexos eólicos, benefícios econômicos percebidos, sensação de equidade no processo de planejamento e expectativas negativas formadas nas comunidades, exercem influência tão ou mais determinante sobre o incômodo do que o nível de pressão sonora propriamente dito (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MICHAUD

et al., 2016). Nesse sentido, o *Loudness* (sonoridade percebida) emerge como um preditor mais robusto do incômodo do que o simples nível equivalente ponderado em A (L_{Aeq}), pois incorpora a resposta perceptiva do sistema auditivo humano às características espectrais e temporais do som (MANOHARE et al., 2026).

Estudos com abordagem psicoacústica demonstram ainda que a resposta ao ruído de turbinas eólicas é altamente dependente da sensibilidade individual ao ruído. Manohare et al. (2026), em estudo conduzido na Irlanda com 46 participantes e dados de campo coletados em 14 pontos de monitoramento ao redor de parques eólicos, desenvolveram modelos de mapeamento de incômodo integrando indicadores psicoacústicos, especialmente *Loudness*, com níveis de sensibilidade sonora individual. Os resultados evidenciaram que indivíduos com baixa sensibilidade apresentaram probabilidade de incômodo inferior a 0,13 além de 500 m, enquanto aqueles com sensibilidade média experimentaram probabilidades entre 0,10 e 0,20 até 1.500 m. Indivíduos com alta sensibilidade, por sua vez, apresentaram probabilidades de incômodo elevadas (0,30 a 0,45) mesmo além de 1.000 m de distância dos aerogeradores. Esses achados evidenciam que distâncias mínimas fixas são insuficientes como único critério regulatório, reforçando a necessidade de abordagens baseadas em aspectos físicos, ecológicos e sociais, além da variabilidade perceptiva populacional (MANOHARE et al., 2026).

Enquanto países com longa tradição eólica já desenvolveram metodologias consolidadas de medição, modelagem e mitigação, o Brasil ainda enfrenta desafios de ordem técnica, normativa e social que precisam ser superados para garantir a sustentabilidade do setor. Entre eles, destacam-se: a diversidade de realidades socioeconômicas e construtivas das residências nas áreas de influência dos parques; a ausência de diretrizes nacionais específicas para avaliação do ruído eólico; as limitações normativas no campo da acústica ambiental; os conflitos sociais decorrentes de processos de comunicação inadequados e falhas na gestão socioambiental dos empreendimentos; e a baixa compreensão técnica sobre o tema tanto por parte das comunidades quanto dos órgãos licenciadores.

Nesse contexto, este capítulo apresenta o panorama geral da energia eólica no Brasil, contextualizando sua importância estratégica, seu desempenho recente e os desafios emergentes na gestão do ruído ambiental. A partir dessa base, os subtópicos seguintes aprofundarão aspectos centrais para a compreensão do problema de pesquisa, abrangendo suas dimensões social, normativa, técnica e científica.

2.3 Ruído ambiental no setor eólico: sua relevância, desafios e evolução do tema

O ruído ambiental associado à operação de aerogeradores consolidou-se como um dos principais elementos de atenção no licenciamento e na gestão socioambiental de parques eólicos. O tema ganhou relevância crescente à medida que os empreendimentos se aproximaram de áreas rurais habitadas, onde o nível de pressão sonora residual é naturalmente baixo e, por consequência, a percepção de incômodo tende a ser amplificada mesmo em níveis de exposição moderados (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; KUWANO et al., 2014).

O ruído gerado por turbinas eólicas possui características acústicas próprias que o distinguem de outras fontes de ruído ambiental. Sua origem é predominantemente aerodinâmica, resultante da interação das pás com o escoamento de ar, e se manifesta com variabilidade temporal associada às flutuações do vento, presença de componentes de baixa frequência e modulação de amplitude periódica, frequentemente descrita pelos moradores como um som pulsante ou de "batimento" (LARATRO et al., 2014; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Essas características conferem ao ruído eólico um caráter particular, que não é adequadamente capturado por métricas convencionais baseadas apenas no nível equivalente ponderado em A (L_{Aeq}), limitando a capacidade de avaliação dos impactos reais sobre as comunidades receptoras (FIELDS, 1998; MANOHARE et al., 2026).

A evolução tecnológica dos aerogeradores ao longo das últimas décadas resultou em ganhos expressivos de eficiência e em redução das emissões mecânicas, historicamente associadas a caixas de transmissão e componentes rotativos internos. No entanto, o aumento progressivo das dimensões das máquinas, com torres que superam 100 m de altura e pás que alcançam mais de 80 m de comprimento, modificou os padrões de propagação sonora, ampliando o alcance espacial das emissões e intensificando a contribuição de componentes de infrassom e baixa frequência (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Esse paradoxo tecnológico, máquinas mais silenciosas individualmente, porém com maior alcance acústico, representa um dos desafios centrais da acústica ambiental aplicada ao setor eólico.

Compreender a dinâmica acústica do ruído eólico e sua interação com fatores ambientais, territoriais e sociais é, portanto, condição fundamental para o adequado

gerenciamento dos impactos socioambientais dos parques eólicos. Essa compreensão demanda abordagens que integrem a mensuração objetiva do som com a avaliação da percepção e do incômodo das comunidades, reconhecendo que a resposta humana ao ruído é mediada não apenas por sua intensidade, mas por dimensões psicoacústicas, contextuais e individuais que os critérios normativos vigentes ainda não incorporam de forma plena (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MANOHARE et al., 2026).

2.4 Dimensão social do ruído em parques eólicos e percepção das comunidades

A percepção do ruído pelas comunidades do entorno de parques eólicos é determinada por um conjunto de fatores que vai muito além do nível sonoro fisicamente mensurado. Elementos psicossociais como expectativa em relação ao empreendimento, grau de confiança nas empresas responsáveis, histórico de relacionamento socioambiental, sensação de equidade no processo de licenciamento e características culturais locais exercem influência significativa sobre a forma como o som é percebido e avaliado pelos moradores (GUSKI, 1999; KUWANO et al., 2014; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2014; ALAMIR et al., 2019). Dessa forma, dois moradores expostos ao mesmo nível de ruído podem apresentar respostas completamente distintas, a depender de sua relação com o empreendimento e de sua sensibilidade individual ao som.

Em áreas rurais, onde o silêncio predomina durante grande parte do dia e especialmente à noite, o contraste entre a paisagem sonora pré-existente e o ruído introduzido pelos aerogeradores — somado ao modelo construtivo precário das residências em regiões do semiárido brasileiro — tende a amplificar a percepção de incômodo. Pesquisas demonstram que a sensibilidade individual ao ruído é um dos mais fortes preditores de incômodo, independentemente do nível de pressão sonora absoluto (MANOHARE et al., 2026).

O ruído eólico, mesmo quando tecnicamente enquadrado nos limites normativos vigentes, pode provocar incômodo, afetar a qualidade do sono, reduzir a qualidade de vida e gerar conflitos socioambientais de difícil mediação (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MICHAUD et al., 2016). Esse fenômeno é agravado quando o processo de implantação do empreendimento não envolve adequadamente as

comunidades, quando a comunicação sobre os impactos esperados é insuficiente ou quando os moradores sentem que suas preocupações não foram consideradas pelas instâncias decisórias. Estudos no contexto brasileiro evidenciam que comunidades rurais do Nordeste frequentemente relatam não ter sido consultadas de forma adequada antes da instalação dos parques, o que aprofunda a desconfiança e amplifica a percepção negativa dos impactos, incluindo o ruído (CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; SANTANA; SILVA, 2021).

A análise da dimensão social do ruído é, portanto, indispensável para compreender como as populações percebem o empreendimento e como o ruído impacta sua rotina e seu bem-estar. Mais do que um problema acústico, trata-se de um problema de governança socioambiental, que exige abordagens participativas, comunicação transparente e critérios de avaliação que incorporem a variabilidade perceptiva das comunidades receptoras.

2.5 Desafios da gestão socioambiental do ruído em parques eólicos

A gestão do ruído ambiental no setor eólico envolve desafios que articulam dimensões técnicas, sociais e regulatórias de forma interdependente. A variabilidade do vento, a heterogeneidade das paisagens rurais, a diversidade de modelos e configurações de aerogeradores e a proximidade de residências e comunidades tradicionais exigem análises robustas, metodologias integradas e abordagens adaptadas às especificidades locais (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Medidas de mitigação eficazes demandam a articulação entre engenharia acústica, modelagem de propagação sonora, gestão operacional dos aerogeradores, comunicação social transparente e programas socioambientais que considerem a percepção e as vulnerabilidades das comunidades receptoras.

A dimensão técnica da gestão é particularmente complexa porque o ruído eólico não se comporta como fontes convencionais de ruído ambiental. Sua intensidade varia conforme a velocidade e direção do vento, as condições atmosféricas, a topografia local, vegetação e a distância dos receptores, o que torna os limites normativos baseados em médias temporais ponderadas em A, como o L_{Aeq} , insuficientes para capturar adequadamente o impacto percebido pelas comunidades (SOUZA FILHO et al., 2026; PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MÜLLER et al., 2023). A ausência de métricas complementares, como caracterização do ruído,

ecologia de paisagem, indicadores de modulação de amplitude e parâmetros sociais e psicoacústicos, impõe restrições à avaliação dos impactos reais sobre a qualidade de vida dos moradores.

No plano regulatório, a inexistência de normas específicas para o ruído ambiental em parques eólicos no Brasil representa uma lacuna crítica. A ABNT NBR 10151:2019, embora fundamental para a avaliação do ruído ambiental em geral, não contempla as características próprias do som gerado por aerogeradores, tampouco define critérios de distância, métricas acústicas específicas ou protocolos de monitoramento contínuo para empreendimentos eólicos (ABNT, 2019). Essa ausência gera heterogeneidade interpretativa entre empreendimentos e órgãos licenciadores, ampliando a insegurança técnica e jurídica no setor e dificultando a tomada de decisão por parte de empreendedores, comunidades e autoridades ambientais (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Por fim, a dimensão socioambiental da gestão do ruído é frequentemente subestimada. Estudos demonstram que a resposta ao ruído não depende exclusivamente de seus atributos físicos, sendo fortemente mediada por variáveis contextuais como a confiança no empreendimento, a percepção de equidade no processo de licenciamento, o histórico de relacionamento entre empresa e comunidade e a sensibilidade individual ao som (GUSKI, 1999; BOTELHO et al., 2017). Nesse sentido, programas de gestão socioambiental que desconsideram essas variáveis tendem a amplificar os conflitos, mesmo quando os níveis sonoros medidos se encontram dentro dos limites normativos vigentes.

2.6 Arcabouço regulatório e normativo aplicável ao ruído ambiental

No Brasil, a principal referência normativa para avaliação do ruído ambiental é a ABNT NBR 10151:2019, que estabelece procedimentos para medição e critérios de aceitabilidade vinculados ao zoneamento urbano municipal (ABNT, 2019). Sua aplicabilidade direta a parques eólicos apresenta limitações relevantes, especialmente em contextos rurais com baixa ambiência sonora, onde o contraste entre o nível residual e o ruído introduzido pelos aerogeradores amplifica a percepção de incômodo mesmo em níveis tecnicamente conformes (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004). Adicionalmente, muitos municípios com presença de parques eólicos não dispõem de

zoneamento urbano formalizado, o que gera incertezas quanto à aplicação prática dos limites estabelecidos pela norma.

No plano técnico, normas como a ISO 9613, utilizada para modelagem de propagação acústica em campo aberto, a série IEC 61400, que estabelece requisitos para medição e avaliação de ruído em turbinas eólicas, e a DIN 45680, voltada à avaliação de ruído de baixa frequência, oferecem subsídios metodológicos adicionais amplamente adotados em estudos e licenciamentos no setor eólico ao redor do mundo (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). A aplicação combinada dessas referências permite uma avaliação mais abrangente do impacto acústico, considerando tanto o espectro audível quanto as componentes de infrassom e baixa frequência características do ruído eólico.

A ausência de diretrizes nacionais claras, específicas e de interpretação uniforme para o setor evidencia a necessidade urgente de aprimoramento do marco regulatório brasileiro, acompanhado da evolução do conhecimento técnico e científico sobre as características do ruído eólico, seus impactos sobre as comunidades e as melhores práticas de monitoramento e mitigação.

2.7 Conceitos básicos de acústica

A avaliação do ruído ambiental associado à operação de parques eólicos exige a compreensão dos princípios fundamentais da acústica, uma vez que a geração, a propagação e a percepção do som estão diretamente relacionadas às propriedades físicas das ondas sonoras e à resposta do sistema auditivo humano. Os conceitos apresentados neste subtópico baseiam-se na literatura clássica de acústica ambiental, com destaque para Hansen, Doolan e Hansen (2017), e nas normas internacionais ISO 1996 e IEC 61672, que estabelecem os fundamentos para medição e avaliação do ruído ambiental.

Do ponto de vista físico, som e ruído correspondem ao mesmo fenômeno: flutuações da pressão atmosférica em torno de um valor médio. A distinção entre ambos é essencialmente subjetiva e depende do contexto, da duração da exposição e da sensibilidade individual. Um mesmo estímulo sonoro pode ser percebido como aceitável por determinados indivíduos e como ruído indesejado ou incômodo por outros, especialmente em áreas residenciais localizadas nas proximidades de

aerogeradores, onde a baixa ambiência sonora amplifica o contraste perceptivo (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; GUSKI, 1999).

O som é produzido por variações de pressão em um meio elástico, como o ar, geradas por superfícies vibrantes ou por escoamentos turbulentos. No caso dos aerogeradores, essas oscilações resultam predominantemente da interação aerodinâmica entre as pás e o escoamento do vento, incluindo fenômenos como turbulência de borda de fuga, desprendimento de vórtices e variações locais do ângulo de ataque. Contribuições de origem mecânica, associadas ao funcionamento de componentes internos como o gerador elétrico, a multiplicadora e os sistemas auxiliares, podem ocorrer, mas são em geral menos significativas em equipamentos modernos (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

A propagação sonora no ar ocorre por meio de ondas longitudinais, caracterizadas por sucessivas compressões e rarefações do meio, que transportam energia acústica sem deslocamento permanente das partículas. Durante esse percurso, o som sofre atenuações e modificações em função da distância percorrida, das condições meteorológicas, da topografia do terreno e das características de absorção do solo e vegetação, aspectos que serão aprofundados nos subtópicos seguintes (AYLOR, 1972; GRONBERG, 2015).

A grandeza física básica associada ao som é a pressão sonora (p), definida como a variação instantânea da pressão em relação à pressão atmosférica média. Para fins de análise e medição, utiliza-se o valor eficaz da pressão sonora, expresso por:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

em que $p(t)$ é a pressão sonora instantânea, em pascal (Pa); T é o intervalo de tempo de integração, em segundos (s); e p_{rms} é a pressão sonora eficaz, também expressa em pascal (Pa).

Embora as variações de pressão associadas ao som sejam extremamente pequenas em relação à pressão atmosférica, elas são prontamente detectáveis pelo sistema auditivo humano. A título de referência, um som com nível de pressão sonora de 100 dB corresponde a variações de pressão da ordem de 1/50.000 da pressão atmosférica, o que ilustra tanto a sensibilidade do ouvido humano quanto a

conveniência da escala logarítmica adotada para expressar níveis sonoros (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

2.7.1 Nível de pressão sonora e nível sonoro equivalente (L_{Aeq})

A grandeza fundamental utilizada na avaliação de ruído ambiental é o nível de pressão sonora, que expressa, em escala logarítmica, a razão entre a pressão sonora eficaz medida e uma pressão de referência padronizada. O nível de pressão sonora L_p é definido por:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right)^2$$

em que L_p é o nível de pressão sonora, expresso em decibéis (dB); p_{rms} é o valor eficaz da pressão sonora, em pascals (Pa); e p_0 é a pressão sonora de referência no ar, igual a 20 μ Pa.

O fator 20 na expressão decorre do fato de que a pressão sonora é proporcional à raiz quadrada da energia acústica. Como o nível sonoro é expresso em decibéis, grandeza logarítmica, a conversão de pressão para nível em dB exige o fator 20, ao contrário de grandezas diretamente energéticas, como a potência sonora, que utilizam o fator 10.

Em avaliações ambientais, o som varia continuamente ao longo do tempo, tornando inadequado o uso de valores instantâneos para representar a exposição sonora. Por esse motivo, as normas técnicas adotam o nível sonoro equivalente contínuo, L_{eq} , que representa o nível constante de som que, em um determinado período, contém a mesma energia acústica do som real, variável no tempo. Quando calculado com a aplicação da ponderação A, obtém-se o nível sonoro equivalente ponderado em A, L_{Aeq} , definido por:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right]$$

em que $L_{Aeq,T}$ é o nível sonoro equivalente ponderado em A para o intervalo de tempo T; $p_A(t)$ é a pressão sonora instantânea ponderada pela curva A; p_0 é a pressão de referência, igual a 20 μ Pa; e T é o período de integração, em segundos.

O L_{Aeq} é o principal descritor acústico utilizado em avaliações de ruído ambiental, pois integra simultaneamente a variação temporal do som e a sensibilidade

do ouvido humano em função da frequência (ABNT, 2019; ISO 1996). No contexto de parques eólicos, esse indicador é amplamente empregado para comparação com limites normativos, para análise de incômodo sonoro e para avaliação de impactos acústicos em comunidades localizadas no entorno dos empreendimentos (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Contudo, pesquisas recentes apontam que o L_{Aeq} , por ser um descritor energético médio, não captura adequadamente características intrusivas do ruído eólico, como a modulação de amplitude e os componentes de baixa frequência, que contribuem de forma significativa para o incômodo percebido pelas comunidades receptoras (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MÜLLER et al., 2023).

2.7.2 Nível de potência sonora

Outra grandeza fundamental é o nível de potência sonora, que representa a energia acústica total emitida por uma fonte, independentemente da distância ou das condições de propagação. É definido por:

$$L_W = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

em que L_W é o nível de potência sonora, em decibéis (dB); W é a potência sonora da fonte, em watts (W); e W_0 é a potência sonora de referência, igual a 10^{-12} W (1 picowatt), adotada pelas normas ISO 3740 a ISO 3747, ISO 1996 e IEC 60050.

Em estudos de ruído de parques eólicos, o nível de potência sonora dos aerogeradores constitui dado essencial para a modelagem da propagação sonora e para a previsão dos níveis de ruído nos pontos receptores. Os fabricantes de aerogeradores fornecem esse dado em função da velocidade do vento, servindo como entrada primária para simulações acústicas realizadas com modelos como o ISO 9613 e o CNOSSOS-EU (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

2.7.3 Ponderação em frequência

A percepção do som pelo ouvido humano varia significativamente em função da frequência. Para representar essa característica fisiológica nas medições acústicas, aplicam-se curvas de ponderação em frequência aos níveis de pressão sonora. As mais relevantes em estudos de ruído ambiental são as ponderações A e C. A ponderação A, que atenua as componentes de baixa e de muito alta frequência

em conformidade com a resposta auditiva humana em níveis moderados de pressão sonora, é a mais amplamente adotada em normas e regulamentos ambientais, incluindo a ABNT NBR 10151:2019 e as normas ISO 1996 (ABNT, 2019). A ponderação C, com resposta mais plana, é utilizada para avaliação de sons de alta intensidade e, no contexto eólico, tem sido empregada de forma complementar para a caracterização de componentes de baixa frequência e infrassom, cuja relevância perceptiva não é adequadamente representada pela ponderação A (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; ZAJAMŠEK et al., 2016).

A ponderação A, que resulta no nível de pressão sonora L_A , expresso em dB(A), aproxima a resposta do ouvido humano em níveis sonoros moderados, correspondendo à curva isofônica de 40 phon. Essa curva atenua de forma significativa as componentes de baixa frequência e, em menor grau, as de alta frequência, enfatizando a faixa entre aproximadamente 1 kHz e 5 kHz, onde a sensibilidade auditiva humana é maior.

Por essa razão, a ponderação A é amplamente adotada em normas técnicas e regulamentos ambientais para a avaliação de incômodo sonoro, incluindo a análise do ruído gerado por aerogeradores (ISO 226, 2003; IEC 61672-1, 2013; ABNT, 2019).

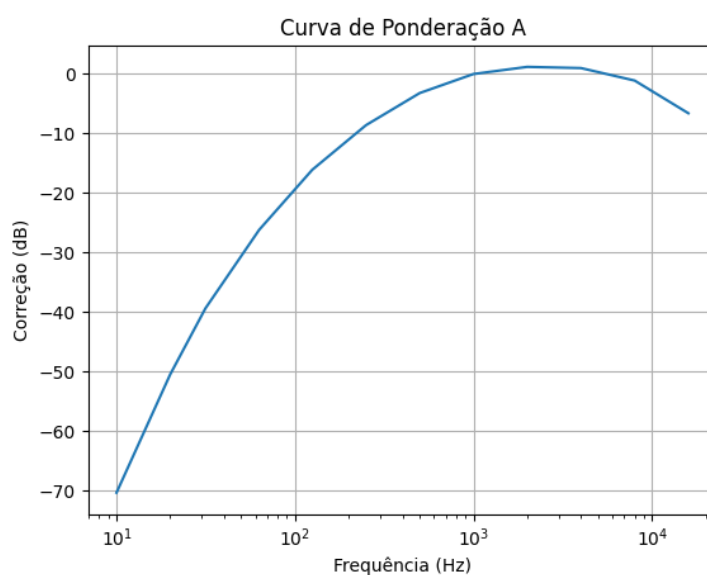


Figura 1.1 – Curva de ponderação em frequência A

Fonte: Adaptado de IEC 61672-1 (2013), ABNT NBR 10151 e (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017)

Tabela 1.1 – Fatores de ponderação A por bandas de oitava

Frequência (Hz)	A (dB)
31,5	-39,4
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1.000	0,0
2.000	+1,2
4.000	+1,0
8.000	-1,1

Fonte: IEC 61672-1 (2013).

A ponderação C resulta no nível de pressão sonora LC, expresso em dB(C), e representa a resposta do ouvido humano em níveis sonoros elevados, correspondendo a curvas isofônicas próximas a 100 phon. Sua resposta em frequência é praticamente plana ao longo da maior parte da faixa audível, com atenuação significativamente menor das componentes de baixa frequência em comparação à ponderação A. Por essa razão, a ponderação C é amplamente utilizada em análises complementares de ruído ambiental, especialmente na avaliação de sons com conteúdo relevante em baixas frequências e na comparação entre os níveis L_{Ceq} e L_{Aeq} (ISO 226, 2003; IEC 61672-1, 2013).

A diferença entre L_{Ceq} e L_{Aeq} é frequentemente utilizada como indicador da presença de componentes de baixa frequência no ruído ambiental. No contexto de parques eólicos, essa diferença assume particular relevância, uma vez que o ruído gerado por aerogeradores apresenta expressivo conteúdo espectral nas faixas de baixa frequência e infrassom, que não são adequadamente representadas pela ponderação A isoladamente (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; ZAJAMŠEK et al., 2016).

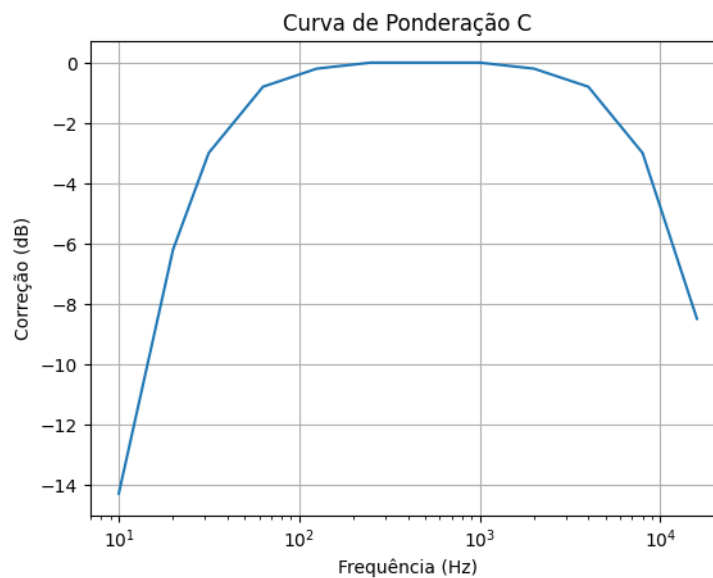


Figura 1.2 – Curva de ponderação em frequência C

Fonte: Adaptado de IEC 61672-1 (2013) e (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017)

Tabela 1.2 – Fatores de ponderação C por bandas de oitava

Frequência (Hz)	C (dB)
31,5	-3,0
63	-0,8
125	-0,2
250	0,0
500	0,0
1.000	0,0
2.000	-0,2
4.000	-0,8
8.000	-3,0

Fonte: IEC 61672-1 (2013).

A aplicação adequada das ponderações A e C, associada à correta interpretação dos níveis de pressão sonora e de potência sonora, é essencial para a caracterização do ruído de parques eólicos, permitindo uma avaliação mais precisa

de seus potenciais impactos sobre o conforto acústico e o bem-estar das comunidades do entorno.

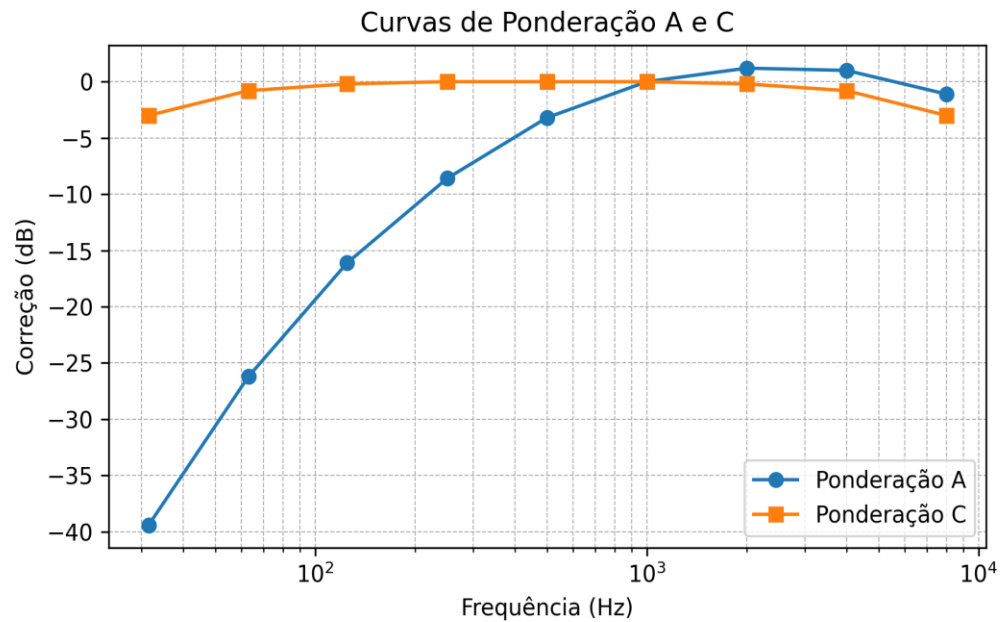


Figura 1.3 – Curvas de ponderação A e C em função da frequência

Fonte: IEC 61672-1 (2013).

Tabela 1.3 – Correções aplicadas pelas ponderações A e C por bandas de oitava

Frequência (Hz)	Correção A (dB)	Correção C (dB)
31,5	-39,4	-3,0
63	-26,2	-0,8
125	-16,1	-0,2
250	-8,6	0,0
500	-3,2	0,0
1.000	0,0	0,0
2.000	+1,2	-0,2
4.000	+1,0	-0,8
8.000	-1,1	-3,0

Fonte: IEC 61672-1 (2013).

Correções aplicadas pelas ponderações A e C para bandas de oitava.

A análise conjunta das ponderações A e C fornece informações complementares sobre a composição espectral do ruído ambiental, particularmente no que se refere à presença de componentes de baixa frequência. A diferença entre os níveis L_{Ceq} e L_{Aeq} é amplamente utilizada como indicador do peso relativo dessas componentes no espectro sonoro total: diferenças elevadas entre os dois descritores sinalizam conteúdo expressivo em baixas frequências, frequentemente associado a maior potencial de incômodo e a percepções subjetivas que a ponderação A, isoladamente, não é capaz de representar de forma adequada (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; ZAJAMŠEK et al., 2016).

No contexto de parques eólicos, essa relação assume especial relevância. O ruído gerado por aerogeradores apresenta componentes espectrais pronunciadas nas faixas de baixa frequência e infrassom, resultantes principalmente da interação aerodinâmica das pás com o escoamento do vento e dos efeitos de modulação de amplitude. Essas componentes, embora nem sempre audíveis de forma distinta, podem contribuir para o incômodo percebido pelas comunidades do entorno, mesmo quando os níveis medidos em dB(A) se encontram abaixo dos limites normativos vigentes (MØLLER; PEDERSEN, 2011; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2014). Dessa forma, a análise combinada das ponderações A e C constitui uma abordagem mais abrangente e tecnicamente consistente para a avaliação dos impactos acústicos em ambientes rurais e comunidades localizadas nas proximidades de empreendimentos eólicos.

2.8 Mecanismos físicos de geração do ruído em parques eólicos: fundamentos de dinâmica dos fluidos e aeroacústica

A geração de ruído em parques eólicos está fundamentalmente associada aos fenômenos de escoamento turbulento descritos pela dinâmica dos fluidos e à sua conversão em ondas acústicas, processo estudado no campo da aeroacústica. Em aerogeradores modernos, o ruído aerodinâmico é reconhecido como a principal fonte

de emissão sonora, superando as contribuições de origem mecânica, especialmente em turbinas de grande porte e velocidade variável (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012).

Do ponto de vista físico, o ruído aerodinâmico decorre de flutuações temporais e espaciais de pressão geradas por escoamentos não estacionários, governados pelas equações de Navier-Stokes para fluidos viscosos em regime de alto número de Reynolds. Nessas condições, típicas da operação de aerogeradores, parte da energia cinética associada à turbulência é convertida em energia acústica, ainda que com eficiência relativamente baixa (FFOWCS WILLIAMS; HAWKINGS, 1969; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). A presença de superfícies sólidas, como pás, torre e nacele, atua como elemento de espalhamento acústico, amplificando significativamente a radiação sonora ao transformar flutuações hidrodinâmicas convectivas em ondas acústicas propagantes (BROOKS; POPE; MARCOLINI, 1989; DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012).

Entre os diferentes mecanismos aerodinâmicos de geração sonora, o ruído produzido no bordo de fuga das pás é o mais relevante e amplamente reconhecido como a contribuição dominante para o espectro de ruído irradiado pelos aerogeradores. Esse mecanismo resulta da interação entre a camada-limite turbulenta que se desenvolve ao longo da superfície da pá e o bordo de fuga, onde as flutuações de pressão são convertidas em radiação acústica de banda larga (BROOKS; POPE; MARCOLINI, 1989; BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023). Outros mecanismos relevantes incluem o ruído de turbulência incidente, associado à interação das pás com a turbulência atmosférica, o ruído de vórtice de ponta de pá e o ruído tonal de baixa frequência originado pela passagem das pás pela esteira da torre (DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

As condições meteorológicas e atmosféricas exercem influência direta sobre as emissões acústicas dos aerogeradores, promovendo variações contínuas nos níveis de pressão sonora emitidos e propagados e modificando a percepção de incômodo pelos receptores. Em particular, a modulação de amplitude do ruído pode ser intensificada em condições de elevada estabilidade atmosférica noturna ou sob a influência de escoamentos em esteira de turbinas vizinhas, resultando em maior variabilidade temporal do sinal acústico e em potencial aumento do incômodo percebido pelas comunidades do entorno (HANSEN et al., 2021; VAN DEN BERG, 2006). Estudos de campo demonstram que a modulação de amplitude é um dos

fatores mais associados ao incômodo relatado por moradores próximos a parques eólicos, mesmo quando os níveis médios de L_{Aeq} se encontram dentro dos limites normativos (MÜLLER et al., 2023; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018).

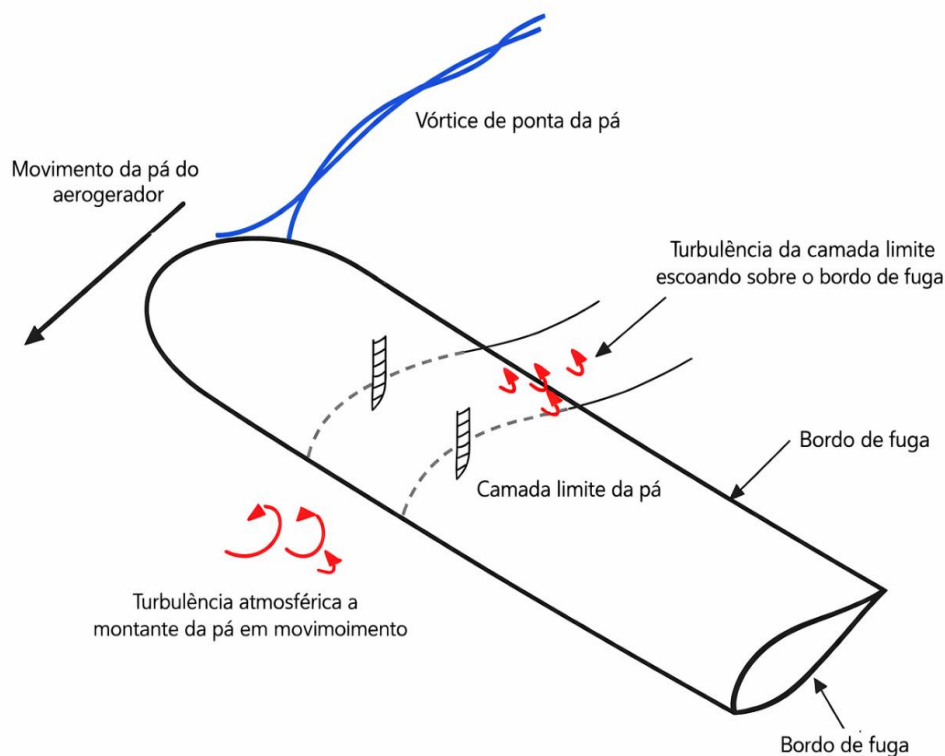


Figura 1.4 – Esquema do ambiente aerodinâmico de uma pá de aerogerador, destacando a turbulência atmosférica incidente, a camada limite da pá, a formação de vórtices de ponta e o mecanismo de geração de ruído no bordo de fuga

Fonte: Adaptado de (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017) e (DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017)

2.8.1 Turbulência atmosférica e produção sonora

A turbulência atmosférica incidente constitui a principal condição de contorno do problema aeroacústico em parques eólicos. Na altura típica do cubo do rotor, o escoamento apresenta um espectro energético amplo, com elevada concentração de energia nas baixas frequências associadas às grandes escalas turbulentas e uma transferência progressiva de energia em direção às escalas menores, conforme

descrito pela teoria clássica de Kolmogorov (KOLMOGOROV, 1941). Esse processo, conhecido como cascata de energia turbulenta, determina as características espectrais das flutuações de velocidade que incidem sobre as pás dos aerogeradores e, por consequência, influencia diretamente o espectro do ruído gerado. Em condições de elevada estabilidade atmosférica, especialmente durante o período noturno, a intensidade turbulenta pode ser reduzida enquanto os gradientes verticais de velocidade do vento se intensificam, alterando o campo de entrada das pás e modificando tanto o nível quanto o caráter espectral do ruído emitido (VAN DEN BERG, 2006).

Embora a turbulência, isoladamente, seja uma fonte sonora de baixa eficiência, sua interação com superfícies sólidas gera flutuações de pressão coerentes capazes de produzir som audível de forma significativa. Esse processo é formalizado nas analogias aeroacústicas clássicas de Lighthill e, posteriormente, de Ffowcs Williams e Hawkings, nas quais as fontes sonoras são classificadas em termos de monopolos, dipolos e quadrupolos. Em aerogeradores, as fontes dipolares, associadas às forças não estacionárias exercidas pelo escoamento sobre as superfícies sólidas das pás, são as dominantes na geração de ruído aerodinâmico de banda larga (FFOWCS WILLIAMS; HAWKINGS, 1969; BROOKS; POPE; MARCOLINI, 1989). A intensidade e o espectro dessas fontes dependem tanto das características da turbulência incidente quanto das propriedades geométricas e aerodinâmicas das pás, tornando o problema intrinsecamente multivariável e sensível às condições atmosféricas locais.

2.8.2 Ruído de camada limite e bordo de fuga

O ruído de bordo de fuga, conhecido na literatura técnica como *trailing-edge noise*, é amplamente reconhecido como o principal mecanismo de geração sonora em aerogeradores modernos, respondendo pela parcela dominante do espectro de ruído de banda larga irradiado pelas pás em operação (OERLEMANS; SIJTSMA; MÉNDEZ LÓPEZ, 2007; BROOKS; POPE; MARCOLINI, 1989; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Esse fenômeno resulta da interação entre as flutuações turbulentas da camada limite desenvolvida sobre a superfície da pá e a descontinuidade geométrica no bordo de fuga, onde as flutuações de pressão hidrodinâmicas são parcialmente convertidas em ondas acústicas propagantes.

Sob altos números de Reynolds, característicos da operação de aerogeradores de grande porte, o escoamento sobre as pás é predominantemente turbulento,

especialmente nas regiões próximas à ponta, onde as velocidades relativas são máximas. A camada limite turbulenta é caracterizada por flutuações de pressão de pequena escala espacial e elevada intensidade. Ao atingir o bordo de fuga, essas flutuações são convertidas em radiação acústica de banda larga que se propaga para o campo distante, conforme formalizado pelos modelos clássicos de ruído aerodinâmico de perfis (BROOKS; POPE; MARCOLINI, 1989; DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012). A diretividade dessa radiação é influenciada pela geometria do bordo de fuga, pelo ângulo de ataque local e pelas características espectrais da turbulência na camada limite, tornando o problema sensível às condições de operação e às propriedades geométricas de cada perfil de pá.

A intensidade do ruído de bordo de fuga apresenta forte dependência da velocidade de ponta da pá, com a potência acústica irradiada variando aproximadamente com a quinta potência da velocidade do escoamento, conforme previsto pelos modelos aeroacústicos clássicos. Esse comportamento explica o aumento expressivo dos níveis de ruído em condições de vento elevado e fundamenta a adoção de estratégias operacionais de controle de ruído baseadas na redução da velocidade de rotação em determinadas condições atmosféricas (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023). Avanços recentes no desenvolvimento de serrilhas no bordo de fuga e revestimentos porosos têm demonstrado potencial significativo para a atenuação desse mecanismo de geração sonora, com reduções de até vários decibéis nos níveis irradiados em condições controladas (BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023).

2.8.3 Estol, separação de escoamento e não estacionariedade aerodinâmica

O estol aerodinâmico ocorre quando o ângulo de ataque local de uma seção da pá ultrapassa um valor crítico, provocando a separação da camada limite e a formação de grandes estruturas vorticais. Esse regime é fortemente não estacionário e caracteriza-se por carregamentos aerodinâmicos oscilatórios, que resultam em flutuações de pressão de maior amplitude e aumento da radiação acústica em relação ao regime aderente (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Em aerogeradores, condições de estol podem ocorrer em situações de rajadas intensas, variações bruscas na direção do vento ou operação em regiões de baixa velocidade de rotação, tornando esse fenômeno particularmente relevante em parques eólicos instalados em terrenos complexos ou sob regimes de vento com elevada variabilidade turbulenta.

Sob a perspectiva da dinâmica dos fluidos, o estol representa uma transição abrupta do regime de escoamento aderente para um regime separado, com intensa geração de vorticidade e formação de estruturas coerentes de grande escala. A convecção dessas estruturas turbulentas ao longo da superfície da pá e sua passagem pelo bordo de fuga intensificam a emissão sonora, especialmente nas faixas de média e baixa frequência, e contribuem significativamente para a modulação de amplitude do ruído irradiado (MØLLER; PEDERSEN, 2011; VAN DEN BERG, 2006). Esse mecanismo é apontado como um dos fatores responsáveis pelo aumento do incômodo percebido por comunidades próximas a parques eólicos em condições atmosféricas específicas, uma vez que a variabilidade temporal do sinal acústico, característica da modulação de amplitude, amplifica a sensação subjetiva de incômodo mesmo quando os níveis médios de L_{Aeq} permanecem dentro dos limites normativos (HANSEN et al., 2021; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018).

2.8.4 Vórtices de ponta e estruturas coerentes

Na extremidade das pás, a diferença de pressão entre intradorso e extradorso resulta na formação de vórtices de ponta, estruturas coerentes caracterizadas por elevados gradientes de velocidade e vorticidade concentrada. A formação e o desprendimento periódico dessas estruturas geram flutuações de pressão que contribuem para a emissão sonora, com maior relevância nas faixas de média e alta frequência (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012). Do ponto de vista aeroacústico, os vórtices de ponta podem ser classificados como fontes dipolares associadas à força de sustentação não estacionária na região terminal da pá, cuja intensidade acústica varia com a velocidade de ponta e com a geometria da extremidade do perfil.

Embora não constituam a fonte dominante de ruído em aerogeradores de grande porte, os vórtices de ponta assumem relevância em determinadas condições operacionais e geométricas. Em rotores de menor diâmetro, onde a relação entre comprimento da pá e corda é mais elevada, a contribuição relativa dos vórtices de ponta para o espectro total irradiado tende a ser maior. Adicionalmente, em condições de baixa velocidade do vento e ângulos de ataque próximos ao estol, as estruturas coerentes formadas na ponta da pá podem interagir com o escoamento de pás adjacentes em configurações de múltiplos rotores, gerando fenômenos de ruído de interação que amplificam a emissão acústica e aumentam sua variabilidade temporal

(HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023). O entendimento dessas estruturas e de sua contribuição acústica é, portanto, relevante para o projeto de rotores de baixo ruído e para a modelagem precisa das emissões sonoras em estudos de impacto ambiental de parques eólicos.

2.8.5 Interação pá-torre

A interação pá-torre, conhecida na literatura técnica como *blade-tower interaction* (BTI), constitui um mecanismo aeroacústico de particular relevância para a compreensão da modulação de amplitude do ruído em parques eólicos. A torre atua como obstáculo no escoamento, distorcendo as linhas de corrente a montante e criando uma região de déficit de velocidade e elevada vorticidade. Quando cada pá atravessa essa região perturbada durante sua rotação, ocorre uma variação rápida do ângulo de ataque e do carregamento aerodinâmico local, resultando em flutuações periódicas de força e pressão com frequência correspondente à passagem das pás pela torre (DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Essas flutuações constituem uma fonte dipolar de caráter impulsivo, com emissão sonora concentrada em harmônicos da frequência de passagem de pás e propagação preferencial na direção perpendicular ao plano do rotor.

Esse mecanismo está diretamente associado à percepção do ruído característico descrito como pulsante ou de "batimento", frequentemente relatado por moradores próximos a parques eólicos como uma das manifestações de ruído mais incômodas (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MØLLER; PEDERSEN, 2011). Sob condições de elevada estabilidade atmosférica, especialmente durante o período noturno, esse efeito é intensificado, pois a redução da turbulência atmosférica favorece a propagação coerente das flutuações de pressão e amplifica o contraste entre o pico de emissão na passagem da pá e o nível residual entre passagens (VAN DEN BERG, 2006; HANSEN et al., 2021). A periodicidade desse sinal, aliada à sua intrusividade em ambientes rurais de baixa ambiência sonora, contribui para explicar por que o incômodo associado ao ruído eólico tende a ser desproporcionalmente elevado em relação ao que seria esperado a partir dos níveis médios de L_{Aeq} (MÜLLER et al., 2023; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018).

2.8.6 Ruído mecânico e transmissão vibroacústica

Embora represente uma contribuição secundária em aerogeradores modernos de velocidade variável, o ruído mecânico permanece relevante em situações de desgaste, desbalanceamento ou falha de componentes, podendo tornar-se a fonte dominante de emissão sonora em equipamentos com manutenção inadequada. As principais fontes mecânicas incluem a caixa multiplicadora, o gerador elétrico, os rolamentos e os sistemas auxiliares de resfriamento e controle, cujas vibrações são transmitidas estruturalmente pela nacele e pelo mastro e posteriormente irradiadas como som pela superfície das estruturas (PINDER, 1992; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Esse processo de transmissão vibroacústica envolve o acoplamento entre modos de vibração estrutural e modos de radiação acústica, sendo sua intensidade dependente das propriedades de amortecimento dos materiais e das conexões entre componentes.

Diferentemente dos mecanismos aerodinâmicos, o ruído mecânico apresenta caráter predominantemente tonal, com componentes espectrais concentradas em frequências discretas associadas às rotações e engrenamentos dos componentes internos. Essa característica tonal amplifica o potencial de incômodo para os moradores do entorno, uma vez que sons tonais são percebidos como mais perturbadores do que ruídos de banda larga de mesma energia, conforme documentado na literatura de psicoacústica e incorporado em critérios normativos como o da ISO 1996 e as diretrizes da WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018; SCHROEDER et al., 1999). Em aerogeradores de eixo horizontal com transmissão direta, a eliminação da caixa multiplicadora reduz significativamente as emissões de ruído mecânico, constituindo uma das principais motivações técnicas para a adoção dessa configuração em projetos de menor impacto acústico (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

2.8.7 Síntese física do processo de geração sonora

A geração de ruído em parques eólicos deve ser compreendida como um fenômeno multiescalar e multifísico, no qual distintos processos físicos atuam de forma encadeada e interdependente. A turbulência atmosférica fornece a energia cinética inicial e determina as condições de contorno do escoamento sobre as pás. A interação entre esse escoamento e as superfícies das pás converte parte dessa energia em flutuações de pressão hidrodinâmicas, que são subsequentemente

irradiadas como ondas acústicas a partir dos bordos de fuga, das pontas de pá e das regiões de interação pá-torre. A propagação dessas ondas no ambiente atmosférico, modulada por condições meteorológicas, topografia e cobertura do solo, condiciona os níveis sonoros que efetivamente chegam aos receptores e determinam a percepção de incômodo pelas comunidades do entorno (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012; FLOWCS WILLIAMS; HAWKINGS, 1969).

Cada um dos mecanismos abordados nos subtópicos anteriores, o ruído de bordo de fuga, os vórtices de ponta, a interação pá-torre, o estol aerodinâmico e o ruído mecânico, contribui de forma distinta para o espectro total irradiado e para as características temporais do sinal acústico, incluindo a modulação de amplitude e a variabilidade associada às condições operacionais e atmosféricas. A compreensão integrada desses mecanismos, fundamentada nos princípios da dinâmica dos fluidos e da aeroacústica, constitui a base científica indispensável para o desenvolvimento de modelos preditivos confiáveis, para o projeto de estratégias de mitigação tecnicamente embasadas e para a condução de avaliações ambientais robustas do ruído associado a parques eólicos (BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

2.9 Infrassom e ruído de baixa frequência: fundamentação normativa segundo a DIN 45680:1997

O infrassom é definido como o conjunto de oscilações acústicas com frequências inferiores ao limite convencional da audição humana, tipicamente abaixo de 20 Hz. Embora essas oscilações não sejam percebidas como som audível na maioria das situações cotidianas, podem ser detectadas pelo organismo humano por meio de mecanismos fisiológicos não exclusivamente auditivos, especialmente quando os níveis de pressão sonora são elevados. Em razão de suas características físicas, o infrassom e o ruído de baixa frequência apresentam elevada capacidade de propagação, baixa atenuação atmosférica com a distância e forte sensibilidade às condições meteorológicas e à geometria do ambiente, o que os torna particularmente relevantes em contextos rurais com baixa ambiência sonora (MØLLER; PEDERSEN, 2011; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

A norma alemã DIN 45680:1997 estabelece procedimentos específicos para medição, avaliação e interpretação de ruídos de baixa frequência em ambientes internos, reconhecendo explicitamente que a ponderação A é inadequada para representar o impacto perceptivo de conteúdos espectrais nessa faixa. A avaliação proposta pela norma baseia-se em análise espectral em bandas de terço de oitava, cobrindo tipicamente a faixa de 8 Hz a 100 Hz, com ênfase nas medições em ambientes internos, onde a resposta estrutural dos edifícios pode amplificar determinadas componentes por meio de fenômenos de ressonância e acoplamento vibroacústico entre o ar e os elementos construtivos. A metodologia compara os níveis medidos em cada banda com valores de referência orientativos, definidos a partir de estudos experimentais sobre incômodo. Quando os níveis excedem esses valores em determinadas bandas, considera-se que há potencial para incômodo relevante, independentemente do nível global ponderado em A.

Essa abordagem reflete um entendimento consolidado na literatura científica de que o incômodo associado ao ruído de baixa frequência está mais relacionado à sua estrutura espectral, à sua persistência temporal e à sua intrusividade do que ao nível energético total medido em dB(A) (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018). A norma reconhece ainda que o ruído de baixa frequência pode ser percebido como pressão, vibração, pulsação ou desconforto difuso, mesmo quando não claramente audível, com potencial para interferir no repouso, no sono e no bem-estar geral dos ocupantes, especialmente em situações de exposição contínua ou noturna.

No contexto de empreendimentos eólicos, a DIN 45680 é frequentemente adotada como referência técnica complementar para a avaliação de queixas relacionadas a infrassom e baixas frequências. Os aerogeradores modernos de transmissão direta apresentam emissões mecânicas reduzidas nessa faixa espectral, mas as componentes aerodinâmicas de baixa frequência, resultantes da interação pá-torre e da modulação de amplitude, permanecem como fontes relevantes, sobretudo em condições de estabilidade atmosférica noturna (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; VAN DEN BERG, 2006; ZAJAMŠEK et al., 2016). A aplicação combinada da DIN 45680 com descritores como a diferença $L_{Ceq}-L_{Aeq}$ constitui, portanto, uma abordagem mais abrangente e tecnicamente fundamentada para a avaliação desses impactos em estudos ambientais e processos de licenciamento de parques eólicos.

2.10 Caracterização do ruído ambiental: conceitos, variáveis e desafios técnicos

2.10.1 Fluxo de vento, cisalhamento e implicações para o ruído ambiental em aerogeradores

A caracterização do ruído ambiental em parques eólicos envolve conceitos fundamentais que vão além das propriedades físicas do aerogerador isolado, abrangendo grandezas como o som residual, o som específico, o som total e o incremento sonoro (ΔL). A avaliação desses parâmetros é fortemente condicionada pela velocidade e direção do vento, pela rugosidade do terreno, pelos mecanismos de propagação sonora e pelas condições meteorológicas locais e sazonais. Entre os desafios operacionais mais recorrentes destacam-se os efeitos de mascaramento pelo ruído de fundo, a influência do vento no microfone de medição, a variabilidade sazonal do regime de ventos e a necessidade de campanhas de medição representativas e metodologicamente consistentes. A combinação entre medições em campo e modelagem acústica surge, nesse contexto, como estratégia essencial para aumentar a confiabilidade das análises, apoiar a interpretação dos resultados e identificar zonas de maior sensibilidade ao ruído nos territórios (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; LARATRO et al., 2014).

Em determinadas condições operacionais, os aerogeradores apresentam variações rápidas nos níveis de ruído emitido, decorrentes de múltiplos mecanismos que interagem de forma complexa. A literatura técnica identifica entre os principais contribuintes a modulação de amplitude do ruído de bordo de fuga associada a gradientes de velocidade e variações de diretividade, as modulações induzidas pela turbulência do escoamento incidente em condições de operação em esteira, as variações no ruído de turbulência incidente causadas por rajadas, o ruído associado ao estol dinâmico, os padrões de interferência entre múltiplos aerogeradores e os efeitos atmosféricos de refração e atenuação dependente da frequência (LARATRO et al., 2014; DOOLAN; MOREAU; BROOKS, 2012). Embora todos esses mecanismos estejam presentes em maior ou menor grau na operação de parques eólicos, a contribuição relativa de cada um para as assinaturas acústicas observadas ainda não está plenamente estabelecida, constituindo uma fronteira ativa de pesquisa em aeroacústica ambiental.

2.10.2 Estol dinâmico e sua relação com o ruído em aerogeradores

O estol dinâmico é um fenômeno aerodinâmico transitório associado a variações rápidas do ângulo de ataque das pás, frequentemente induzidas por rajadas de vento, turbulência atmosférica, cisalhamento vertical e pela própria rotação do rotor. Diferentemente do estol estático, no qual a perda de sustentação ocorre de forma gradual, o estol dinâmico envolve a formação e o desprendimento súbito de grandes estruturas vorticosas, especialmente no bordo de ataque da pá. Do ponto de vista acústico, esse fenômeno representa uma fonte de emissões não estacionárias caracterizadas por flutuações rápidas de pressão na superfície da pá e por pulsos sonoros resultantes do colapso abrupto do escoamento aderente, que contribuem para o aumento do nível de ruído irradiado (LARATRO et al., 2014). Até o momento, não há registros publicados com medições diretas do ruído produzido especificamente durante eventos de estol dinâmico, mas estudos baseados em fenômenos correlatos indicam que tais eventos tendem a resultar em níveis sonoros superiores aos observados em condições normais de operação.

2.10.3 Modelos de propagação sonora e acurácia preditiva

A literatura recente enfatiza o papel central dos modelos de propagação sonora na avaliação de impacto ambiental de parques eólicos. Um estudo comparativo avaliou quatro métodos de modelagem acústica em 13 pontos de medição distribuídos em seis parques eólicos na Austrália Meridional. Os métodos analisados foram a ISO 9613-2, com solo totalmente refletivo e parcialmente absorvente; o CONCAWE, com solo totalmente absorvente; o NZS 6808:1998, método hemisférico simplificado; e o Nord2000, que incorpora perfis verticais de vento, gradientes térmicos, rugosidade e turbulência. Os resultados indicaram que ISO 9613-2 e CONCAWE tendem a superestimar os níveis sonoros entre 3 e 6 dB(A) em terrenos planos, enquanto em topografias côncavas podem subestimar entre 0 e 2 dB(A). O Nord2000 apresentou desempenho intermediário, e nenhum método se mostrou universalmente preciso, sendo a topografia o principal condicionante da acurácia das predições acústicas (EVANS; COOPER, 2012).

2.10.4 Cisalhamento do vento e implicações para o ruído ambiental

O campo de vento incidente sobre o rotor de um aerogerador apresenta, em condições reais de operação, significativa variabilidade espacial e temporal. O cisalhamento vertical ocorre quando a velocidade do escoamento varia com a altura,

fazendo com que a pá experimente velocidades distintas ao longo de sua trajetória azimutal. O cisalhamento horizontal, por sua vez, está associado a variações laterais de velocidade resultantes de efeitos topográficos ou de interferência de esteiras de aerogeradores a montante (BERTELE et al., 2017). Essas não uniformidades induzem variações periódicas do ângulo de ataque nas seções das pás, gerando flutuações cíclicas das cargas aerodinâmicas e constituindo uma fonte relevante de ruído não estacionário com modulação de amplitude. Condições atmosféricas de forte cisalhamento e maior estabilidade tendem a favorecer tanto a modulação do ruído quanto sua propagação a longas distâncias, aumentando a probabilidade de incômodo em comunidades vizinhas e reforçando a necessidade de incorporar esses aspectos nas avaliações de impacto sonoro de parques eólicos (VAN DEN BERG, 2006; HANSEN et al., 2021).

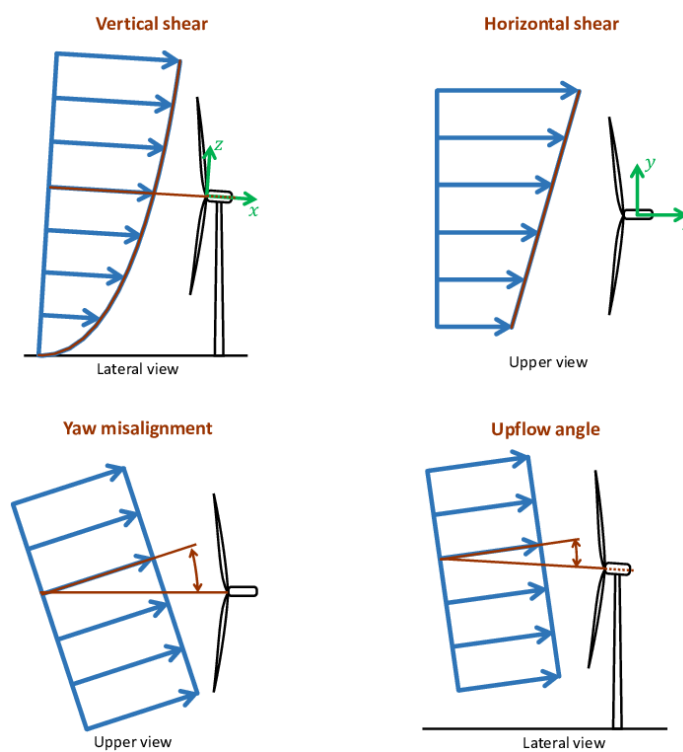


Figura 1.5 – Representação esquemática do cisalhamento vertical e horizontal do vento no plano do rotor de aerogeradores

Fonte: Bertelè et al. (2017).

2.10.5 Modelos de Propagação Sonora: Avanços e Limitações

Estudos recentes avançam para estruturas numéricas multifidelidade que buscam integrar de forma mais realista a dinâmica do escoamento e a propagação

sonora. O modelo WindSTAR combina um modelo tridimensional de escoamento capaz de representar perfis atmosféricos, efeitos de cisalhamento e desenvolvimento de esteiras, com um modelo de fonte acústica fundamentado no método BPM acoplado ao método de elementos de contorno azimutal, além de um modelo de propagação baseado em equações parabólicas. Validado a partir de extensa campanha de medições em torno de uma turbina SGRE de 3,9/4,1 MW, o modelo apresentou diferenças absolutas médias de apenas 0,8 dB(A) entre simulações e medições em condições atmosféricas estáveis, neutras e instáveis, com tempos de cálculo compatíveis com aplicações de planejamento operacional. Os autores concluem que essa abordagem representa avanço significativo em relação a modelos simplificados como a ISO 9613-2, especialmente na representação da influência das esteiras e da estratificação atmosférica (CAO et al., 2022).

Um segundo estudo comparou a ISO 9613-2 em bandas de terço de oitava, o Nord2000 e o WindSTAR-Pro, utilizando medições de campo de uma turbina SWT-DD-142 de 3,9 MW. Os resultados indicaram que a ISO 9613-2 apresentou desempenho estável em baixas frequências e baixa sensibilidade a flutuações atmosféricas, tornando-se robusta para estimativas rápidas em situações de alta variabilidade meteorológica. O Nord2000 e o WindSTAR-Pro reproduziram com maior precisão casos específicos, porém com maior sensibilidade às condições atmosféricas e aos efeitos de esteira. A análise concluiu que, apesar de não apresentar o melhor desempenho global, a ISO 9613-2 permanece relevante como ferramenta de interpretação direta e amplamente aceita em normas, funcionando como modelo inicial de avaliação e base de comparação para modelos de maior fidelidade (NYBORG et al., 2022).

Estudos de propagação em terreno plano com medições prolongadas indicam que, para distâncias relativamente curtas e geometrias simples, modelos simplificados podem ser suficientes para estimativas médias de imissão sonora. Em medições de 30 dias realizadas a 530 m de uma turbina Enercon E66, verificou-se boa concordância entre o método sueco de propagação e os níveis médios observados em condições de vento favorável, com diferenças dentro de um desvio padrão. Modelos mais complexos, como equações parabólicas e Nord2000, não apresentaram ganhos substanciais para a distância analisada. Contudo, a variabilidade dos níveis para uma mesma velocidade de vento foi elevada, com fatores como gradiente térmico, pressão atmosférica e desvio da direção do vento influenciando

significativamente o ruído percebido, reforçando a necessidade de considerar as condições meteorológicas em estudos de percepção e incômodo (FORSSÉN et al., 2010).

2.10.6 Modulação de Amplitude e sua Relevância no Ruído Ambiental de Aerogeradores

A modulação de amplitude é um fenômeno acústico caracterizado pela variação periódica da intensidade sonora ao longo do tempo, com manutenção da frequência dominante do sinal. Em termos perceptivos, manifesta-se como uma alternância rítmica entre momentos de maior e menor intensidade sonora, frequentemente descrita pelos moradores do entorno de parques eólicos como um som pulsante ou cadenciado (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; HANSEN et al., 2021).

Em aerogeradores, a modulação de amplitude está intimamente associada à não uniformidade do fluxo de vento no plano do rotor. O cisalhamento vertical e horizontal do vento, a turbulência atmosférica e o desalinhamento do escoamento em relação ao eixo do rotor fazem com que as pás operem, ao longo de cada rotação, sob condições aerodinâmicas variáveis. Essas variações induzem flutuações periódicas nas cargas aerodinâmicas e, conseqüentemente, na emissão sonora, resultando em um sinal acústico de intensidade oscilatória cíclica. O fenômeno tende a ser mais pronunciado em condições atmosféricas estáveis, frequentemente observadas no período noturno, quando o cisalhamento vertical do vento é intensificado e a diferença de velocidade entre as porções inferior e superior do rotor se acentua (VAN DEN BERG, 2006; BERTELEÈ et al., 2017).

Do ponto de vista da avaliação de impacto ambiental, a modulação de amplitude representa um desafio específico, uma vez que não é plenamente capturada por indicadores energéticos médios como o L_{Aeq} . Sua ocorrência explica situações recorrentes em que comunidades relatam incômodo sonoro significativo mesmo com atendimento formal aos limites normativos vigentes (MÜLLER et al., 2023; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018). Estudo de longa duração conduzido em residências entre 1 e 3,5 km de parques eólicos na Austrália Meridional, utilizando técnicas de aprendizado de máquina para detecção automática da modulação de amplitude, demonstrou que sua ocorrência e profundidade aumentam significativamente durante o período noturno, especialmente sob condições de

atmosfera estável, inversão térmica, elevada umidade e ventos favoráveis à propagação. A profundidade da modulação foi maior nas faixas de baixa frequência, com maior impacto em ambientes internos em razão do baixo nível de mascaramento (NGUYEN et al., 2021). Esses resultados reforçam a necessidade de incorporar a análise da modulação de amplitude como componente sistemático nas avaliações de impacto acústico de parques eólicos, complementando os descritores energéticos tradicionais com métricas capazes de representar a variabilidade temporal do sinal sonoro.

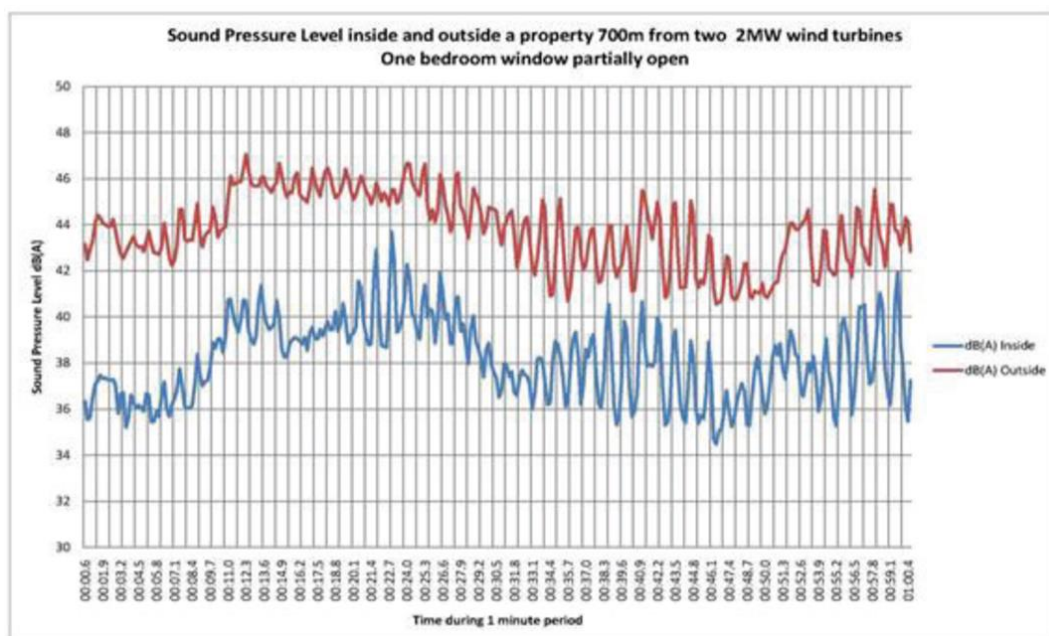


Figura 1.6 – Representação esquemática da modulação de amplitude em um sinal sonoro

Fonte: (Cooper, [s.d.])

A incorporação de técnicas de aprendizado de máquina na modelagem do ruído ambiental surge como uma frente promissora para a gestão operacional de parques eólicos. Modelos baseados em *Random Forest Regression*, calibrados com dados acústicos e operacionais provenientes de sistemas SCADA, demonstraram alta capacidade preditiva para níveis sonoros em receptores próximos, com coeficientes de correlação elevados e baixos erros médios quadráticos. Esses modelos permitem estimar o comportamento acústico em função de variáveis como velocidade do vento na nacele e potência ativa das turbinas, sem necessidade de interrupção da operação,

representando ferramenta útil para identificar faixas de velocidade do vento em que o ruído das turbinas se torna predominante sobre o ruído de fundo e para apoiar decisões de gestão adaptativa do parque (IANNACE; CIABURRO; TREMATERRA, 2019).

De forma integrada, os estudos revisados evidenciam que a caracterização e a gestão do ruído ambiental em parques eólicos dependem de uma abordagem que combine o entendimento físico dos mecanismos de geração sonora, a aplicação criteriosa de modelos de propagação de diferentes níveis de complexidade e o uso de ferramentas estatísticas e de aprendizado de máquina. Modelos simplificados, como a ISO 9613-2 e normas brasileiras correlatas, são adequados nas fases iniciais de projeto e licenciamento, especialmente em contextos de topografia simples e distâncias moderadas. Modelos de engenharia e de alta fidelidade, como o Nord2000 e o WindSTAR, tornam-se necessários para análises mais detalhadas, em situações de topografia complexa, longas distâncias de propagação, investigação de reclamações ou avaliação de modulação de amplitude. Modelos baseados em aprendizado de máquina, por sua vez, complementam essas abordagens ao oferecer capacidade preditiva em tempo próximo ao real, ancorada em dados operacionais contínuos (IANNACE; CIABURRO; TREMATERRA, 2019; CAO et al., 2022).

Em conjunto, essas ferramentas contribuem para reduzir incertezas nas estimativas acústicas, aprimorar a previsão de impactos e subsidiar estratégias de mitigação mais eficazes, aspectos fundamentais para o adequado gerenciamento socioambiental do ruído em parques eólicos, especialmente no contexto brasileiro, onde a ausência de normas específicas para o setor amplifica a importância de abordagens metodológicas robustas e tecnicamente fundamentadas (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023).

2.11 Papel do licenciamento ambiental e lacunas normativas no Brasil

O licenciamento ambiental constitui o principal instrumento legal de gestão e controle dos impactos sonoros associados à implantação e à operação de parques eólicos no Brasil, conforme estabelecido pela Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981) e regulamentado por resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Por meio desse instrumento, os órgãos ambientais

competentes definem critérios de avaliação, limites de aceitabilidade, condicionantes técnicas e medidas de mitigação voltadas à proteção da saúde humana e da qualidade de vida das populações potencialmente afetadas.

No que se refere à avaliação do ruído ambiental, os processos de licenciamento baseiam-se predominantemente na Resolução CONAMA nº 01/1990 e na ABNT NBR 10151:2019, norma técnica que estabelece procedimentos de medição e valores orientadores de níveis sonoros em função do uso e ocupação do solo. A NBR 10151:2019 define limites distintos para os períodos diurno e noturno, vinculando-os às classes de zoneamento urbano, conforme apresentado na Tabela 1.4. Para áreas de sítios e fazendas, categoria frequentemente aplicável ao entorno de parques eólicos, os limites estabelecidos são de 40 dB(A) no período diurno e 35 dB(A) no período noturno, valores que refletem o caráter silencioso característico desses ambientes rurais (ABNT, 2019).

Tabela 1.4 – Níveis máximos de pressão sonora equivalentes permitidos pela ABNT NBR 10151:2019, em dB(A)

Tipo de área	Período diurno (L_{Aeq})	Período noturno (L_{Aeq})
Áreas de sítios e fazendas	40 dB(A)	35 dB(A)
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50 dB(A)	45 dB(A)
Área mista, predominantemente residencial	55 dB(A)	50 dB(A)
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60 dB(A)	55 dB(A)
Área mista, com vocação recreacional	65 dB(A)	55 dB(A)
Área predominantemente industrial	70 dB(A)	60 dB(A)

Fonte: ABNT NBR 10151:2019 (versão corrigida 2020).

Nota: Período diurno: 07h01 às 22h00. Período noturno: 22h01 às 07h00.

A aplicação da NBR 10151:2019 ao contexto de parques eólicos, contudo, impõe desafios técnicos e institucionais relevantes. Um dos principais entraves decorre do fato de que os valores de referência da norma estão diretamente

associados ao zoneamento urbano municipal, o qual, em grande parte dos municípios brasileiros, especialmente nos de pequeno porte, não se encontra claramente definido, atualizado ou formalmente instituído por legislação local. Em muitos casos, inexistem planos diretores detalhados ou mapas oficiais de uso e ocupação do solo capazes de orientar, de forma objetiva, o enquadramento acústico das áreas receptoras (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Esse cenário torna-se ainda mais complexo no contexto rural, onde frequentemente se inserem os empreendimentos eólicos. Em diversas regiões do país, áreas classificadas administrativamente como rurais abrigam simultaneamente atividades de geração de energia, indústrias, comércios, residências, comunidades tradicionais e usos múltiplos do território, sem uma categorização acústica claramente estabelecida. Nesses casos, a aplicação direta dos limites da NBR 10151:2019 pode resultar em enquadramentos ambíguos ou tecnicamente inadequados, seja pela adoção de limites excessivamente restritivos em relação à realidade do entorno, seja pela insuficiência dos limites estabelecidos para proteger comunidades rurais sensíveis expostas ao ruído eólico (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MÜLLER et al., 2023).

Como consequência, os órgãos ambientais estaduais frequentemente recorrem a interpretações técnicas complementares, adotando critérios intermediários, condicionantes específicas ou avaliações caso a caso para definir os limites aplicáveis. Essa prática, embora operacionalmente necessária, contribui para a heterogeneidade dos procedimentos de licenciamento e para a falta de uniformidade entre diferentes estados e empreendimentos, gerando insegurança jurídica e técnica tanto para os licenciadores quanto para os empreendedores. O estado de Pernambuco representa um exemplo de iniciativa subnacional nesse sentido, com a publicação da Instrução Normativa CPRH nº 09/2024, que estabelece orientações complementares específicas para o licenciamento de empreendimentos eólicos no contexto local.

Evidencia-se, portanto, a necessidade de estudos técnicos aprofundados que considerem de forma integrada as características acústicas do ruído eólico, a ocupação real do território e a percepção das comunidades locais. Tais estudos são fundamentais para subsidiar a correta aplicação da NBR 10151:2019 em áreas rurais e de transição urbano-rural, bem como para contribuir com o aprimoramento do arcabouço regulatório nacional, promovendo maior coerência normativa,

previsibilidade regulatória e equilíbrio entre a expansão da energia eólica e a proteção da qualidade de vida das populações (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023).

2.12 Conflitos socioambientais, ruído ambiental e riscos para empreendimentos eólicos

A literatura científica sobre ruído de aerogeradores demonstra que os conflitos socioambientais associados a empreendimento eólicos não decorrem apenas dos níveis sonoros absolutos, mas da combinação entre características acústicas específicas, como a modulação de amplitude, e fatores não acústicos, incluindo percepção, expectativas das comunidades e a forma como as queixas são gerenciadas pelos empreendedores e órgãos licenciadores. Em áreas rurais, onde o nível de som residual é naturalmente baixo, essas características tornam-se mais perceptíveis, podendo intensificar o incômodo e contribuir para conflitos sociais mesmo em situações de atendimento formal aos limites normativos. A mitigação desses conflitos exige, portanto, não apenas conformidade técnica, mas estratégias eficazes de comunicação, transparência e gestão socioambiental (BOWDLER, 2010; PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004).

Embora os níveis sonoros atendam formalmente aos limites estabelecidos nos processos de licenciamento ambiental, a literatura científica e a experiência prática demonstram que o incômodo sonoro não se restringe a uma questão de conformidade legal, estando fortemente relacionado a fatores perceptivos, contextuais e sociais. Quando esses aspectos não são adequadamente considerados nos estudos ambientais e nas estratégias de comunicação dos parques eólicos, o ruído pode atuar como catalisador de tensões, ampliando a oposição social aos empreendimentos e comprometendo a chamada licença social para operar (MÜLLER et al., 2023; CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017).

No Brasil, conflitos associados ao ruído de parques eólicos têm crescido e sido amplamente documentados, sobretudo em regiões que experimentaram rápida expansão da geração eólica, como o Nordeste. Um exemplo relevante é o município de Caetés, em Pernambuco, onde lacunas na gestão socioambiental resultaram em sucessivas manifestações de moradores e organizações sociais, reportagens jornalísticas e questionamentos sobre os critérios adotados no licenciamento

ambiental. Situação semelhante é observada no município de Serra do Mel, no Rio Grande do Norte, região caracterizada pela concentração de parques eólicos inseridos em área rural e de assentamentos comunitários. Nesses contextos, o ruído ambiental tornou-se um dos principais elementos mobilizadores de conflitos, frequentemente associado à percepção de assimetria na distribuição dos benefícios econômicos da atividade, à fragilidade dos processos de comunicação social e à ausência de canais efetivos de participação das comunidades locais (SANTANA; SILVA, 2021; CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017).

Na Europa e na América do Norte, conflitos envolvendo ruído de parques eólicos têm sido amplamente documentados em países como Alemanha, França, Reino Unido e Estados Unidos, com destaque para disputas relacionadas à modulação de amplitude, ruído noturno e impactos cumulativos em áreas rurais. Em diversos desses casos, a repercussão midiática contribuiu para a judicialização dos empreendimentos, a revisão de critérios regulatórios e, em algumas situações, a imposição de restrições operacionais ou moratórias (MÜLLER et al., 2023; MANOHARE et al., 2026).

Do ponto de vista técnico-científico, tais conflitos evidenciam uma lacuna entre os descritores acústicos tradicionalmente utilizados no licenciamento, baseados em níveis médios de pressão sonora como o L_{Aeq} , e a experiência subjetiva das populações expostas, influenciada pela variabilidade temporal do sinal, pela modulação de amplitude, pelo contexto noturno e por fatores psicossociais e psicoacústicos. A discrepância entre o atendimento aos limites normativos e a persistência do incômodo percebido tem se mostrado um dos principais fatores de escalonamento dos conflitos e de erosão da aceitação social dos empreendimentos (MANOHARE et al., 2026; GUSKI, 1999; BOWDLER, 2010).

Para os empreendedores, os conflitos associados ao ruído representam riscos multifatoriais relevantes, que incluem atrasos nos cronogramas de implantação e operação decorrentes de exigências adicionais dos órgãos licenciadores, aumento de custos associados à realização de novos estudos acústicos e monitoramentos prolongados, imposição de restrições operacionais ou reconfiguração de layout, judicialização dos projetos com impactos sobre a previsibilidade financeira e contratual, e danos reputacionais com efeitos sobre a aceitação social de empreendimentos futuros na mesma região. A antecipação e a gestão preventiva desses riscos dependem da incorporação sistemática da dimensão social nos estudos

de impacto ambiental, incluindo abordagens que integrem avaliação acústica, análise territorial e percepção comunitária desde as fases iniciais do planejamento (BOTELHO et al., 2017; KUWANO et al., 2014).

Por fim, estratégias de relacionamento social baseadas em programas estruturados, com canais de diálogo transparentes e construídos de forma participativa com as comunidades locais, constituem elementos essenciais para o sucesso e a sustentabilidade de empreendimentos eólicos. Para que sejam efetivas, essas iniciativas devem ser concebidas como processos contínuos, abrangendo todas as fases do empreendimento, desde o planejamento e o licenciamento, passando pela implantação, até a operação e o descomissionamento, assegurando a manutenção do diálogo, da confiança e da corresponsabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do projeto.

2.13 Importância da percepção sonora: aspectos psicossocial e psicoacústico

A avaliação do ruído ambiental tem evoluído progressivamente para além da análise estritamente física dos níveis de pressão sonora, incorporando aspectos relacionados à percepção humana do som. Nesse contexto, o ruído passa a ser compreendido não apenas como um fenômeno acústico mensurável, mas também como uma experiência subjetiva, influenciada por fatores individuais, psicológicos e sociais (SCHROEDER et al., 1999; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Essa abordagem é especialmente relevante em ambientes onde as emissões sonoras atendem aos limites normativos, mas ainda assim são objeto de diferentes percepções e relatos de incômodo por parte dos receptores.

A psicoacústica estuda a relação entre os estímulos físicos do som e a forma como estes são percebidos, interpretados e avaliados pelo ser humano. A experiência sonora não é determinada exclusivamente por parâmetros objetivos como o nível de pressão sonora, mas resulta de processos complexos que envolvem o sistema auditivo, mecanismos cognitivos e fatores psicológicos (SCHROEDER et al., 1999). O ouvido humano apresenta elevada sensibilidade não apenas à intensidade do som, mas também às suas características temporais, como flutuações de nível, variações de amplitude e pulsações rítmicas. Variações temporais do som, mesmo quando de pequena magnitude, podem ser detectadas pelo sistema auditivo e influenciar a

atenção do ouvinte, especialmente quando ocorrem em faixas de frequência de maior sensibilidade humana. Entretanto, a resposta perceptiva a esses estímulos varia significativamente entre indivíduos, o que explica por que um mesmo ambiente acústico pode ser avaliado de forma distinta por diferentes receptores (MANOHARE et al., 2026; GUSKI, 1999).

O incômodo sonoro é amplamente reconhecido na literatura como um fenômeno essencialmente subjetivo. Guski (1999) o define como uma avaliação negativa de longo prazo das condições de vida em relação ao ambiente acústico, resultado não de episódios pontuais de perturbação, mas de atitudes, expectativas e interpretações construídas ao longo do tempo. Essa avaliação é modulada por variáveis individuais e psicossociais que incluem a sensibilidade pessoal ao ruído, o medo de efeitos nocivos associados à fonte sonora, a avaliação da legitimidade ou utilidade social da fonte e a capacidade individual de lidar com a situação acústica, denominada capacidade de coping. Entre esses fatores, a sensibilidade ao ruído destaca-se como um dos moderadores mais consistentemente identificados em pesquisas de campo, apresentando correlação robusta com os níveis relatados de incômodo independentemente do nível sonoro objetivo (GUSKI, 1999; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018; MANOHARE et al., 2026).

A Organização Mundial da Saúde reforça esse entendimento ao reconhecer que o impacto do ruído sobre o bem-estar humano resulta da interação entre exposição sonora, características do ambiente e suscetibilidade individual, sendo inadequado estabelecer relações diretas e universais entre níveis sonoros e respostas humanas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Nesse sentido, a simples presença de relatos de incômodo não implica necessariamente a ocorrência de efeitos adversos à saúde ou a inadequação técnica do empreendimento, tampouco a ausência de relatos garante a inexistência de impactos perceptivos relevantes para determinados grupos de receptores.

No contexto dos aerogeradores, o ruído emitido apresenta características aerodinâmicas típicas de sistemas rotativos de grande porte, com predominância de componentes de banda larga e, em determinadas condições operacionais e atmosféricas, variações temporais associadas à rotação das pás. Sob a ótica psicoacústica, tais variações podem ser percebidas como flutuações sonoras por parte de alguns indivíduos, enquanto para outros permanecem praticamente imperceptíveis ou são rapidamente integradas ao ruído de fundo do ambiente

(PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MÜLLER et al., 2023). A percepção do ruído de aerogeradores pode ser ainda influenciada por fatores não acústicos, como a visibilidade das torres, o grau de aceitação social do empreendimento e o significado atribuído ao som no contexto local. Sons associados a atividades percebidas como socialmente úteis ou ambientalmente benéficas tendem a gerar respostas de incômodo menos intensas do que sons de fontes consideradas indesejadas ou impostas, aspecto particularmente relevante em situações de conflito socioambiental (GUSKI, 1999; BOTELHO et al., 2017).

A relação entre a exposição ao ruído ambiental e os efeitos psicológicos associados é representada pelo modelo conceitual de Guski (1999). O modelo articula quatro elementos centrais: o agente ambiental, que no contexto desta dissertação corresponde aos aerogeradores e às atividades associadas à operação de parques eólicos; a carga ambiental, que representa a exposição acústica expressa por parâmetros físicos mensuráveis como níveis de pressão sonora, distribuição temporal e variações do sinal; as variáveis moderadoras, que compreendem fatores individuais e psicossociais como sensibilidade ao ruído, medo de efeitos nocivos, avaliação da fonte e confiança nas instituições; e as variáveis mediadoras, que correspondem a reações intermediárias desencadeadas diretamente pela exposição, como interferência no repouso, na comunicação e na concentração. O efeito psicológico resultante, expresso pelo incômodo sonoro, não é determinado de forma direta e linear pelo nível de exposição, mas emerge da interação entre todos esses elementos, configurando uma resposta multifatorial que não pode ser adequadamente representada apenas por descritores energéticos como o L_{Aeq} (GUSKI, 1999; GUSKI; FELSCHER-SUHR; HAGEN, 1999).

A incorporação dos aspectos psicossociais e psicoacústicos nas avaliações ambientais não fragiliza os empreendimentos eólicos nem relativiza a importância do controle acústico, mas qualifica a análise ao distinguir entre efeitos mensuráveis e respostas perceptivas individuais. Conforme argumenta Guski (1999), reduções significativas em fatores moderadores negativos, como o fortalecimento da confiança no empreendedor e a ampliação do acesso à informação, podem ser tão eficazes na diminuição do incômodo quanto reduções equivalentes nos níveis de ruído. Essa perspectiva reforça a importância de abordagens integradas que aliem controle acústico, comunicação transparente e consideração das características perceptivas

individuais nos processos de planejamento, licenciamento e gestão de parques eólicos.

2.14 Justificativa científica: lacunas na literatura brasileira

A literatura brasileira sobre ruído ambiental em parques eólicos ainda é incipiente, com escassez de estudos que integrem de forma sistemática medições acústicas em campo, modelagem de propagação sonora, avaliação da percepção comunitária e estratégias de mitigação adaptadas ao contexto nacional. A maior parte das referências científicas disponíveis origina-se de países com longa tradição eólica, como Alemanha, Suécia, Holanda, Austrália e Estados Unidos, cujos contextos geográficos, climáticos, normativos e socioculturais diferem substancialmente do cenário brasileiro, especialmente no que se refere às condições atmosféricas do semiárido nordestino, à vulnerabilidade socioeconômica das comunidades rurais e à ausência de marcos regulatórios específicos para o setor (CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; SANTANA; SILVA, 2021).

Essa lacuna é particularmente relevante considerando que o Brasil ocupa posição de destaque no cenário eólico mundial, com mais de 33 GW de capacidade instalada e concentração expressiva de parques no Nordeste, região caracterizada por comunidades tradicionais, baixa ambiência sonora e crescente registro de conflitos socioambientais associados à operação dos empreendimentos (ABEEÓLICA, 2024; GWEC, 2025). A inexistência de normas específicas para o ruído eólico no país, combinada com a diversidade de realidades territoriais e construtivas das residências nas áreas de influência dos parques, torna ainda mais urgente o desenvolvimento de pesquisas com base empírica nacional, capazes de subsidiar o aprimoramento do arcabouço regulatório e das práticas de gestão socioambiental (ABNT, 2019; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

A presente pesquisa busca contribuir para o preenchimento dessas lacunas, oferecendo uma análise integrada e aplicada à realidade do semiárido nordestino, com ênfase na caracterização acústica do ruído eólico, na avaliação da percepção e do incômodo das comunidades receptoras e na identificação de estratégias de mitigação tecnicamente fundamentadas e socialmente contextualizadas.

2.15 Problema de pesquisa

O problema de pesquisa que orienta este estudo é formulado da seguinte maneira: de que forma o ruído ambiental proveniente da operação de parques eólicos, considerando diferentes distâncias entre os aerogeradores e as residências, as características ambientais e acústicas locais, os cenários operacionais e as condições socioculturais das comunidades do entorno, impacta a percepção, o incômodo e o bem-estar da população exposta? E quais estratégias de mitigação, incluindo o potencial papel da vegetação nativa como barreira acústica natural, podem ser implementadas para reduzir esses impactos de maneira tecnicamente eficaz, ambientalmente adequada e socialmente aceitável no contexto do semiárido nordestino brasileiro?

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Analisar de forma integrada o ruído ambiental em parques eólicos no contexto brasileiro, considerando seus aspectos físicos, técnicos e socioambientais, com ênfase na percepção e no incômodo das comunidades do entorno, visando à proposição e à avaliação de estratégias eficazes de caracterização, gestão e mitigação do impacto sonoro no semiárido nordestino.

3.2 Objetivos específicos

a) Caracterizar o ruído ambiental associado à operação de parques eólicos, distinguindo os componentes de som residual, som específico e som total, subsidiando a proposição de zoneamento acústico como instrumento de gestão territorial;

b) Avaliar os fatores físicos, operacionais e ambientais que influenciam a geração, a propagação e a variabilidade temporal do ruído de aerogeradores, incluindo condições meteorológicas, topografia e cobertura vegetal;

c) Investigar a percepção de incômodo e os efeitos associados ao ruído ambiental em comunidades do entorno de parques eólicos, por meio de pesquisa estruturada aplicada previamente à implementação de medidas de mitigação;

d) Analisar a influência de variáveis individuais, psicoacústicas e psicossociais, bem como das características construtivas das residências, na resposta de incômodo ao ruído ambiental, considerando aspectos como sensibilidade ao ruído, vínculo dos moradores com o território e condições socioeconômicas locais;

e) Comparar abordagens técnicas e normativas utilizadas na avaliação do ruído ambiental em parques eólicos no Brasil e em outros países, identificando convergências, limitações e lacunas regulatórias;

f) Implementar e avaliar estratégias de mitigação do ruído ambiental, incluindo o uso da vegetação nativa da Caatinga como barreira acústica natural, em integração com demais ações socioambientais;

g) Propor um guia técnico socioambiental para a gestão do ruído ambiental em parques eólicos, integrando estratégias de caracterização acústica, comunicação social, mitigação e apoio ao licenciamento ambiental;

h) Fornecer subsídios técnicos e práticos que contribuam para o aprimoramento das práticas de gestão socioambiental do ruído no setor eólico, promovendo a convivência sustentável entre empreendimentos e comunidades locais.

4 CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO GERAL

4.1 Caracterização do contexto socioambiental do complexo eólico

O território no qual se insere o complexo eólico objeto deste estudo localiza-se no Agreste Meridional do estado de Pernambuco, abrangendo os municípios de Caetés, Pedra e Paranatama. Essa região caracteriza-se como uma zona de transição entre o Agreste e o Sertão nordestino, apresentando particularidades ambientais, climáticas e socioeconômicas que influenciam diretamente a organização do espaço e as relações entre empreendimentos de infraestrutura e as comunidades locais (IBGE, 2023; BANCO DO NORDESTE DO BRASIL, 2015).

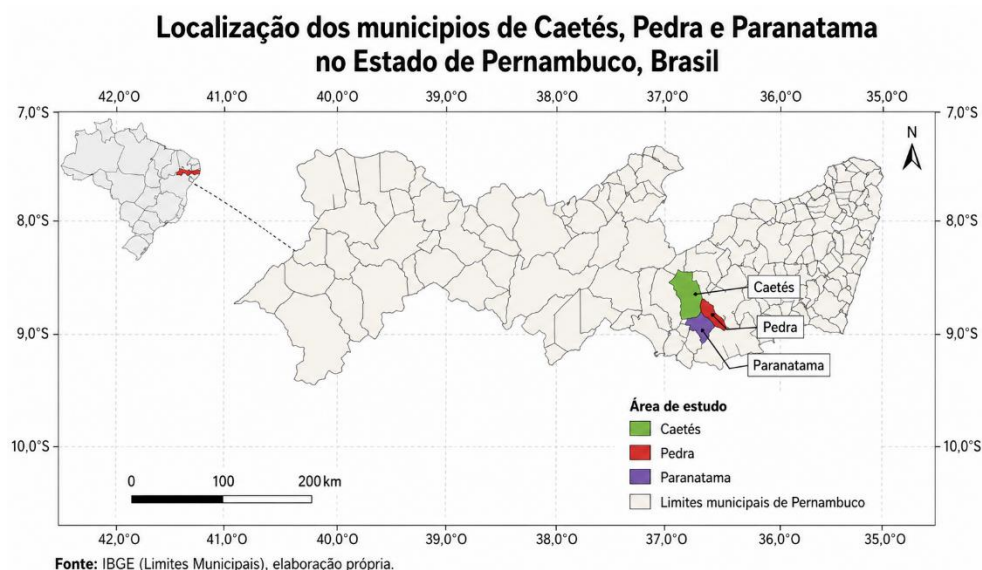
Do ponto de vista físico-ambiental, o território apresenta clima semiárido, com precipitações irregulares, elevada variabilidade interanual das chuvas e períodos recorrentes de estiagem. Essas condições climáticas condicionam a dinâmica ecológica regional e os usos do solo, influenciando tanto a cobertura vegetal quanto as atividades produtivas desenvolvidas pelas populações locais. A vegetação predominante pertence ao bioma Caatinga, em diferentes estágios de conservação e

regeneração, formando um mosaico de áreas mais preservadas, fragmentos florestais secundários e áreas historicamente convertidas para agricultura e pecuária. A Caatinga é reconhecida como uma floresta tropical sazonalmente seca, com espécies altamente adaptadas ao estresse hídrico e processos ecológicos sensíveis às alterações no uso do solo (SAMPAIO, 2010; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

A paisagem regional é marcada por relevo suavemente ondulado, com elevações naturais que favorecem a implantação de aerogeradores, intercaladas por vales ocupados por pequenas propriedades rurais, estradas vicinais e núcleos habitacionais dispersos. Essa configuração espacial resulta em distâncias variáveis entre as fontes de emissão sonora e as áreas habitadas, aspecto central para a análise dos impactos acústicos associados ao ruído, uma vez que a atenuação sonora ao longo do percurso é diretamente influenciada pela topografia, pela cobertura do solo e pelas condições meteorológicas locais (AYLOR, 1972; GRONBERG, 2015).

Sob a perspectiva socioeconômica, o território é ocupado predominantemente por populações rurais, cuja base produtiva está associada à agricultura familiar, à criação extensiva de animais e ao comércio local. O vínculo histórico e cultural das comunidades com a terra configura um elemento estruturante da identidade territorial, influenciando a forma como as transformações ambientais e paisagísticas são percebidas e avaliadas socialmente (IBGE, 2023). Nesse contexto, a implantação de empreendimentos eólicos ocorre em um cenário marcado por expectativas de desenvolvimento regional e geração de emprego e renda, mas também por desafios relacionados à convivência entre os parques e as áreas habitadas. A modificação da paisagem, a alteração da dinâmica territorial e os impactos ambientais percebidos, como o ruído, interação com fatores físicos e socioculturais locais, podendo amplificar a sensação de incômodo e contribuir para o surgimento de conflitos socioambientais (CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; SANTANA; SILVA, 2021).

O território deve ser compreendido, portanto, como uma construção socioambiental resultante da interação entre elementos naturais, históricos e sociais. A análise integrada desse contexto é fundamental para a adequada avaliação dos impactos do complexo eólico, especialmente no que se refere ao ruído ambiental, uma vez que a percepção e a resposta das comunidades do entorno são fortemente condicionadas pelas características do lugar, pelo vínculo com o território, pela baixa ambiência sonora característica do semiárido e pelas relações estabelecidas com o empreendimento (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; GUSKI, 1999).



A Figura apresenta a localização da área de estudo no Estado de Pernambuco, com destaque para os municípios de Caetés, Pedra e Paratama, inseridos na mesorregião do Agreste Meridional. Esses municípios concentram parte significativa dos empreendimentos eólicos analisados neste estudo, situando-se em uma região de transição climática e ambiental, característica do bioma Caatinga.

4.2 Bioma Caatinga

A Caatinga constitui o único bioma exclusivamente brasileiro, ocupando grande parte da região Nordeste e caracterizando-se por condições climáticas semiáridas, com chuvas irregulares, longos períodos de estiagem e elevada variabilidade interanual. Trata-se de uma floresta tropical sazonalmente seca, dominada por espécies decíduas altamente adaptadas ao estresse hídrico, cuja fisionomia e funcionamento ecológico estão fortemente condicionados à disponibilidade de água ao longo do ano (SAMPAIO, 2010; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

Embora durante décadas tenha sido interpretada de forma reducionista como um ambiente pobre em biodiversidade, estudos sistemáticos demonstraram que o bioma abriga diversidade biológica expressiva, com elevados níveis de endemismo e ampla gama de estratégias adaptativas, especialmente na vegetação lenhosa, como a perda sazonal de folhas, estruturas de reserva hídrica, sistemas radiculares

profundos e ciclos fenológicos sincronizados com o regime de chuvas (SAMPAIO, 2010). Do ponto de vista estrutural, a vegetação da Caatinga apresenta menor estratificação vertical, menor área basal e elevada dominância de poucas espécies em comparação com florestas tropicais úmidas, características inerentes às florestas secas tropicais. Essa simplicidade estrutural, contudo, não implica baixa complexidade funcional, uma vez que os processos ecológicos são altamente especializados e sensíveis a alterações no uso do solo (LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

A fauna associada ao bioma inclui diversidade significativa de aves, répteis e anfíbios, muitos deles endêmicos ou com distribuição restrita ao semiárido brasileiro. Sob a perspectiva socioambiental, a Caatinga abriga milhões de pessoas cujos modos de vida estão profundamente associados aos recursos naturais locais, sendo que atividades como agricultura de subsistência, pecuária extensiva e uso direto da vegetação nativa historicamente moldaram a paisagem, resultando em processos de degradação ambiental, fragmentação de habitats e formação de núcleos de desertificação em diversas sub-regiões (SAMPAIO, 2010; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003). Apesar de sua relevância ecológica e social, o bioma apresenta baixos índices de proteção legal, com pequena proporção de sua área inserida em unidades de conservação de proteção integral, o que compromete a manutenção dos processos ecológicos e a resiliência frente a novas pressões antrópicas.

No contexto desta pesquisa, a Caatinga assume relevância adicional em função do potencial acústico de sua vegetação. Estudos sobre atenuação sonora por barreiras vegetais demonstram que a estrutura da vegetação, incluindo densidade do dossel, características das folhas e composição específica, influencia diretamente a capacidade de absorção e dispersão do som (AYLOR, 1972; FANG; LING, 2003; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971). A compreensão das características estruturais e funcionais do bioma é, portanto, fundamental não apenas para as avaliações de impacto ambiental, mas também para a identificação de estratégias de mitigação acústica baseadas na vegetação nativa.

4.3 Comunidades

A organização social local é fortemente influenciada por relações de parentesco, vizinhança e cooperação comunitária, características recorrentes em áreas rurais do Agreste Meridional, onde as práticas sociais e culturais mantêm forte vínculo com o território e com modos de vida tradicionais (DE ANDRADE et al., 2008). A agricultura familiar de subsistência constitui a principal base econômica dos municípios de Caetés, Pedra e Paranatama, com destaque para o cultivo de milho, feijão e mandioca, associado à criação de pequenos rebanhos, especialmente caprinos e ovinos. Essa base produtiva, frequentemente dependente das condições climáticas e com baixo nível de mecanização, contribui para a vulnerabilidade socioeconômica da população local, refletida em indicadores de renda média reduzida e dependência de políticas públicas de apoio social (BANCO DO NORDESTE DO BRASIL, 2015).

No que se refere ao acesso a serviços públicos, os equipamentos de saúde, educação e assistência social concentram-se majoritariamente nas sedes municipais, enquanto as comunidades rurais enfrentam dificuldades decorrentes das distâncias, da precariedade da malha viária e da limitada oferta de transporte público. Essas condições reforçam desigualdades intramunicipais e influenciam diretamente a qualidade de vida das populações rurais. Destaca-se ainda a presença de associações comunitárias, sindicatos rurais e organizações locais que desempenham papel relevante na articulação social, na mediação de demandas coletivas e no acesso a políticas públicas, assumindo importância estratégica frente aos processos recentes de transformação territorial decorrentes da implantação de empreendimentos de infraestrutura energética (DE ANDRADE et al., 2008; BANCO DO NORDESTE DO BRASIL, 2015).

A implantação de empreendimentos eólicos no Agreste Meridional ocorre, portanto, em territórios marcados por fragilidades sociais estruturais, mas também por fortes vínculos comunitários e identidades rurais consolidadas. A análise das comunidades do entorno desses empreendimentos requer a consideração das especificidades sociais locais, do uso tradicional do território e das percepções comunitárias sobre as mudanças socioambientais em curso, aspectos que condicionam diretamente a forma como o ruído ambiental é percebido e avaliado pelos moradores expostos (CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; GUSKI, 1999).

4.4 Dados do complexo eólico

O complexo eólico em estudo iniciou sua implantação em 2012, configurando-se como um dos primeiros empreendimento eólicos de grande porte instalados no estado de Pernambuco. O complexo é composto por 107 aerogeradores do modelo GE 1.7-100, fabricados pela General Electric Company, distribuídos em sete parques eólicos ao longo do território dos municípios de Caetés, Pedra e Paranatama. Os equipamentos são caracterizados por altura de cubo de 80 m e diâmetro do rotor de 100 m, resultando em altura total máxima de 130 m, com potência nominal de 1,7 MW por unidade.

No raio de até 500 m a partir dos aerogeradores, foram identificadas 239 habitações, que constituem o universo de estudo desta pesquisa. Essa distância é adotada como referência em função de sua relevância normativa e científica: a literatura indica que, nessa faixa, os níveis de contribuições sonoras tendem a ser mais elevados e a probabilidade de percepção de impacto é maior, especialmente para indivíduos com alta sensibilidade sonora (MANOHARE et al., 2026; PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004). A distribuição espacial das moradias em relação aos aerogeradores é variável, o que torna o estudo particularmente relevante para a avaliação dos impactos acústicos em contexto de baixo som residual característico de áreas rurais.

4.5 Uso e ocupação do solo

Os municípios de Caetés, Pedra e Paranatama, localizados no Agreste Meridional do estado de Pernambuco, apresentam padrões de uso e ocupação do solo fortemente associados às características geoambientais do semiárido e à predominância histórica da agricultura familiar. A região insere-se majoritariamente no domínio do bioma Caatinga e em áreas de transição Agreste-Sertão, com relevo suavemente ondulado a ondulado e solos de fertilidade natural variável, condicionando os usos predominantes do território (BANCO DO NORDESTE DO BRASIL, 2015; DE ANDRADE et al., 2008).

O uso do solo é caracterizado pela predominância de áreas rurais com ocupação dispersa em sítios, pequenas propriedades e comunidades. A pecuária

extensiva de pequeno porte, especialmente a criação de bovinos, caprinos e ovinos, desempenha papel relevante na ocupação do solo rural, frequentemente integrada às áreas agrícolas e utilizando pastagens naturais, áreas de pousio e remanescentes de vegetação nativa da Caatinga, resultando em mosaicos de uso com diferentes graus de intervenção antrópica. A cobertura vegetal original encontra-se amplamente modificada em função da expansão histórica das atividades agropecuárias e da extração de lenha para uso doméstico e produtivo, sendo observada a presença de fragmentos de vegetação nativa em diferentes estágios de regeneração, intercalados com áreas agrícolas e pastagens (DE ANDRADE et al., 2008; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

As áreas urbanas ocupam parcelas reduzidas do território, concentradas nas sedes municipais, onde se localizam os principais serviços públicos e equipamentos de infraestrutura, mantendo forte dependência funcional das áreas rurais do entorno. Nesse contexto, a implantação de complexos eólicos insere-se em um território marcado por usos predominantemente rurais e formas de ocupação historicamente consolidadas, exigindo análises integradas que considerem tanto os aspectos físicos quanto os sociais e produtivos do espaço (BANCO DO NORDESTE DO BRASIL, 2015).

4.6 Histórico socioambiental

O município de Caetés e a região do Agreste Meridional de Pernambuco passaram, a partir dos anos 2010, a integrar a estratégia nacional de expansão da energia eólica, impulsionada por políticas públicas de incentivo às fontes renováveis e pela identificação de áreas com potencial eólico favorável. A chegada de empreendimentos eólicos de médio e grande porte promoveu alterações no uso e na ocupação do solo, com a implantação das usinas eólicas, estradas de acesso, subestações e linhas de transmissão, modificando a paisagem e a dinâmica territorial local (BANCO DO NORDESTE DO BRASIL, 2015; CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017).

Paralelamente ao avanço desses empreendimentos, emergiram conflitos socioambientais relacionados à implantação e operação dos parques eólicos. Reportagens de alcance nacional e internacional, incluindo as publicadas pela BBC

Brasil, destacaram situações observadas no Agreste pernambucano envolvendo questionamentos de comunidades rurais sobre impactos socioambientais e mudanças no cotidiano local. Embora não tenham caráter científico, esses relatos contribuem para a compreensão das percepções sociais e das tensões vivenciadas pelas comunidades do entorno, evidenciando desafios recorrentes na relação entre parques eólicos e populações locais, entre os quais o ruído ambiental figura como um dos elementos mais frequentemente citados (SANTANA; SILVA, 2021; CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017).

Os conflitos socioambientais observados na região devem ser compreendidos como parte de um processo mais amplo de reconfiguração territorial, historicamente marcado pela ausência de um relacionamento socioambiental estruturado entre os empreendimentos e as comunidades locais. Esse cenário inclui lacunas na escuta ativa das populações do entorno, na existência de canais permanentes e transparentes de registro de queixas, e na implementação sistemática de programas socioambientais voltados à mitigação dos impactos decorrentes das fases de implantação e operação dos complexos eólicos. Essas fragilidades, acumuladas ao longo do tempo, contribuíram para a consolidação de um caso emblemático de conflito social associado à geração de energia eólica na região, cuja compreensão é indispensável para orientar as ações propostas neste estudo (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; GUSKI, 1999; MÜLLER et al., 2023).

As ações desenvolvidas no presente estudo têm como objetivo contribuir para a reversão desse cenário, por meio do fortalecimento do diálogo com as comunidades, da gestão socioambiental participativa e da adoção de estratégias orientadas à redução dos impactos relacionados ao ruído ambiental e à melhoria da relação entre os empreendimentos e as populações do entorno.

REFERÊNCIAS

- ALAMIR, M. A.; HANSEN, K. L.; ZAJAMŠEK, B.; CATCHESIDE, P. Subjective responses to wind farm noise: a review of laboratory listening test methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 114, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109317.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEólica). Boletim anual de geração eólica 2024. São Paulo: ABEEólica, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10151: acústica — medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10152: acústica — níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- AYLOR, D. Noise reduction by vegetation and ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 1B, p. 197–205, 1972.
- BERTAGNOLIO, F.; HERR, M.; MADSEN, K. D. A roadmap for required technological advancements to further reduce onshore wind turbine noise impact on the environment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 12, n. 3, 2023. DOI: 10.1002/wene.469.
- BERTELÈ, M.; BOTTASSO, C. L.; CACCIOLA, S.; DAHER ADEGAS, F.; DELPORT, S. Wind inflow observation from load harmonics. *Wind Energy Science*, v. 2, n. 2, p. 615–640, 2017.
- BOTELHO, A.; AREZES, P.; BERNARDO, C.; DIAS, H.; COSTA PINTO, L. M. Effect of wind farm noise on local residents' decision to adopt mitigation measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 14, n. 7, 2017.
- BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 1981.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 01, de 8 de março de 1990: dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política. Brasília: CONAMA, 1990.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 462, de 24 de julho de 2014: estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre. Brasília: CONAMA, 2014.
- BROOKS, T. F.; POPE, D. S.; MARCOLINI, M. A. Airfoil self-noise and prediction. Hampton: NASA, 1989. (NASA Reference Publication, 1218).

- CAO, J.; NYBORG, C. M.; FENG, J.; HANSEN, K. S.; BERTAGNOLIO, F.; FISCHER, A.; SØRENSEN, T.; SHEN, W. Z. A new multi-fidelity flow-acoustics simulation framework for wind farm application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 156, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111939.
- CHAVES, L. O.; BRANNSTROM, C.; SILVA, E. V. Energia eólica e a criação de conflitos: ocupação dos espaços de lazer em uma comunidade no Nordeste do Brasil. *Sociedade e Território*, Natal, v. 29, n. 2, p. 49–69, 2017.
- COOK, D. I.; VAN HAVERBEKE, D. F. Trees and shrubs for noise abatement. Nebraska: University of Nebraska, 1971.
- CPRH — AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Instrução Normativa CPRH nº 09/2024. Recife: CPRH, 2024.
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- DOOLAN, C. J.; MOREAU, D. J.; BROOKS, L. A. Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. *Acoustics Australia*, v. 40, n. 1, p. 7–13, 2012.
- EVANS, T.; COOPER, J. Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. *Acoustics Australia*, v. 40, n. 1, 2012.
- FANG, C. F.; LING, D. L. Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, v. 63, n. 4, p. 187–195, 2003.
- FFOWCS WILLIAMS, J. E.; HAWKINGS, D. L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, v. 264, n. 1151, p. 321–342, 1969.
- FIELDS, J. M. Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 4, p. 2245–2260, 1998. DOI: 10.1121/1.423770.
- FORSSÉN, J.; SCHIFF, M.; PEDERSEN, E.; WAYE, K. P. Wind turbine noise propagation over flat ground: measurements and predictions. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 96, n. 4, p. 753–760, 2010.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Global Wind Report 2023. Brussels: GWEC, 2023.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Global Wind Report 2025. Brussels: GWEC, 2025.
- GRONBERG, A. Sound propagation through Australian forest land: with special regards to noise generated by wind turbines. 2015. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Engineering LTH, Lund University, Lund, 2015.
- GUSKI, R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, v. 1, n. 4, p. 45–56, 1999.

- GUSKI, R.; FELSCHER-SUHR, U.; HAGEN, R. The concept of noise annoyance: how international experts see it. *Journal of Sound and Vibration*, v. 223, n. 4, p. 513–527, 1999.
- HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. *Wind farm noise: measurement, assessment and control*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- IANNACE, G.; CIABURRO, G.; TREMATERRA, A. Wind turbine noise prediction using random forest regression. *Machines*, v. 7, n. 4, 2019.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades*. Brasília: IBGE, 2023.
- IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61672-1: electroacoustics — sound level meters — part 1: specifications. Geneva: IEC, 2013.
- IEC — INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-11: wind turbines — part 11: acoustic noise measurement techniques. Geneva: IEC, 2012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2022*. Paris: IEA, 2022.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1996-2: acoustics – description, measurement and assessment of environmental noise – part 2: determination of sound pressure levels. Geneva: ISO, 2017.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 226: acoustics — normal equal-loudness-level contours. Geneva: ISO, 2003.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9613-2: acoustics — attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: general method of calculation. Geneva: ISO, 1996.
- KOLMOGOROV, A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. 1941. Reimpressão em: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, v. 434, n. 1890, p. 9–13, 1991.
- KUWANO, S. et al. Social survey on community response to wind turbine noise in Japan. *Noise Control Engineering Journal*, v. 62, n. 6, p. 503–520, 2014.
- LARATRO, A.; ARJOMANDI, M.; KELSO, R.; CAZZOLATO, B. A discussion of wind turbine interaction and stall contributions to wind farm noise. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 127, p. 1–10, 2014.
- LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Ed.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. Recife: Editora Universitária UFPE, 2003.
- MANOHARE, M.; GUERRERO, S. G.; O'HORA, D.; KING, E. Noise annoyance mapping for wind turbines: a psychoacoustic approach incorporating noise sensitivity. *Applied Acoustics*, v. 248, 2026. DOI: 10.1016/j.apacoust.2026.111280.

- MICHAUD, D. S. et al. Exposure to wind turbine noise: perceptual responses and reported health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 139, n. 3, p. 1443–1454, 2016.
- MØLLER, H.; PEDERSEN, C. S. Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 129, n. 6, p. 3727–3744, 2011.
- MÜLLER, F. J. Y.; LESCHINGER, V.; HÜBNER, G.; POHL, J. Understanding subjective and situational factors of wind turbine noise annoyance. *Energy Policy*, v. 173, 2023. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113361.
- NGUYEN, P. D.; HANSEN, K. L.; CATCHESIDE, P.; HANSEN, C. H.; ZAJAMŠEK, B. Long-term quantification and characterisation of wind farm noise amplitude modulation. *Measurement*, v. 182, 2021.
- NGUYEN, P. D.; HANSEN, K. L.; LECHAT, B.; HANSEN, C.; CATCHESIDE, P.; ZAJAMŠEK, B. Audibility of wind farm infrasound and amplitude modulated tonal noise at long-range locations. *Applied Acoustics*, v. 201, p. 109106, 2022.
- NYBORG, C. M.; FISCHER, A.; THYSELL, E.; FENG, J.; SØNDERGAARD, L. S.; SØRENSEN, T.; HANSEN, T. R.; HANSEN, K. S.; BERTAGNOLIO, F. Propagation of wind turbine noise: measurements and model evaluation. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 2265, n. 3, 2022.
- OERLEMANS, S.; SIJTSMA, P.; MÉNDEZ LÓPEZ, B. Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, v. 299, n. 4-5, p. 869–883, 2007.
- PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA, M.; DUDAREWICZ, A.; ZABOROWSKI, K.; ZAMOJSKA-DANISZEWSKA, M.; WASZKOWSKA, M. Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: a pilot study. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, v. 27, n. 3, p. 364–388, 2014.
- PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA, M.; ZABOROWSKI, K.; DUDAREWICZ, A.; ZAMOJSKA-DANISZEWSKA, M.; WASZKOWSKA, M. Response to noise emitted by wind farms in people living in nearby areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 8, 2018. DOI: 10.3390/ijerph15081575.
- PEDERSEN, E.; PERSSON WAYE, K. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 6, p. 3460–3470, 2004.
- PINDER, J. N. Mechanical noise from wind turbines. *Wind Engineering*, v. 16, n. 3, p. 158–168, 1992.
- REN21. *Renewables 2023 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2023.
- SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. (ed.). *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- SANTANA, M. G.; SILVA, L. P. *Conflitos socioambientais e energia eólica no Nordeste brasileiro*. 2021.

- SOUZA FILHO, J.; VECCI, M. A.; UEZU, A.; CELESTINO, L. Effect of vegetation cover on wind turbine noise propagation in the Caatinga biome, Brazil. In: INTER-NOISE 2026 – INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 2026, Adelaide. Proceedings [...]. Adelaide: Australian Acoustical Society, 2026.
- VAN DEN BERG, G. P. The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. 2006. Tese (Doutorado) — University of Groningen, Groningen, 2006.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.
- ZAJAMŠEK, B.; HANSEN, K. L.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, C. H. Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, v. 370, p. 176–190, 2016. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.02.001.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO AMBIENTAL EM PARQUES EÓLICOS

Modelagem Computacional, Zoneamento Acústico e Validação em Campo

1 INTRODUÇÃO

A caracterização do ruído ambiental proveniente da operação de parques eólicos constitui etapa técnica fundamental para a gestão dos impactos sonoros sobre as comunidades do entorno. Essa caracterização envolve conceitos que vão além do modelo do aerogerador, abrangendo grandezas como o nível de pressão sonora do som residual, som específico, som total e o incremento sonoro (ΔL) (ABNT, 2019; ISO, 2017). A avaliação desses parâmetros é fortemente condicionada pela velocidade e direção do vento, pela rugosidade do terreno, pelos mecanismos de propagação sonora e pelas condições meteorológicas locais e sazonais (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; LARATRO et al., 2014). Dessa forma, a caracterização adequada do ruído ambiental exige a consideração conjunta dessas grandezas e de seus condicionantes físicos, meteorológicos e territoriais, fundamentando as análises desenvolvidas nas seções seguintes.

O som específico constitui a contribuição exclusiva da fonte sonora de interesse, no caso dos parques eólicos, os aerogeradores, ao campo sonoro total. Sua determinação é essencial para avaliar a predominância do ruído do empreendimento em relação ao ambiente preexistente, orientar a tomada de decisão sobre ações de mitigação e subsidiar o licenciamento ambiental com base em evidências técnicas. O cálculo do som específico a partir de modelagem computacional, validada por medições de campo, representa ferramenta estratégica e essencial para a gestão acústica do território (ABNT, 2019; ISO, 1996; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

Entre os desafios operacionais mais recorrentes destacam-se os efeitos de mascaramento sonoro pelo som residual, a influência do vento no microfone de medição, a variabilidade sazonal do regime de ventos e a necessidade de campanhas de medição representativas e metodologicamente consistentes. A combinação entre medições em campo e modelagem acústica surge como estratégia essencial para aumentar a confiabilidade das análises, apoiar a interpretação dos resultados e identificar zonas de maior sensibilidade ao ruído nos territórios (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; LARATRO et al., 2014).

Este capítulo apresenta a metodologia e os resultados da caracterização acústica do Complexo Eólico em estudo, localizado nos municípios de Caetés, Pedra e Paranatama, no Agreste Meridional de Pernambuco. A análise abrange: a fundamentação e seleção do modelo de propagação sonora ISO 9613-2; a definição

das potências sonoras ajustadas por medições *in situ*; o regime anemométrico e a justificativa do cenário de referência; as estatísticas e a distribuição espacial dos níveis simulados; a análise da relação entre L_{Aeq} e distância; a estrutura do zoneamento acústico proposto; a análise comparativa entre o modelo variável e o critério de raio fixo; e a validação do modelo por medições de campo. O som específico e sua importância como ferramenta de gestão do território são tratados de forma transversal ao longo de todas as seções.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Som específico e sua relevância para a gestão territorial do ruído

A ABNT NBR 10151:2019 define o som específico como o nível de pressão sonora produzido exclusivamente pela fonte sonora objeto de avaliação, calculado por subtração logarítmica entre o som total (medido com a fonte operando) e o som residual (medido na ausência da fonte). Esse parâmetro constitui o descritor central para a avaliação de conformidade com os limites normativos e para a definição de zonas de gestão acústica em territórios com empreendimentos industriais ou de infraestrutura energética (ABNT, 2019).

No contexto de parques eólicos, o som específico apresenta relevância, pois é determinado pela interação entre as emissões sonoras dos aerogeradores e as condições de propagação locais, como topografia, cobertura do solo e condições meteorológicas. A diferença entre o som específico e o som residual define a capacidade de detecção perceptiva do ruído do empreendimento e é utilizada como critério técnico para priorizar ações de mitigação. Quando essa diferença é inferior a 3 dB, a contribuição da fonte específica é considerada não predominante, conforme os critérios da ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019).

A predição do som específico por modelagem computacional é preferível à medição direta em muitas situações práticas, pois permite avaliar simultaneamente centenas de receptores com múltiplos cenários operacionais, superar a impossibilidade técnica de medir toda a área de estudo e desligar todos os aerogeradores em complexos de grande porte, além de produzir mapas coropléticos com suas isófonas que subsidiam o zoneamento acústico e a gestão socioambiental do território. A validação posterior com medições de campo é etapa indispensável para

assegurar a confiabilidade do modelo (EUROPEAN COMMISSION, 2007; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

2.2 Modelos de propagação sonora: comparação e seleção

A literatura registra múltiplos modelos de propagação sonora aplicáveis a parques eólicos. Evans e Cooper (2012) compararam quatro métodos, ISO 9613-2, CONCAWE, NZS 6808:1998 e Nord2000, em 13 pontos de medição distribuídos em seis parques eólicos na Austrália Meridional. Os resultados indicaram que ISO 9613-2 e CONCAWE tendem a superestimar os níveis sonoros entre 3 e 6 dB(A) em terrenos planos, enquanto o Nord2000 apresentou desempenho intermediário. Nenhum método foi universalmente aplicado, sendo a qualidade dos dados, o uso correto das ferramentas, topografia e as condições ambientais as principais condicionantes da acurácia das predições.

Nyborg et al. (2022) compararam a ISO 9613-2 em bandas de terço de oitava, o Nord2000 e o WindSTAR-Pro, utilizando medições de campo de uma turbina SWT-DD-142 de 3,9 MW. Os resultados indicaram que a ISO 9613-2 apresentou desempenho estável em baixas frequências e baixa sensibilidade a flutuações atmosféricas, tornando-se robusta para estimativas rápidas. Concluíram que, apesar de não apresentar o melhor desempenho global, a ISO 9613-2 permanece relevante como ferramenta de avaliação e base de comparação para modelos de maior fidelidade.

Cao et al. (2022) desenvolveram o modelo multifidelidade WindSTAR, que integra modelagem de escoamento, fonte acústica e propagação. Validado com extensa campanha de medições em torno de uma turbina SGRE de 3,9/4,1 MW, o modelo apresentou diferenças absolutas médias de apenas 0,8 dB(A) em condições atmosféricas estáveis, neutras e instáveis. Forssén et al. (2010), em medições de 30 dias a 530 m de uma turbina, verificaram boa concordância entre o método sueco de propagação e os níveis médios observados em condições favoráveis, com diferenças dentro de um desvio padrão para distâncias curtas e geometrias simples.

A escolha do modelo ISO 9613-2 para este estudo fundamenta-se em sua ampla aceitação técnica, normativa e institucional para caracterização e previsão do ruído ambiental proveniente de fontes industriais e de infraestrutura, incluindo parques

eólicos. Sua aplicação é consolidada em processos de licenciamento ambiental no Brasil e no exterior, e a abordagem semiempírica considera os principais mecanismos físicos de atenuação: divergência geométrica, absorção atmosférica, efeitos do solo, barreiras, topografia e condições meteorológicas médias favoráveis à propagação (ISO, 1996). No contexto brasileiro, marcado por diversidade territorial, limitações de dados meteorológicos de alta resolução e necessidade de padronização metodológica, a ISO 9613-2 oferece equilíbrio adequado entre complexidade física e aplicabilidade prática (FORSSÉN et al., 2010; NYBORG et al., 2022).

2.3 Contextualização normativa

A ABNT NBR 10151:2019 estabelece os procedimentos para medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas, definindo os descritores L_{Aeq} e os limites normativos por categoria de uso do solo. Para áreas de sítios e fazendas, os limites são de 40 dB(A) no período diurno (07h01 às 22h00) e 35 dB(A) no período noturno (22h01 às 07h00), valores que refletem o caráter silencioso característico dos ambientes rurais e que são os referenciais adotados neste estudo (ABNT, 2019). As normas ISO 9613-1 e ISO 9613-2 complementam o arcabouço técnico, estabelecendo os procedimentos de cálculo da atenuação sonora na propagação ao ar livre. As diretrizes do WG-AEN (EUROPEAN COMMISSION, 2007) fundamentam os critérios de incerteza e validação adotados.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo e caracterização do complexo

O Complexo Eólico localiza-se no Agreste Meridional do estado de Pernambuco, nos municípios de Caetés, Pedra e Paranatama. O complexo é composto por 107 aerogeradores do modelo GE 1.7-100, fabricados pela General Electric Company, distribuídos em sete parques eólicos. Os equipamentos possuem altura de cubo de 80 m e diâmetro do rotor de 100 m, resultando em altura total máxima de 130 m, com potência nominal de 1,7 MW por unidade. No raio de até 500 m a partir dos aerogeradores, foram identificadas 239 moradias fixas, que constituem o universo de estudo desta pesquisa. O território apresenta clima semiárido, vegetação de Caatinga em diferentes estágios de conservação e relevo suavemente ondulado com elevações que favorecem a implantação dos aerogeradores (IBGE, 2023; ABEEÓLICA, 2024; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003; SAMPAIO, 2010).

3.2 Modelo de propagação sonora e parâmetros da simulação

A modelagem acústica foi realizada por meio de simulações computacionais baseadas no método dos raios, implementadas em ambiente tridimensional no software CadnaA, considerando a propagação simultânea do ruído emitido por todos os aerogeradores do complexo, conforme procedimentos da ISO 9613-2 (ISO, 1996). Os aerogeradores foram modelados como fontes sonoras pontuais posicionados a 80 m de altura do solo.

O modelo incorporou as seguintes informações do ambiente físico: topografia local com curvas de nível de equidistância de 5 m; posicionamento e características geométricas dos aerogeradores; condições meteorológicas médias anuais com temperatura do ar de 21 °C e umidade relativa de 81%; direção predominante dos ventos de 112,5°; e cobertura do solo considerada como vegetação natural, com fator de absorção $G = 1,0$. O cálculo da absorção sonora pela atmosfera foi realizado em conformidade com a ISO 9613-1, e os demais mecanismos de atenuação, divergência geométrica, efeito do solo, barreiras e topografia, foram calculados conforme a ISO 9613-2 (ISO, 1996).

O modelo matemático que recebe os valores dessas variáveis é o estabelecido pela ISO 9613-2 (ISO, 1996), no qual o nível de pressão sonora contínuo equivalente

no receptor, sob condições favoráveis à propagação, é calculado, para cada fonte sonora e banda de oitava, por:

$$L_{fT}(DW) = LW + DC - A$$

onde LW é o nível de potência sonora da fonte, DC é a correção de diretividade e A é a atenuação total ao longo da propagação, dada por $A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$, em que $A_{div} = 20 \cdot \log_{10}(d/d_0) + 11$ corresponde à divergência geométrica, A_{atm} à absorção atmosférica, calculada conforme a ISO 9613-1, A_{gr} ao efeito do solo, A_{bar} às barreiras e A_{misc} às atenuações diversas. O nível de pressão sonora ponderado em A em cada receptor resulta da soma energética das contribuições de todos os aerogeradores e bandas de frequência, com os dados de entrada descritos neste item (ISO, 1996).

Os descritores acústicos adotados correspondem aos níveis de pressão sonora contínuos equivalentes ponderados em A (L_{Aeq}), em conformidade com a ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019). Os receptores foram posicionados a 1,5 m de altura em relação ao solo, representativa da altura média do ouvido humano em ambientes externos. A incerteza expandida associada às simulações foi estimada em $\pm 4,9$ dB, conforme diretrizes do WG-AEN (EUROPEAN COMMISSION, 2007).

3.3 Potências sonoras: ajuste por medições in situ

As potências sonoras utilizadas nas simulações foram definidas a partir da integração entre valores declarados pelo fabricante General Electric, conforme o documento Technical Documentation Wind Turbine Generator Systems 1.7-100 — 50 Hz and 60 Hz (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 2013), e ajustes realizados com base em campanhas experimentais de medições de emissão sonora conduzidas no próprio Complexo Eólico em janeiro de 2025. Essa abordagem está em consonância com a melhor prática metodológica para modelagens acústicas de parques eólicos, uma vez que dados declarados pelo fabricante são frequentemente obtidos em condições normalizadas que nem sempre reproduzem as condições operacionais reais em campo (IANNACE; CIABURRO; TREMATERRA, 2019; EVANS; COOPER, 2012).

3.4 Regime anemométrico e cenário de referência ($W_{80} = 7,0$ m/s)

A caracterização do regime anemométrico foi realizada a partir das médias horárias anuais da velocidade do vento a 80 m de altura (W_{80}), correspondente à altura da nacele dos aerogeradores GE 1.7-100, com base em dados do sistema SCADA do empreendimento. O cenário de referência adotado nas simulações foi a faixa $W_{80} = 7,0$ m/s (inferior a 7,7 m/s), por corresponder à maior permanência anual (62,2% dos registros horários), representando a condição operacional estatisticamente dominante do empreendimento. Adicionalmente, esse cenário coincide com condições de maior relevância para o período noturno, que possui limites normativos mais restritivos segundo a ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

3.5 Análise estatística e zoneamento acústico

A caracterização estatística dos níveis simulados incluiu medidas de tendência central, dispersão e percentis para o conjunto de 239 receptores. A relação entre L_{Aeq} e distância foi avaliada por correlação de Pearson e Spearman, e por regressão logarítmica, fundamentada na teoria de propagação sonora em campo livre. O zoneamento acústico foi estruturado com base nos resultados das simulações, nos limites da ABNT NBR 10151:2019, na incerteza da modelagem e no limiar de perceptibilidade auditiva humana. A análise comparativa entre o modelo variável e o critério de raio fixo de 500 m foi conduzida para avaliar as implicações sociais e técnicas de cada abordagem.

3.6 Validação por medições de campo

A validação do modelo foi conduzida por meio da comparação entre os níveis L_{Aeq} simulados e os níveis de pressão sonora específica (L_{sp}) medidos em campo em 235 receptores (onde foi possível realizar as medições), conforme metodologia preditiva baseada na ISO 9613-2 e na ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019; ISO, 1996). Adotou-se como critério técnico de concordância o atendimento à faixa de incerteza de ± 5 dB, estimada com base nas recomendações do WG-AEN da Comissão Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2007). Para a aplicação desse

critério, a diferença entre o nível simulado e o medido ($\Delta = L_{Aeq} \text{ simulado} - L_{sp} \text{ medido}$) foi arredondada ao decibel inteiro, compatível com a resolução de 1 dB dos níveis simulados, sendo considerados concordantes os receptores com $|\Delta|$ arredondado igual ou inferior a 5 dB. Os indicadores de erro (diferença média, desvio padrão, MAE e RMSE) foram calculados sobre os valores de Δ sem arredondamento, e a associação entre níveis simulados e medidos foi avaliada pelos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman. As medições de campo foram realizadas simultaneamente à operação do complexo eólico, com registro das condições operacionais via sistema SCADA.

4 RESULTADOS

4.1 Potências sonoras utilizadas no modelo de simulação

As potências sonoras dos aerogeradores GE 1.7-100 constituem o principal parâmetro de entrada do modelo, sendo determinantes para a estimativa dos níveis sonoros nos receptores. Os ajustes aplicados às potências declaradas pelo fabricante variaram entre +4,0 dB e +7,1 dB conforme a faixa de velocidade do vento. Para a faixa de maior permanência anual ($W_{80} = 7,0$ m/s, 62,2% do tempo), a potência sonora ajustada resultou em 104,4 dB(A), representando acréscimo de +5,8 dB em relação ao valor indicado na documentação técnica do fabricante. Shen et al. (2019) e Cao et al. (2022) ressaltam que a acurácia dos modelos de propagação sonora é diretamente condicionada pela qualidade dos dados de emissão na fonte, e que a calibração com dados medidos em campo é especialmente relevante em terrenos complexos como o da região da Caatinga.

Tabela 2.1 – Espectro de potência sonora por banda de oitava (LW [dB]) por faixa de velocidade do vento (W_{80}) – Aerogerador GE 1.7-100, nacele a 80 m

Faixa W_{80} [m/s]	Ocorrência [%]	31,5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
7,0 (<7,7)	62,2	80,5	89,5	94,5	98,5	101,5	99,5	98,5	91,5	71,5
7,7 (7,7– 8,4)	10,4	84,1	93,1	98,1	103,1	105,1	103,1	102,1	95,1	76,1
8,4 (8,4– 9,1)	9,0	84,1	93,1	98,1	103,1	106,1	104,1	102,1	95,1	77,1
9,1 (9,1– 9,7)	4,2	85,9	94,9	99,9	104,9	107,9	105,9	103,9	97,9	78,9
9,7 (9,7– 11,1)	10,1	85,5	95,5	100,5	104,5	107,5	107,5	104,5	97,5	78,5
11,1 (11,1– 12,5)	3,5	88,4	98,4	103,4	105,4	108,4	110,4	107,4	98,4	79,4
> 12,5	0,7	88,8	98,8	103,8	105,8	108,8	110,8	107,8	97,8	78,8

Fonte: General Electric Company (2013); ajustado com medições de campo no Complexo Eólico (janeiro de 2025).

Tabela 2.2 – Potência sonora global (LwA) ajustada e declarada pelo fabricante por faixa de velocidade – Aerogerador GE 1.7-100

Faixa W_{80} [m/s]	Ocorrência [%]	LwA Ajustado [dB]	LwA Fabricante [dB]	Ajuste [dB]
7,0 (<7,7)	62,2	104,4	98,6	+5,8
7,7 (7,7–8,4)	10,4	108,1	101,0	+7,1
8,4 (8,4–9,1)	9,0	108,7	103,2	+5,5
9,1 (9,1–9,7)	4,2	110,5	105,5	+5,0
9,7 (9,7–11,1)	10,1	111,2	107,2	+4,0
11,1 (11,1–12,5)	3,5	113,6	107,5	+6,1
> 12,5	0,7	114,0	107,5	+6,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: (*) Potência ajustada por campanhas experimentais no Complexo Eólico (jan./2025). (**) Technical Documentation GE 1.7-100, 2013. Fonte: Elaboração própria (2026).

A análise dos espectros em bandas de oitava revela que a energia sonora se concentra predominantemente nas faixas de média frequência, com níveis mais elevados entre 250 Hz e 1 kHz para todas as condições de vento, com queda pronunciada nas bandas de 4 kHz e 8 kHz. Hansen, Hansen e Zajamšek (2015) destacam que, para ruído dominado por baixas frequências, a atenuação pela envoltória das edificações pode ser até 10 dB inferior à habitualmente assumida para ruído de tráfego urbano, tornando o perfil espectral dos aerogeradores particularmente relevante na avaliação das residências rurais.

4.2 Regime anemométrico e justificativa do cenário $W_{80} = 7,0$ m/s

A velocidade média anual observada foi de 7,44 m/s, evidenciando regime de ventos predominantemente elevado e tecnicamente favorável à geração eólica. O perfil horário médio anual indicou padrão de aceleração vespertino e noturno característico da região semiárida, com pico de velocidade às 20h (9,61 m/s) e menores valores entre 11h e 13h, com mínimo absoluto às 12h (5,64 m/s). Os períodos definidos pela ABNT NBR 10151:2019 apresentaram as seguintes médias horárias anuais: período diurno (07h00 às 22h00): W_{80} médio = 7,33 m/s; período noturno (22h00 às 07h00): W_{80} médio = 7,62 m/s. A velocidade média noturna é ligeiramente superior à média diurna (diferença de 0,29 m/s).

Tabela 2.3 – Distribuição anual dos registros horários de W_{80} por faixa de velocidade do vento a 80 m de altura (complexo eólico)

Faixa W_{80} [m/s]	Registros (n)	Participação (%)	% Acumulado
7,0 (<7,7)	179	62,2	62,2
7,7 (7,7–8,4)	30	10,4	72,6
8,4 (8,4–9,1)	26	9,0	81,6
9,1 (9,1–9,7)	12	4,2	85,8
9,7 (9,7–11,1)	29	10,1	95,8
11,1 (11,1–12,5)	10	3,5	99,3
> 12,5	2	0,7	100,0
Total	288	100,0	–

Nota: W_{80} = velocidade do vento a 80 m de altura (nacele). Total de 288 registros horários mensais. Fonte: Elaboração própria com base em dados SCADA do Complexo Eólico (2025).

A faixa $W_{80} = 7,0$ m/s (< 7,7 m/s) corresponde ao maior tempo de permanência anual, com 179 registros e participação de 62,2% do total, justificando sua adoção como condição de referência para a caracterização do ruído ambiental e para a

elaboração dos mapas sonoros. Os níveis L_{Aeq} apresentados referem-se exclusivamente à operação dos aerogeradores nessa faixa de velocidade predominante.

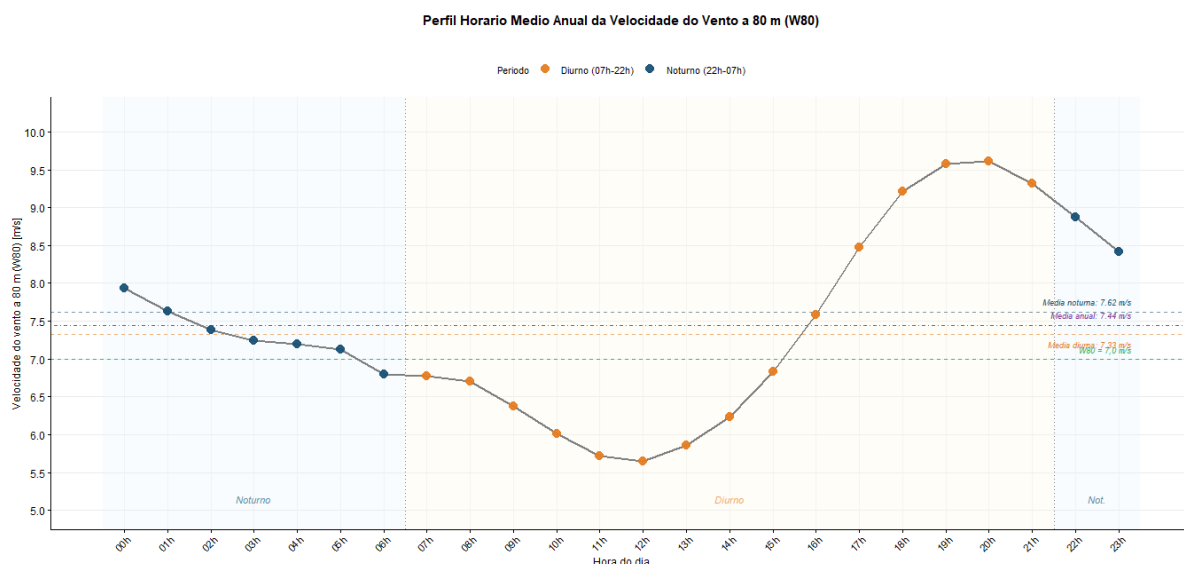


Figura 2.1 – Perfil horário médio anual da velocidade do vento a 80 m de altura (W_{80})

Fonte: Elaboração própria (2026).

4.3 Estatísticas descritivas dos níveis L_{Aeq} simulados

Os resultados da caracterização do ruído ambiental, obtidos por simulação de propagação sonora, abrangem 239 receptores localizados em raio de até 500 m dos aerogeradores, para a condição de referência $W_{80} = 7,0 \text{ m/s}$ ($< 7,7 \text{ m/s}$). O objetivo central desta análise é construir uma ferramenta estratégica para avaliar o comportamento estatístico e espacial dos níveis simulados, identificar padrões de distribuição e estabelecer critérios técnicos objetivos para a gestão acústica do território.

Tabela 2.4 – Estatísticas descritivas dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) para $W_{80} = 7,0$ m/s ($n = 239$ receptores)

Análise	Resultado	Unidade
Número de receptores (n)	239	
Média	44,1	dB
Mediana (Q2)	43,6	dB
Desvio padrão	3,12	dB
Coeficiente de variação	7,1	%
Valor mínimo	37	dB
Q1 (25%)	41,5	dB
Q3 (75%)	46,5	dB
Intervalo interquartil (IQR)	5,0	dB
Percentil 90 (P90)	48,3	dB
Percentil 95 (P95)	49,2	dB
Valor máximo	52	dB
IC 95% da média	44,1 $\pm$ 0,40	dB

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados do modelo acústico ISO 9613-2 (CadnaA).

A média de 44,1 dB e a mediana de 43,6 dB apresentam proximidade que sugere distribuição aproximadamente simétrica dos dados, sem forte influência de valores extremos sobre a tendência central. O desvio padrão de 3,12 dB e o coeficiente de variação de 7,1% evidenciam dispersão relativamente baixa, com variação espacial moderada entre os receptores. O IQR de 5,0 dB (Q1 = 41,5 dB; Q3 = 46,5 dB) demonstra que 50% dos receptores concentram-se nessa faixa, reforçando a homogeneidade do campo sonoro modelado. Os valores P90 = 48,3 dB e P95 = 49,2 dB evidenciam que os níveis mais elevados ocorrem de forma pontual, não generalizada. O IC 95% da média (44,1 $\pm$ 0,40 dB) indica elevada precisão estatística da estimativa.

A distribuição dos níveis simulados é ilustrada na Figura 2.2, por meio do histograma de frequências, e na Figura 2.3, por meio do boxplot.

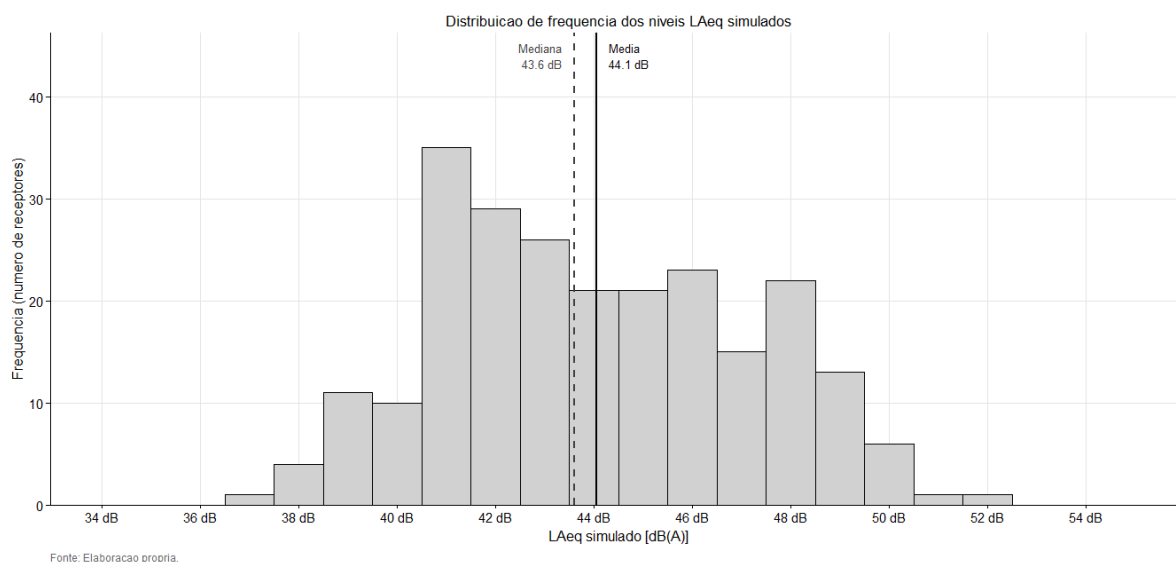


Figura 2.2 – Distribuição de frequência dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) para $W_{80} = 7,0$ m/s ($n = 239$ receptores)
Fonte: Elaboração própria.

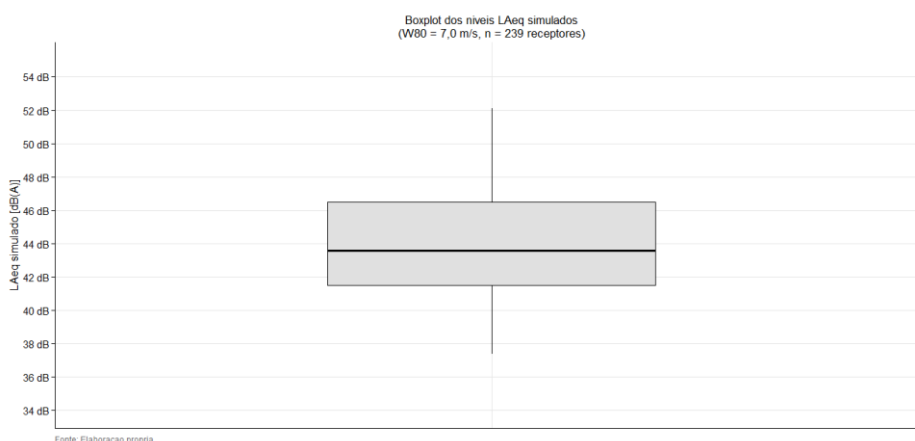


Figura 2.3 – Boxplot dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) para $W_{80} = 7,0$ m/s ($n = 239$ receptores)
Fonte: Elaboração própria.

A mediana situa-se em 43,6 dB, indicando que metade dos receptores apresenta níveis inferiores a esse valor. O intervalo interquartil ($Q1-Q3$), compreendido entre 41,5 dB e 46,5 dB, demonstra que 50% dos receptores concentram-se nessa faixa de 5,0 dB, evidenciando variação moderada e baixa dispersão central.

A extensão total observada, entre 37 dB (mínimo) e 52 dB (máximo), indica amplitude de 15 dB no campo sonoro modelado, compatível com o gradiente espacial de atenuação em função da distância ao aerogerador.

Não se observam *outliers* extremos no conjunto de dados, sugerindo consistência da modelagem e ausência de valores atípicos que distorçam a distribuição. A assimetria é discreta, com leve alongamento superior, indicando presença pontual de receptores com níveis mais elevados, sem concentração significativa.

De forma geral, o boxplot confirma que o cenário simulado apresenta comportamento espacial coerente, com níveis predominantemente distribuídos na faixa de 41,5 dB a 46,5 dB e variabilidade compatível com o padrão físico de propagação sonora em campo livre.

A Figura 2.4 apresenta a distribuição dos níveis L_{Aeq} por faixa de distância ao aerogerador.

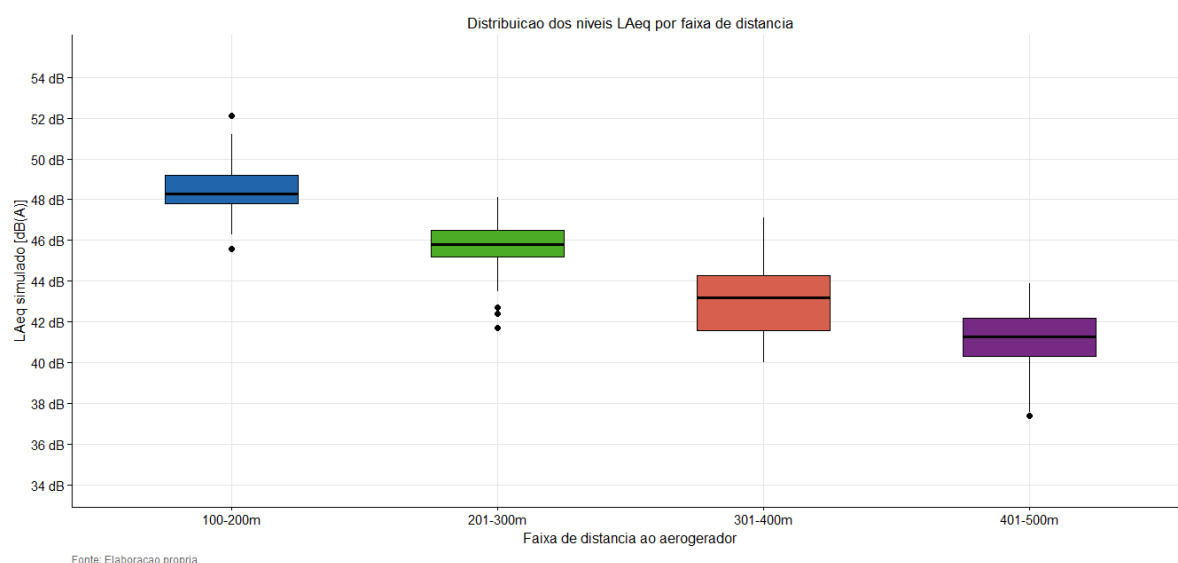


Figura 2.4 – Distribuição dos níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) por faixa de distância ao aerogerador mais próximo ($W_{80} = 7,0$ m/s)

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Correlação entre L_{Aeq} simulado e distância ao aerogerador

A relação entre os níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) para $W_{80} = 7,0$ m/s e a distância dos receptores ao aerogerador foi avaliada por meio de análise

de correlação linear (Pearson) e monotônica (Spearman), considerando os 239 receptores válidos.

4.4.1 Fundamentação física da atenuação sonora

O nível de pressão sonora é definido por:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} (p^2 / p_0^2)$$

em que p representa a pressão sonora eficaz e p_0 a pressão de referência (20 μ Pa). Em campo livre, a pressão sonora decai de forma aproximadamente inversamente proporcional à distância da fonte ($p \propto 1/d$), de modo que $p^2 \propto 1/d^2$. Substituindo na definição do nível sonoro e aplicando a propriedade logarítmica, obtém-se:

$$L_p = -20 \cdot \log_{10} (d)$$

Essa relação fundamenta o comportamento esperado de redução logarítmica dos níveis com o aumento da distância, conforme adotado em modelos de propagação sonora, como o estabelecido na ISO 9613-2.

4.4.2 Resultados da correlação

A análise indicou correlação de Pearson $r = -0,912$ ($p < 0,001$) e correlação de Spearman $\rho = -0,903$ ($p < 0,001$), evidenciando correlação negativa muito forte e estatisticamente significativa entre distância e níveis simulados.

A correlação de Spearman foi apresentada em complemento à de Pearson porque os pressupostos de normalidade da inferência paramétrica não foram plenamente atendidos: o teste de Shapiro-Wilk indicou desvio significativo da normalidade para a distância ($W = 0,947$; $p < 0,001$) e para os níveis simulados ($W = 0,979$; $p = 0,001$). A proximidade entre os coeficientes ($r = -0,912$; $\rho = -0,903$) indica, contudo, que a associação é robusta à violação desse pressuposto e essencialmente monotônica.

Ressalta-se que a distância ao aerogerador mais próximo constitui métrica espacial de referência, e não atribuição de fonte: em um complexo com múltiplos aerogeradores, a turbina mais próxima não é necessariamente a principal contribuinte para o nível sonoro recebido em um dado receptor. Os níveis L_{Aeq} simulados utilizados nesta análise incorporam a contribuição conjunta de todos os aerogeradores

do complexo, de modo que a relação com a distância deve ser interpretada como indicador do gradiente espacial de exposição.

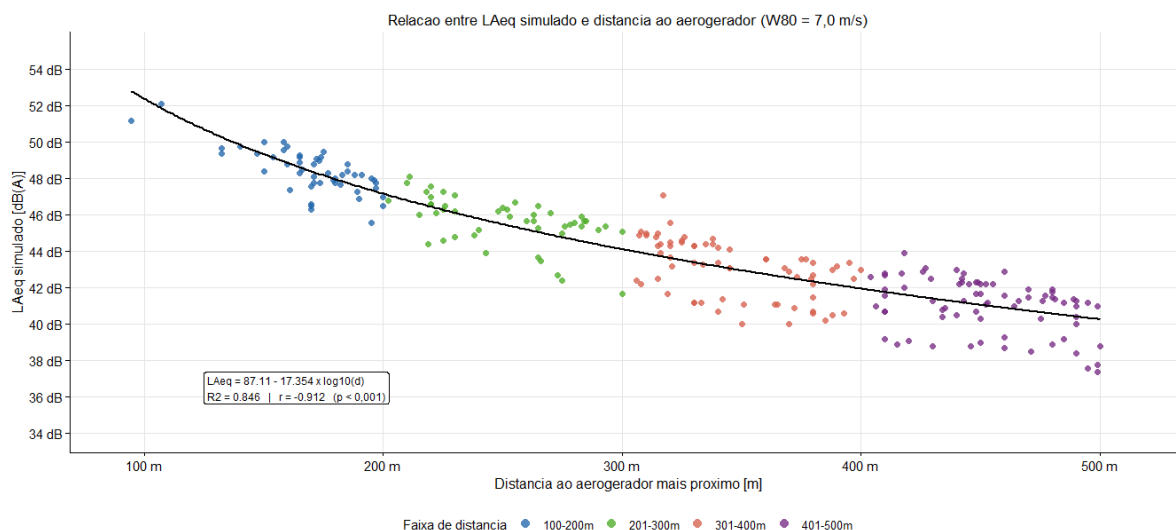
A elevada magnitude observada está em consonância com a relação teórica de atenuação logarítmica, confirmando que o comportamento espacial dos níveis segue o padrão físico esperado para propagação sonora em campo livre. A proximidade entre os coeficientes de Pearson e Spearman demonstra que a relação é monotônica e essencialmente linear no intervalo de distâncias analisado, não sendo significativamente influenciada por valores extremos.

4.4.3 Regressão logarítmica

A relação entre os níveis sonoros simulados (L_{Aeq}) e a distância foi analisada por meio de regressão logarítmica, considerando como variável independente o termo $\log_{10}(d)$. A estimativa dos parâmetros foi obtida pelo método dos mínimos quadrados, resultando na seguinte expressão:

$$L_{Aeq} = 87,113 - 17,354 \cdot \log_{10}(d)$$

onde L_{Aeq} representa o nível de pressão sonora equivalente ponderado em A (dB) e d corresponde à distância entre o receptor e o aerogerador (m). A Figura 2.5 apresenta o diagrama de dispersão com a curva de regressão ajustada.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 2.5 – Relação entre os níveis de pressão sonora equivalentes simulados (L_{Aeq}) e a distância ao aerogerador mais próximo, com curva de regressão logarítmica ajustada ($W_{80} = 7,0$ m/s, $n = 239$ receptores)

Fonte: Elaboração própria.

O coeficiente angular negativo (-17,354) evidencia o comportamento esperado de atenuação geométrica, no qual os níveis diminuem progressivamente com o aumento da distância. Em condições ideais de campo livre, a teoria acústica estabelece redução aproximada de 6 dB a cada duplicação da distância, expressa por:

$$\Delta L = -20 \cdot \log_{10} (d_2/d_1)$$

O coeficiente estimado pela regressão (-17,354) apresenta valor próximo ao comportamento teórico esperado (-20), indicando coerência física do padrão geral de propagação sonora observado. O afastamento em relação ao valor teórico ideal reflete a influência de fatores ambientais presentes no campo real, como absorção do solo, topografia e condições meteorológicas, que modificam o padrão de atenuação geométrica pura.

O ajuste apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,846$, indicando que aproximadamente 84,6% da variabilidade dos níveis sonoros simulados é explicada pela distância ao aerogerador. A parcela restante reflete a influência dos demais fatores ambientais incorporados à modelagem. O modelo apresentou elevada significância estatística ($p < 0,001$), indicando que a relação observada é estatisticamente robusta.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam que, embora a distância desempenhe papel importante na atenuação do ruído, a avaliação adequada da exposição sonora em parques eólicos requer modelos de simulação que integrem múltiplos parâmetros ambientais, permitindo representar de forma mais realista as condições de propagação sonora no território estudado.

4.5 Som específico por classe de distância e sua relevância para a gestão territorial

A análise comparativa entre o som total, o som residual e o som específico por classe de distância permitem avaliar de forma direta a predominância da contribuição dos aerogeradores no campo sonoro local. O som específico é o indicador mais

relevante para a gestão territorial do ruído, pois expressa exclusivamente a contribuição do empreendimento, descontada a ambiência sonora preexistente.

Tabela 2.5 – Estatística descritiva do som total, do som residual e da diferença aritmética total – residual por classe de distância ao aerogerador mais próximo (n = 225 receptores com dados válidos para Lsp)

Classe de distância	n	Som total médio (dB)	DP total	Som residual médio (dB)	DP resid.	Dif. total – residual média (dB)	DP dif.
100–200 m	47	54,32	3,44	42,48	3,72	11,84	3,64
201–300 m	48	51,09	4,41	40,79	3,52	10,29	3,28
301–400 m	62	49,17	3,72	40,76	3,20	8,41	3,08
401–500 m	68	46,72	3,35	40,35	3,30	6,37	3,21

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: A base de n = 225 exclui receptores com diferença som total – residual < 3 dB(A), condição na qual a subtração logarítmica é considerada não confiável (ISO 1996-2:2017). Fonte: Elaboração própria (2026).

A diferença aritmética média entre o som total e o som residual (ΔL) diminuiu de 11,84 dB na classe de 100–200 m para 6,37 dB na classe de 401–500 m, indicando redução progressiva com o aumento da distância, conforme esperado pelos processos de propagação sonora (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Em contraste, o som residual apresentou variação mais restrita entre as classes (de 40,35 dB a 42,48 dB), sugerindo maior influência de condicionantes locais e do ambiente sonoro de fundo.

4.6 Predominância do nível de pressão sonora do som específico em relação ao som residual

A análise comparativa entre os níveis sonoros simulados (L_{Aeq}) e os níveis de som residual medidos em campo permite avaliar a predominância da fonte sonora

específica no ambiente estudado. Os receptores foram agrupados em dois grupos: Grupo 1 (distância < 250 m) e Grupo 2 (distância ≥ 250 m).

Tabela 2.6 – Comparação entre níveis sonoros simulados e som residual em função da distância ao aerogerador ($W_{80} = 7,0$ m/s)

Variável	Grupo < 250 m	Grupo ≥ 250 m	Diferença
L_{Aeq} simulado ($W_{80} = 7,0$ m/s)	47,70 dB	42,46 dB	5,23 dB
Som residual	42,20 dB	40,48 dB	1,72 dB
Diferença (simulado - residual)	5,50 dB	1,98 dB	–

Fonte: Elaboração própria (2026).

Para o Grupo 1 (< 250 m), a diferença média entre o nível sonoro simulado e o som residual foi de 5,5 dB, indicando maior contribuição do ruído específico na composição do ambiente sonoro nos receptores mais próximos.

Para o Grupo 2 (≥ 250 m), a diferença média foi de 1,98 dB, portanto inferior a 3 dB. De acordo com a ABNT NBR 10151:2019, diferenças inferiores a 3 dB entre o nível sonoro total e o nível de fundo indicam que a contribuição da fonte específica não é predominante (ABNT, 2019).

Esse resultado indica que, para a maior parte dos receptores do Grupo 2, o ruído proveniente dos aerogeradores apresenta contribuição limitada, não se destacando significativamente na maior parte do tempo em relação ao som residual característico do território. O ambiente acústico da área de estudo, caracterizado por fauna, insetos, movimentação do vento na vegetação, contribui para a formação de um campo sonoro de nível de pressão sonora do som residual relativamente elevado, variável e dinâmico.

Esse resultado reforça a importância da análise adequada do nível de pressão sonora do som específico como ferramenta de gestão, pois permite distinguir objetivamente os receptores onde a contribuição do empreendimento é efetivamente relevante daqueles onde o nível de pressão sonora residual preexistente domina o e/ou influencia o campo sonoro.

4.7 Mapa coroplético e curvas de isófonas: caracterização espacial do ruído

O mapa coroplético foi estruturado com base nos resultados das simulações de propagação sonora. A representação delimita duas zonas de gestão acústica, derivadas dos critérios técnicos a seguir descritos.

Os mapas sonoros foram gerados a partir de simulação computacional numérica de propagação sonora pelo método dos raios (CadnaA), fundamentada na ISO 9613 (Partes 1 e 2), considerando as condições médias anuais representativas: temperatura de 21 °C, umidade relativa de 81%, direção predominante dos ventos de 112,5° e velocidade $W_{80} = 7,0 \text{ m/s}$ ($< 7,7 \text{ m/s}$).

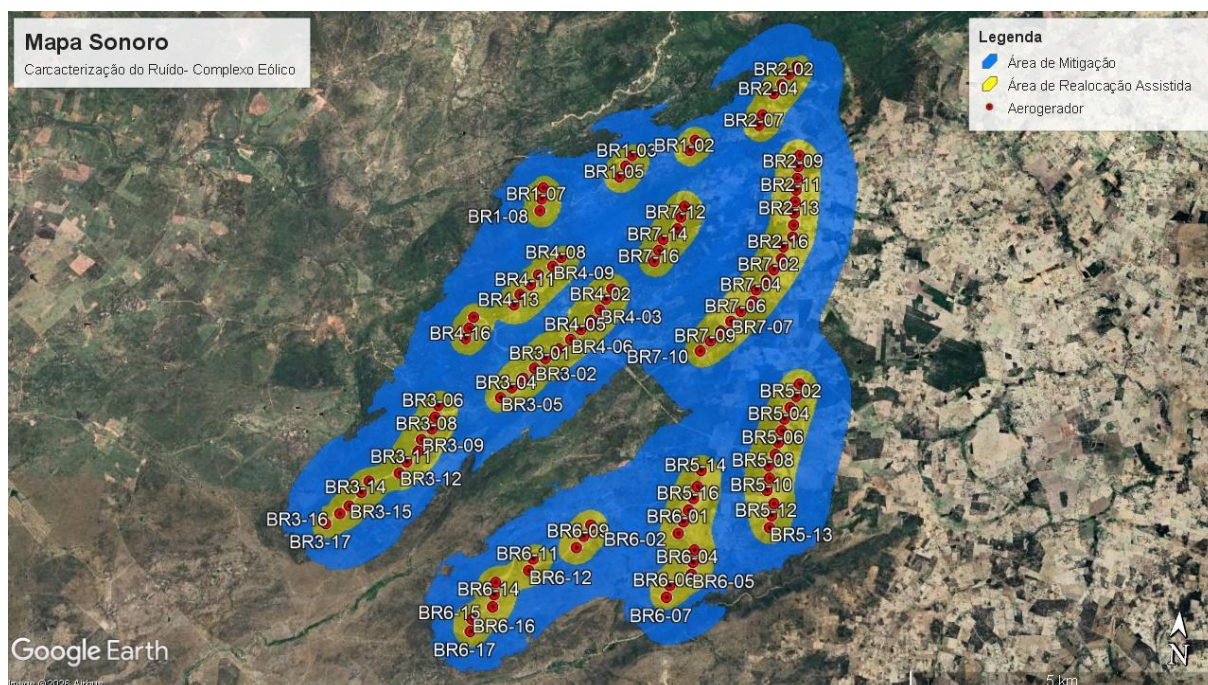


Figura 2.6 – Mapa coroplético e curvas de isófonas do zoneamento acústico proposto para o Complexo Eólico

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a identificação das zonas de trabalho, foram definidos critérios técnicos fundamentados na ABNT NBR 10151:2019 e nas características socioambientais do território. O limiar entre as zonas de realocação e mitigação adotado foi de 35-40 dB, com margem de incerteza de $\pm 3 \text{ dB}$, considerando: a mediana estatística da amostra (43,6 dB); a incerteza típica associada à modelagem de propagação sonora ($\pm 5 \text{ dB}$); a adoção de abordagem conservadora com limitação da margem operacional a $\pm 3 \text{ dB}$; o critério de perceptibilidade auditiva humana; e os limites de referência da ABNT NBR 10151:2019 para áreas de residências rurais (40 dB diurno e 35 dB noturno).

Estudos de psicoacústica indicam que variações de até aproximadamente 3 dB dificilmente são percebidas pelas pessoas como alteração significativa sonora em ambientes sujeitos à variabilidade natural (BERGLUND et al., 1999).

4.8 Estrutura do zoneamento acústico proposto

Com base nos critérios estabelecidos, o zoneamento acústico foi estruturado em duas zonas:

Zona 1 – Indicação para Realocação Assistida. Critério: L_{Aeq} simulado $>$ dB (35-40 + 3 dB). Abrange 124 receptores (51,9% da amostra). Representa prioridade de avaliação técnica e socioambiental individualizada. Caso as medidas mitigadoras não sejam tecnicamente suficientes para adequar os níveis aos limites normativos, recomenda-se a proposição de realocação assistida consensual.

Zona 2 – Indicação para Estudo e Mitigação. Critério: L_{Aeq} simulado $\leq$ (40 + 3 dB). Abrange 115 receptores (48,1% da amostra). A permanência de residências de caráter permanente é tecnicamente admissível, condicionada à realização de monitoramento acústico periódico e à aplicação de medidas mitigadoras construtivas nas edificações, com implementação de soluções acústicas compatíveis com os níveis de exposição identificados.

Quadro 2.1 – Estrutura do zoneamento acústico proposto para o complexo eólico (n = 239 receptores, $W_{80} = 7,0$ m/s)

Zona	Critério de Enquadramento	Receptores (n)	Percentual (%)	Recomendação
Zona 1	$L_{Aeq} > (35-40 + 3 \text{ dB})$	124	51,9%	Avaliação técnica e socioambiental individualizada; realocação assistida consensual quando mitigação for insuficiente
Zona 2	$L_{Aeq} \leq (35-40 + 3 \text{ dB})$	115	48,1%	Permanência tecnicamente admissível;

				mitigação construtiva e monitoramento periódico
--	--	--	--	---

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: Limiar adotado: $L_{Aeq} = 43 \text{ dB}$ [40 dB (NBR 10151:2019) + 3 dB (margem de perceptibilidade e incerteza)].

4.9 Análise comparativa: modelo variável por zonas versus critério de raio fixo de 500 m

Para avaliar a robustez do modelo de zoneamento acústico variável proposto, foi realizada simulação comparativa considerando um critério hipotético baseado exclusivamente em raio fixo de distanciamento mínimo de 500 m entre as residências e o aerogerador mais próximo. Esse tipo de critério radial tem sido discutido em esferas regulatórias no Brasil e serve como referência para contextualizar os resultados obtidos pelo modelo acústico.

Tabela 2.7 – Comparação entre critério radial fixo e modelo acústico variável
(n = 239 receptores)

Critério Avaliado	Residências (n)	Percentual (%)	Implicação Social
Raio fixo de 500 m	239	100,0%	Todas as residências direcionadas à realocação
Modelo acústico variável	124	51,9%	Residências com necessidade técnica de realocação
Permanência com mitigação	115	48,1%	Residências que podem permanecer com medidas mitigadoras e acompanhamento.

Fonte: Elaboração própria (2026).

O modelo variável por zonas indicou a necessidade de realocação de 124 residências (51,9% do total). O critério radial fixo de 500 m implicaria o direcionamento à realocação de todas as 239 residências avaliadas (100% da amostra), resultando

no encaminhamento indevido de 115 residências (48,1%) à realocação, embora essas unidades estejam classificadas na zona de estudo e mitigação, onde intervenções construtivas podem viabilizar a permanência adequada das famílias.

Embora exista forte correlação entre distância e nível sonoro simulado ($r = -0,912$; $p < 0,001$), a análise demonstra que a distância isoladamente não constitui critério suficiente para decisões de realocação.

O modelo variável por zonas de gestão apresenta vantagens técnicas e sociais em relação ao critério radial fixo: reflete a resposta acústica individual e específica de cada receptor; incorpora margem de incerteza da modelagem (± 3 dB); considera o limiar de perceptibilidade auditiva humana; reduz o impacto social potencial em 48,1%; e se alinha às boas práticas de avaliação acústica em áreas rurais.

A integração entre análise estatística, representação espacial e fundamentação técnica socioambiental confere consistência metodológica ao modelo de zoneamento proposto, cuja aplicação pode ser aplicada e testada para outras áreas com empreendimento eólicos, contribuindo para a gestão acústica do território tanto em ações de mitigação como no planejamento territorial dos empreendimentos.

4.10 Validação da caracterização acústica - modelagem computacional

Após a elaboração dos mapas coropléticos de isófonas, procedeu-se à validação em campo dos resultados obtidos por simulação, assegurando a confiabilidade do modelo acústico adotado e conferindo robustez às decisões técnicas e socioambientais subsequentes. A validação foi conduzida mediante comparação entre os níveis L_{Aeq} simulados e os níveis L_{sp} medidos em campo em 235 receptores, adotando-se o critério de concordância de ± 5 dB, conforme recomendações do WG-AEN (EUROPEAN COMMISSION, 2007).

Tabela 2.8 – Indicadores estatísticos da validação da modelagem acústica ($n = 235$ receptores, critério ± 5 dB)

Parâmetro de validação	Valor
Número de pontos de medição (n)	235
Pontos dentro de ± 5 dB (Δ arredondado ao dB inteiro)	228 (97,02%)

Pontos fora do intervalo de ± 5 dB	7 (2,98%)
Diferença média (simulado – medido)	-0,69 dB
Desvio padrão dos resíduos	2,97 dB
Erro médio absoluto (MAE)	2,51 dB
Erro quadrático médio (RMSE)	3,05 dB
Correlação de Pearson, simulado $\times$ medido (r)	0,816 ($p < 0,001$)
Correlação de Spearman, simulado $\times$ medido (ρ)	0,823 ($p < 0,001$)
Coeficiente de determinação, simulado $\times$ medido (R^2)	0,666

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: Critério de concordância conforme WG-AEN (EUROPEAN COMMISSION, 2007), aplicado à diferença $\Delta = L_{Aeq}$ simulado – L_{sp} medido arredondada ao dB inteiro. Diferença média, desvio padrão, MAE e RMSE calculados sobre Δ sem arredondamento. Correlações e R^2 referentes à relação entre níveis simulados e medidos ($n = 235$).

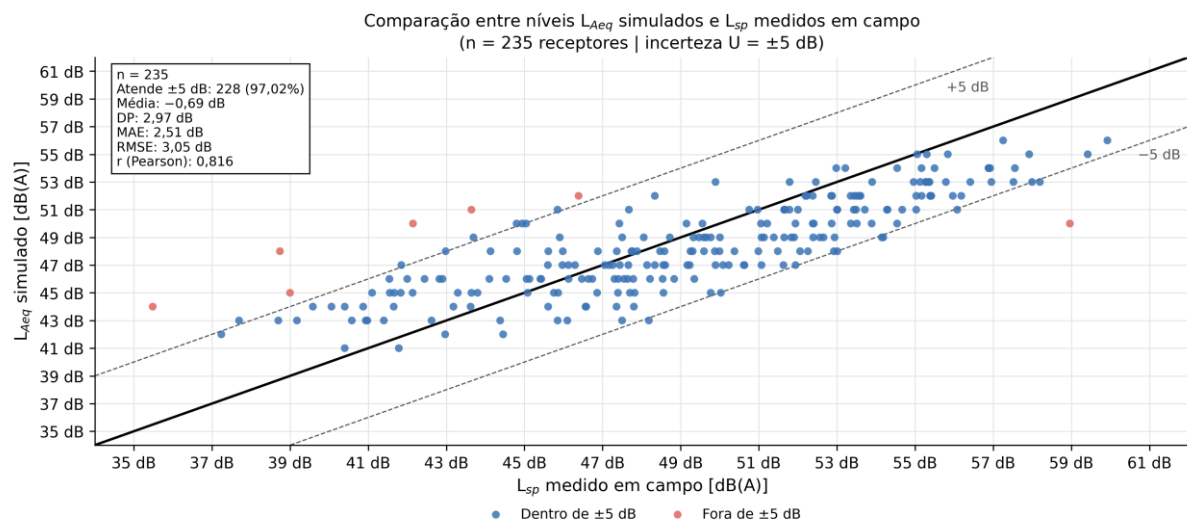
Com base nas 235 medições de campo, 228 atenderam ao critério estabelecido ($|\Delta|$ arredondado ao dB inteiro igual ou inferior a 5 dB), resultando em índice de assertividade de 97,02%. Apenas 7 pontos (2,98%) apresentaram desvios superiores a esse limite. A diferença média entre valores simulados e medidos foi de -0,69 dB, indicando ausência de viés sistemático relevante, correspondendo a leve subestimação média dos níveis medidos, de magnitude inferior a 1 dB e pequena frente ao critério de ± 5 dB. O desvio padrão de 2,97 dB, aliado ao erro médio absoluto de 2,51 dB, evidencia baixa dispersão dos resultados e estabilidade preditiva. O erro quadrático médio (RMSE) de 3,05 dB confirma que a variabilidade observada encontra-se dentro da faixa esperada para modelagens ambientais de propagação sonora em campo aberto. A correlação entre níveis simulados e medidos foi forte e estatisticamente significativa ($r = 0,816$; $\rho = 0,823$; $p < 0,001$), e o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,666$) indica que cerca de dois terços da variabilidade dos níveis medidos é reproduzida pelo modelo, sendo a parcela restante compatível com a variabilidade do som residual, com as condições meteorológicas instantâneas de cada medição e com a incerteza de medição.

Em estudos de validação de modelagens ambientais para fontes industriais e energéticas, concordâncias superiores a 85–90% dentro da faixa de ± 5 dB são consideradas satisfatórias para fins regulatórios (EUROPEAN COMMISSION, 2007). O desempenho observado de 97,02% situa-se acima desse patamar, caracterizando elevado grau de aderência entre a previsão do modelo e o comportamento acústico real. Quando mais de 95% das observações situam-se dentro do intervalo de incerteza previamente definido, pode-se afirmar que o modelo apresenta aderência consistente ao fenômeno físico representado, com baixa probabilidade de erro sistemático significativo.

As Figuras 2.7 e 2.8 apresentam, respectivamente, a comparação direta entre os níveis L_{Aeq} simulados e os L_{sp} medidos em campo ($n = 235$ receptores, $U = \pm 5$ dB), e os resíduos da validação acústica em função da distância ao aerogerador mais próximo. A fundamentação do cálculo de incerteza com base no WG-AEN (EUROPEAN COMMISSION, 2007) reforça o alinhamento metodológico com boas práticas, conferindo legitimidade científica aos cenários simulados e sustentando, com elevado grau de confiança, a estratégia de mitigação e gestão acústica proposta.

Na Figura 2.7, os pontos distribuem-se em torno da linha de identidade, com a maior parte contida na faixa de ± 5 dB. Observa-se, contudo, inclinação da nuvem de pontos inferior à da linha de identidade: nos receptores com níveis medidos inferiores a 45 dB, o modelo tende a superestimar os níveis de campo (diferença média de +3,2 dB), enquanto nos receptores com níveis medidos iguais ou superiores a 55 dB tende a subestimá-los (diferença média de -3,2 dB). Esse comportamento de compressão da faixa de níveis é compatível com a influência de fatores locais não representados na simulação, como a variabilidade do som residual e as condições meteorológicas no momento de cada medição, e se compensa no conjunto da amostra, resultando em diferença média de -0,69 dB. A análise dos resíduos (Figura 2.8) indica que as diferenças se distribuem em torno de zero ao longo de todo o gradiente de distância, sem tendência estatisticamente significativa com a distância ($r = 0,127$; $p = 0,052$). A subestimação observada na faixa superior dos níveis medidos deve ser considerada na aplicação dos resultados aos receptores de maior exposição, em geral os mais próximos da fonte.

A Figura 2.7 apresenta a comparação direta entre os níveis simulados e os níveis medidos em campo.

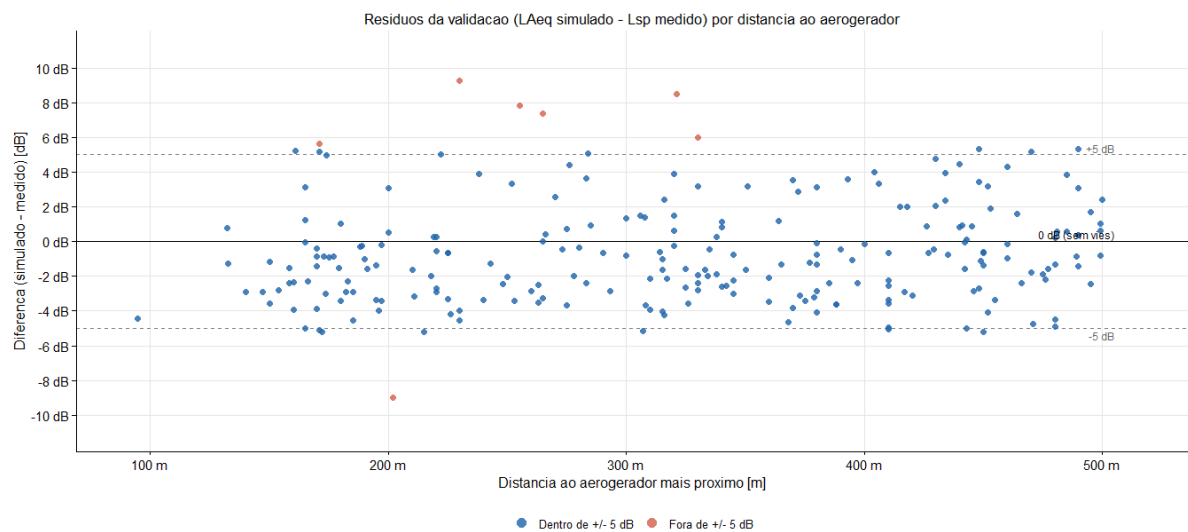


Nota: $\Delta = L_{Aeq}$ simulado - L_{sp} medido, arredondado ao dB inteiro para aplicação do critério de ± 5 dB.

Figura 2.7 – Comparação entre níveis L_{Aeq} simulados e L_{sp} medidos em campo (n = 235 receptores, $U = \pm 5$ dB)

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 2.8 apresenta os resíduos da validação, expressos pela diferença entre os níveis simulados e os medidos em campo, em função da distância ao aerogerador mais próximo.



Fonte: Elaboracao propria.

Figura 2.8 – Resíduos da validação acústica: diferença entre L_{Aeq} simulado e L_{sp} medido em campo por distância ao aerogerador mais próximo (n = 235 receptores, $U = \pm 5$ dB)

Fonte: Elaboração própria.

Recomenda-se que toda modelagem de ruído ambiental associada a parques eólicos seja validada por meio de medições de campo realizadas sob condições meteorológicas equivalentes às adotadas na simulação, a fim de garantir comparabilidade adequada entre os resultados. Destacam-se, em especial, a velocidade e a direção do vento como variáveis determinantes para a emissão e propagação sonora.

5 DISCUSSÃO

Os resultados da validação acústica demonstram que a modelagem ISO 9613-2, quando calibrada com dados de emissão sonora reais do próprio complexo, apresenta desempenho preditivo robusto para aplicação em complexos eólicos presentes no semiárido brasileiro. A assertividade de 97,02% em 235 pontos de medição supera os patamares internacionais de referência para fins regulatórios (EUROPEAN COMMISSION, 2007) e sustenta a utilização do modelo como ferramenta central para a gestão acústica do território. A diferença média de $-0,69$ dB indica leve subestimação média dos níveis medidos pelo modelo, de pequena magnitude frente ao critério de ± 5 dB, aspecto que deve ser considerado na interpretação dos resultados nos receptores mais próximos da fonte.

Os ajustes aplicados às potências sonoras declaradas pelo fabricante ($+4,0$ a $+7,1$ dB) evidenciam a limitação dos dados de catálogo para uso direto em modelagens ambientais, confirmando os achados de Iannace, Ciaburro e Trematerra (2019) e Evans e Cooper (2012). A adoção de potências ajustadas por medições *in situ*, em lugar da dependência exclusiva de valores declarados pelo fabricante, alinha-se à melhor prática metodológica e resulta em estimativas mais representativas das condições operacionais reais do empreendimento em terreno complexo de Caatinga.

O regime anemométrico, com concentração de 62,2% do tempo na faixa $W_{80} = 7,0$ m/s ($< 7,7$ m/s) e velocidade média noturna ligeiramente superior à diurna, representa desafio regulatório: as condições de maior geração eólica coincidem com o período de limites normativos mais restritivos (35 dB noturno). Esse dado reforça a importância de considerar o perfil horário real dos ventos na avaliação da exposição ao ruído eólico, aspecto frequentemente negligenciado em análises baseadas apenas em valores médios anuais.

A análise de predominância do som específico evidencia que, para receptores a distâncias superiores a 250 m, a diferença entre o L_{Aeq} simulado e o som residual é inferior a 3 dB, indicando que a contribuição dos aerogeradores não é predominante no caso estudado segundo os critérios da ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019). Esse resultado é tecnicamente relevante para a gestão territorial, pois permite identificar objetivamente os receptores onde a contribuição do empreendimento é efetivamente significativa. No entanto, é importante destacar que a não predominância acústica não implica ausência de incômodo percebido, uma vez

que fatores psicossociais podem amplificar a resposta subjetiva ao ruído mesmo em situações de conformidade normativa (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MØLLER; PEDERSEN, 2011; MÜLLER et al., 2023).

O zoneamento acústico proposto demonstra que a adoção de um modelo variável, fundamentado em simulação acústica e critérios técnicos objetivos, reduz no caso estudado em 48,1% o número de residências indicadas para realocação em comparação com o critério radial fixo de 500 m. Essa diferença representa impacto social potencial de grande magnitude: 115 famílias que, sob o critério radial, seriam indicadas para realocação, e que podem permanecer em suas residências mediante implementação de medidas mitigadoras construtivas e acompanhamento técnico adequado. A integração entre análise estatística, representação espacial e fundamentação técnica confere ao modelo de zoneamento proposto um caráter estratégico para a gestão acústica de territórios com empreendimento eólicos, com potencial de replicação em outros complexos do Nordeste brasileiro.

A regressão logarítmica obtida ($L_{Aeq} = 87,113 - 17,354 \cdot \log_{10}(d)$; $R^2 = 0,846$) confirma a coerência física do padrão de propagação sonora modelado e sua proximidade com o comportamento teórico de campo livre (coeficiente teórico ideal = -20 dB). A diferença em relação ao valor teórico é esperado e reflete a influência de fatores ambientais reais, como absorção do solo, topografia e cobertura vegetal, que modificam o padrão de atenuação geométrica pura. A robustez estatística do ajuste ($p < 0,001$; $R^2 = 0,846$) válida a utilização da distância como variável preditora central nos modelos de gestão territorial do ruído eólico, sem dispensar a modelagem computacional acústica, os fatores climáticos e ecológicos para a avaliação individualizada de receptores.

6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou a caracterização acústica integrada do Complexo Eólico combinando modelagem computacional ISO 9613-2, análise do nível de pressão sonora do som específico e validação por medições de campo. As principais conclusões são:

- a)** A modelagem acústica baseada na ISO 9613-2, calibrada com dados de emissão real do complexo, demonstrou desempenho preditivo robusto, com assertividade de 97,02% em 235 pontos de medição (MAE = 2,51 dB; RMSE = 3,05 dB), superando os referenciais internacionais para fins regulatórios (EUROPEAN COMMISSION, 2007).
- b)** Os ajustes das potências sonoras em relação aos valores declarados pelo fabricante variaram entre +4,0 e +7,1 dB, confirmando a necessidade de calibração experimental para modelagens representativas das condições reais de operação em campo.
- c)** O cenário de referência $W_{80} = 7,0$ m/s justifica-se pela maior permanência anual (62,2% dos registros horários) e por coincidir com condições críticas para o período noturno, que possui limites normativos mais restritivos (35 dB pela ABNT NBR 10151:2019).
- d)** O som específico reduz progressivamente com a distância (de 11,84 dB na faixa 100–200 m para 6,37 dB na faixa 401–500 m). Para receptores a distâncias superiores a 250 m, a diferença entre L_{Aeq} simulado e som residual é inferior a 3 dB, indicando não predominância da fonte segundo critérios da ABNT NBR 10151:2019.
- e)** A regressão logarítmica ($L_{Aeq} = 87,113 - 17,354 \cdot \log_{10}(d)$; $R^2 = 0,846$; $p < 0,001$) confirma coerência física com a teoria de propagação sonora em campo livre, com correlação de Pearson $r = -0,912$ entre distância e nível simulado.
- f)** O zoneamento acústico variável (Zona 1: $L_{Aeq} > 43$ dB, 124 receptores; Zona 2: $L_{Aeq} \leq 43$ dB, 115 receptores) reduz em 48,1% o número de residências indicadas para realocação em relação ao critério radial fixo de 500 m, demonstrando sua superioridade técnica e social.
- g)** O modelo de caracterização acústica proposto constitui ferramenta estratégica para a gestão do ruído em territórios com parques eólicos, com

potencial de replicação em outros complexos do Nordeste brasileiro e contribuição ao aprimoramento do arcabouço regulatório nacional.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. Boletim anual de geração eólica 2024. São Paulo: ABEEólica, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10151: acústica – medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BERGLUND, B.; LINDVALL, T.; SCHWELA, D. H. (ed.). Guidelines for community noise. Geneva: World Health Organization, 1999.
- BROOKS, T. F.; POPE, D. S.; MARCOLINI, M. A. Airfoil self-noise and prediction. Hampton: NASA, 1989. (NASA Reference Publication, 1218).
- CAO, J.; NYBORG, C. M.; FENG, J.; HANSEN, K. S.; BERTAGNOLIO, F.; FISCHER, A.; SØRENSEN, T.; SHEN, W. Z. A new multi-fidelity flow-acoustics simulation framework for wind farm application. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 156, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111939.
- DATAKUSTIK GMBH. CadnaA: Computer Aided Noise Abatement. Versão 3.7. Greifenberg: Datakustik GmbH, 2007.
- EUROPEAN COMMISSION. Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Luxembourg: European Commission, 2007. (Working Group – Assessment of Exposure to Noise, WG-AEN).
- EVANS, T.; COOPER, J. Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. Acoustics Australia, v. 40, n. 1, 2012.
- FORSSÉN, J.; SCHIFF, M.; PEDERSEN, E.; WAYE, K. P. Wind turbine noise propagation over flat ground: measurements and predictions. Acta Acustica united with Acustica, v. 96, n. 4, p. 753–760, 2010.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY. Technical documentation wind turbine generator systems 1.7-100 – 50 Hz and 60 Hz. GE Renewable Energy, 2013.
- GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind Report 2025. Brussels: GWEC, 2025.
- HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. Wind farm noise: measurement, assessment and control. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- HANSEN, K. L.; HANSEN, C. H.; ZAJAMŠEK, B. Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences. Building and Environment, v. 94, p. 764–772, 2015.

- IANNACE, G.; CIABURRO, G.; TREMATERRA, A. Wind turbine noise prediction using random forest regression. *Machines*, v. 7, n. 4, 2019.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades*. Brasília: IBGE, 2023.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1996-2: acoustics – description, measurement and assessment of environmental noise – part 2: determination of sound pressure levels. Geneva: ISO, 2017.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9613-1: acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors – part 1: calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Geneva: ISO, 1996.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9613-2: acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors – part 2: general method of calculation. Geneva: ISO, 1996.
- LARATRO, A.; ARJOMANDI, M.; KELSO, R.; CAZZOLATO, B. A discussion of wind turbine interaction and stall contributions to wind farm noise. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 127, p. 1–10, 2014.
- MØLLER, H.; PEDERSEN, C. S. Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 129, n. 6, p. 3727–3744, 2011.
- MÜLLER, F. J. Y.; LESCHINGER, V.; HÜBNER, G.; POHL, J. Understanding subjective and situational factors of wind turbine noise annoyance. *Energy Policy*, v. 173, 2023.
- NYBORG, C. M.; FISCHER, A.; THYSELL, E.; FENG, J.; SØNDERGAARD, L. S.; SØRENSEN, T.; HANSEN, T. R.; HANSEN, K. S.; BERTAGNOLIO, F. Propagation of wind turbine noise: measurements and model evaluation. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 2265, n. 3, 2022.
- PEDERSEN, E.; PERSSON WAYE, K. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 6, p. 3460–3470, 2004.
- SHEN, W. Z.; ZHU, W. J.; BARLAS, E.; LI, Y. Advanced flow and noise simulation method for wind farm assessment in complex terrain. *Renewable Energy*, v. 143, p. 1812–1825, 2019.
- SOUZA FILHO, J.; VECCI, M. A.; UEZU, A.; CELESTINO, L. Effect of vegetation cover on wind turbine noise propagation in the Caatinga biome, Brazil. In: INTER-NOISE 2026 – INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 2026, Adelaide. Proceedings [...]. Adelaide: Australian Acoustical Society, 2026.
- ZAJAMŠEK, B.; HANSEN, K. L.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, C. H. Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, v. 370, p. 176–190, 2016.

CAPÍTULO 3

SOM RESIDUAL E PAISAGEM SONORA

1 INTRODUÇÃO

1.1 Conceito de som residual no contexto do estudo

A caracterização do ruído ambiental em parques eólicos envolve grandezas que vão além das propriedades físicas do som produzido pelo aerogerador, abrangendo o som residual, o som específico, o som total e o incremento sonoro (ΔL). A avaliação desses parâmetros é fortemente condicionada pela velocidade e direção do vento, pela rugosidade do terreno, fatores ecológicos, pelos mecanismos de propagação sonora e pelas condições meteorológicas locais e sazonais (ISO, 2017; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Entre os desafios setoriais mais recorrentes destacam-se o entendimento sobre os efeitos e implicações do mascaramento acústico do som residual, a influência do vento na medição, a variabilidade sazonal do regime de ventos e a necessidade de campanhas de medição representativas e metodologicamente consistentes (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; LARATRO et al., 2014).

Segundo a ABNT NBR 10151:2019, o som residual corresponde ao nível de pressão sonora total medido quando a fonte específica se encontra desligada, representando a soma das contribuições sonoras provenientes de outras fontes naturais e antrópicas existentes no entorno (ABNT, 2019). No presente estudo, o som residual expressa o ambiente acústico preexistente na área de influência do complexo eólico avaliado, medido na ausência da contribuição dos aerogeradores. Essa grandeza constitui referência técnica indispensável para o cálculo do som específico e para a avaliação de conformidade normativa dos níveis sonoros totais, ao mesmo tempo em que delimita a margem acústica disponível para a contribuição da fonte eólica antes que os limites normativos sejam alcançados.

O som residual estabelece ainda a referência perceptiva a partir da qual novos estímulos sonoros são avaliados pelo ouvinte, influenciando processos de detecção, contraste auditivo e atribuição de significado ao som. Do ponto de vista psicoacústico, a percepção sonora e a resposta de incômodo das comunidades não dependem exclusivamente do nível sonoro absoluto, mas da relação entre o ruído específico do empreendimento e o ambiente acústico preexistente (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MANOHARE et al., 2026). Assim, a correta determinação do som residual constitui a base técnica para o cálculo do ruído específico e representa elemento fundamental tanto para a avaliação da conformidade legal quanto para a compreensão

integrada dos aspectos físicos e perceptivos do ruído ambiental associado à operação de parques eólicos.

A paisagem sonora do entorno dos receptores avaliados não se resume ao nível médio de som residual expresso em dB(A). Ela é composta por um conjunto de fontes naturais e antrópicas que se sobrepõem ao longo do tempo e do espaço, conferindo ao ambiente acústico características que não são plenamente capturadas por métricas energéticas médias. Em áreas rurais onde o silêncio predomina durante grande parte do dia e especialmente à noite, o contraste entre a paisagem sonora preexistente e o ruído introduzido pelos aerogeradores tende a amplificar a percepção de incômodo, fenômeno frequentemente descrito na literatura de ruído eólico como efeito de mascaramento acústico parcial (*partial masking*), em que a fonte específica não suprime o ambiente sonoro de fundo, mas se destaca perceptivamente pelo contraste temporal e espectral (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MANOHARE et al., 2026; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Este capítulo tem por objetivo caracterizar o som residual e a paisagem sonora do território de influência do complexo eólico, analisando os fatores meteorológicos, ecológicos e de infraestrutura que condicionam o ambiente acústico preexistente, e comparar o som residual ao som específico dos aerogeradores, de modo a subsidiar a avaliação de conformidade normativa e a interpretação perceptiva do ruído no contexto rural do semiárido.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Critério de desligamento e raio de exclusão

A determinação do som residual foi realizada com todos os aerogeradores desligados em um raio mínimo de 1 km em relação aos pontos de medição, assegurando a eliminação da influência direta e indireta do ruído associado à operação das turbinas. Esse critério metodológico visa evitar a interferência de componentes acústicas características do funcionamento dos aerogeradores, como tonalidades, flutuações temporais e efeitos de modulação de amplitude, garantindo que os níveis medidos representem exclusivamente o ruído ambiental de fundo (ABNT, 2019).

As campanhas de medição ocorreram nos meses de março, abril e junho de 2025, abrangendo os receptores distribuídos no entorno do complexo, com distâncias de até 500 m dos aerogeradores. As medições foram realizadas entre o fim da tarde e o início da noite, com horários de início entre 15h37 e 22h31 e término até 22h41, com predominância entre 18h e 22h. Os procedimentos de medição, instrumentação e controle de qualidade foram conduzidos em conformidade com a ABNT NBR 10151:2019, com sonômetros integradores de precisão devidamente calibrados antes e após cada campanha. Tempos de medição de 10 minutos foram definidos de modo a captar a variabilidade temporal do ambiente sonoro, e eventos sonoros atípicos ou transitórios foram identificados e excluídos da análise, 237 receptores com dados válidos de som residual.

2.2 Condições meteorológicas das campanhas

As campanhas foram realizadas sob velocidades de vento superiores a faixa de 7,0 -7,7 m/s na altura da nacele. A velocidade do vento na nacele, registrada simultaneamente às medições acústicas via sistema SCADA do empreendimento, apresentou média de 8,25 m/s (DP = 0,58 m/s) e mediana de 8,14 m/s, variando entre 7,04 m/s e 11,00 m/s, com coeficiente de variação de 7,0%, indicando condições meteorológicas relativamente homogêneas ao longo das campanhas. A distribuição por faixas revelou concentração predominante na faixa de 8 a 10 m/s, que correspondeu a 60,8% dos receptores (144 de 237), seguida da faixa de 6 a 8 m/s com 38,4% (91 receptores), e apenas 0,8% (2 receptores) com velocidades iguais ou superiores a 10 m/s.

Tabela 3.1 – Estatísticas descritivas da velocidade do vento na nacele durante as campanhas de medição de som residual (n = 237 receptores)

Estatística descritiva	Valor
Número de receptores (n)	237
Média	8,25 m/s
Mediana	8,14 m/s
Desvio padrão	0,58 m/s
Mínimo	7,04 m/s
Máximo	11,00 m/s
Coeficiente de variação (CV)	7,0%
IC 95% da média	8,25 ± 0,07 m/s
Faixa 6–8 m/s	91 receptores (38,4%)
Faixa 8–10 m/s	144 receptores (60,8%)
Faixa > 10 m/s	2 receptores (0,8%)

Fonte: Elaboração própria com base em dados do sistema SCADA do complexo eólico (2025).

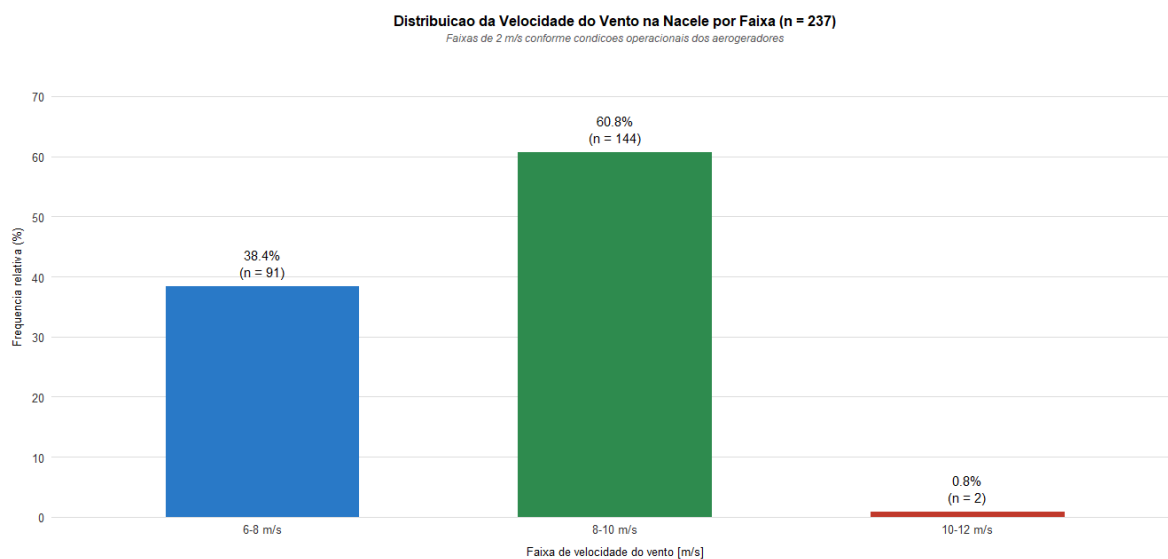


Figura 3.1 – Frequência da velocidade do vento na nacele, agrupada por faixas de 2 m/s, durante as campanhas de medição (n = 237 receptores)

Fonte: Elaboração própria (2026).

A verificação da correlação entre a velocidade do vento na nacele e o nível de som residual indicou associação positiva moderada e estatisticamente significativa ($r = 0,383$; $p < 0,001$), sugerindo que as condições meteorológicas exercem influência sobre o ambiente acústico preexistente, independentemente da operação dos

aerogeradores. Esse resultado é coerente com a literatura que documenta o papel do vento como fonte sonora natural em ambientes rurais, por meio da movimentação da vegetação, turbulência atmosférica junto ao solo e interação com obstáculos (AYLOR, 1972; FIELDS, 1998). O mascaramento acústico energético (energetic masking) promovido pelo vento constitui um dos principais condicionantes da variabilidade temporal do som residual em parques eólicos rurais, dificultando a detecção do ruído específico dos aerogeradores em condições de vento elevado (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

2.3 Incerteza associada às medições de som residual

A avaliação da incerteza associada às medições de som residual é etapa metodológica essencial para a correta interpretação dos resultados e para a comparação com referenciais normativos. A incerteza total das medições decorre da combinação de múltiplas fontes: incerteza instrumental dos sonômetros e calibradores; variabilidade meteorológica entre os períodos de medição; influência do vento no microfone, que pode introduzir ruído espúrio mesmo com uso de protetor de vento; variabilidade temporal do ambiente sonoro em torno do tempo de integração de 10 minutos; variabilidade espacial entre diferentes posições de medição em cada ponto receptor; e limitações intrínsecas do descritor L_{Aeq} como representação de um ambiente sonoro complexo e não estacionário (ISO, 2017; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

A norma ISO 12999-1:2014 estabelece procedimentos para a estimativa de incerteza em medições de isolamento acústico, cujos princípios de propagação de incerteza são aplicáveis, por analogia, às medições de ruído ambiental. No contexto de modelagens estratégicas, o WG-AEN da Comissão Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2007) recomenda a adoção de margem de incerteza de ± 5 dB como critério de concordância para validação de modelos de propagação sonora, critério este adotado no presente estudo e confirmado pelo índice de assertividade de 97,02% obtido em 235 pontos de comparação (MAE = 2,51 dB; RMSE = 3,05 dB). A diferença média de -0,69 dB entre valores simulados e medidos indica ausência de viés sistemático relevante, o que fortalece a robustez metodológica da análise (EUROPEAN COMMISSION, 2007; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

O intervalo de confiança (IC) 95% da média do som residual, estimado em $\pm 0,45$ dB(A) para $n = 237$ receptores, indica elevada estabilidade estatística da estimativa de tendência central, ainda que a variabilidade individual dos pontos ($DP = 3,51$ dB(A); amplitude: 29,6 a 48,0 dB(A)) evidencie a heterogeneidade espacial do campo sonoro de fundo. Essa heterogeneidade é esperada em ambiente rural semiárido e não compromete a representatividade das estatísticas globais, mas reforça a necessidade de interpretação individualizada dos receptores na avaliação de conformidade normativa (ABNT, 2019; FIELDS, 1998).

3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO SOM RESIDUAL

3.1 Estatísticas descritivas

O som residual foi avaliado com base em 237 receptores com dados válidos distribuídos na área de influência do empreendimento. Os resultados indicaram níveis de L_{Aeq} residual variando entre 29,6 dB(A) e 48,0 dB(A), com média de 40,98 dB(A) e mediana de 41,0 dB(A). O intervalo de confiança de 95% para a média foi estimado em $\pm 0,45$ dB(A), indicando elevada estabilidade estatística da estimativa.

Tabela 3.2 – Estatísticas descritivas do som residual (L_{Aeq}) nos receptores avaliados ($n = 237$)

Estatística descritiva	Valor
Número de receptores válidos (n)	237
Média	40,98 dB(A)
Mediana	41,0 dB(A)
Desvio padrão	3,51 dB(A)
Mínimo	29,6 dB(A)
Máximo	48,0 dB(A)
Quartil 1 (Q1)	38,6 dB(A)
Quartil 3 (Q3)	43,6 dB(A)
IC 95%	$40,98 \pm 0,45$ dB(A)
Receptores acima de 35 dB(A)	224 (94,5%)
Receptores acima de 40 dB(A)	148 (62,4%)

Fonte: Elaboração própria (2026).

A média de 40,98 dB(A) encontra-se acima do valor de referência diurno rural de 40 dB(A) e significativamente acima do valor noturno rural de 35 dB(A), conforme estabelecido pela ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019). O fato de 94,5% dos receptores (224 de 237) apresentarem som residual superior a 35 dB(A), e 62,4% (148 de 237) superiores a 40 dB(A), indica que, mesmo na ausência da contribuição dos aerogeradores, o ambiente acústico preexistente já apresenta níveis próximos ou superiores aos referenciais normativos rurais. Esse resultado tem implicações diretas sobre a interpretação da conformidade dos níveis sonoros totais registrados, uma vez que a margem acústica disponível para a contribuição do som específico das turbinas é reduzida ou inexistente em parcela significativa dos receptores avaliados (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Esse contexto reforça, adicionalmente, a limitação do uso exclusivo de métricas energéticas médias, como o L_{Aeq} , para representar a qualidade acústica percebida em ambientes rurais, uma vez que o nível de fundo elevado pode mascarar parcialmente o ruído dos aerogeradores sem eliminar sua perceptibilidade, especialmente em condições de contraste temporal entre períodos silenciosos e de operação (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018; MÜLLER et al., 2023).

O desvio padrão de 3,51 dB(A) evidencia dispersão moderada dos dados, compatível com a heterogeneidade esperada em ambiente rural semiárido, onde fontes sonoras naturais e antrópicas se distribuem de forma espacialmente não uniforme. O coeficiente $R^2 = 0,063$ obtido na regressão global entre NDVI e som residual indica que aproximadamente 6,3% da variabilidade total do som residual é explicada pela cobertura vegetal, resultado modesto mas estatisticamente significativo ($p < 0,001$) que demonstra a influência da estrutura da vegetação sobre o ambiente acústico de fundo. Foram identificados dois valores atípicos inferiores (29,6 dB(A) e 30,1 dB(A)), associados a receptores com condições ambientais excepcionalmente silenciosas, sem impacto relevante sobre a distribuição geral (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; FIELDS, 1998).

3.2 Distribuição dos níveis de som residual

A distribuição dos níveis de som residual revelou concentração predominante na faixa entre 38 e 44 dB(A), que abrangeu 61,7% dos receptores avaliados. Em complemento à comparação normativa apresentada na seção 3.1, destaca-se que o limite noturno de 35 dB(A) situa-se abaixo do primeiro quartil ($Q1 = 38,6$ dB(A)),

indicando que pelo menos 75% dos receptores apresentam som residual superior ao referencial noturno.

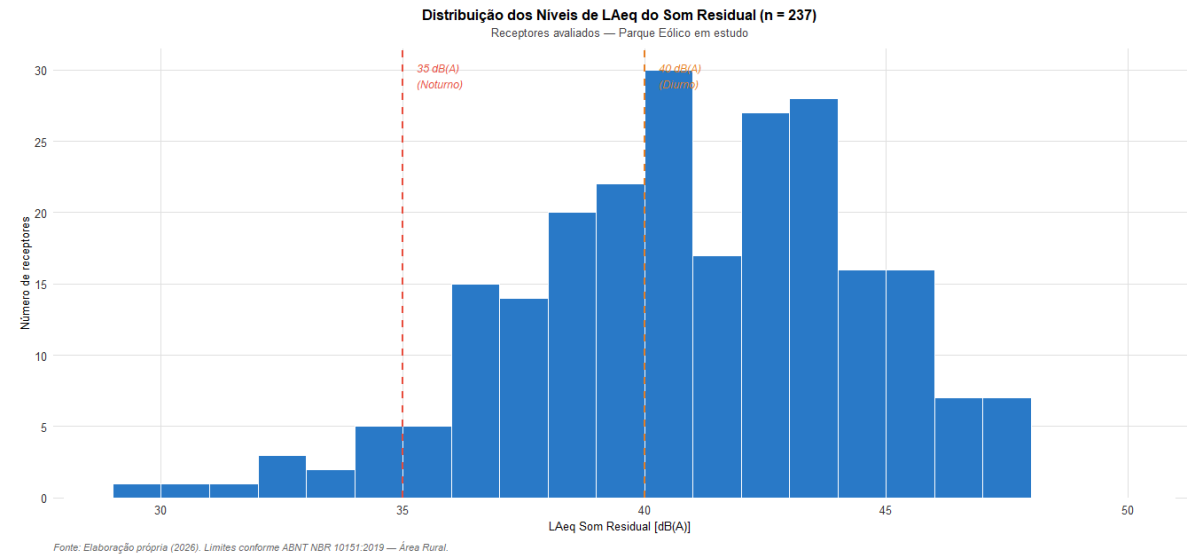


Figura 3.2 – Distribuição dos níveis de LAeq do som residual nos receptores avaliados, com linhas de referência normativa de 35 dB(A) e 40 dB(A) (ABNT NBR 10151:2019 – Área Rural)

Fonte: Elaboração própria (2026).

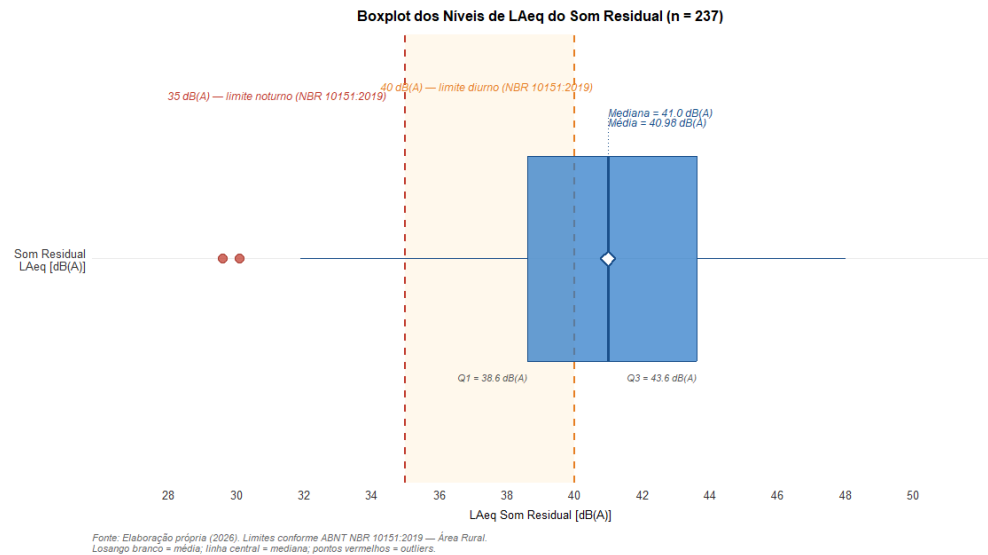


Figura 3.3 – Boxplot dos níveis de LAeq do som residual, com indicação dos limites normativos rurais de 35 dB(A) e 40 dB(A) (ABNT NBR 10151:2019)

Fonte: Elaboração própria (2026).

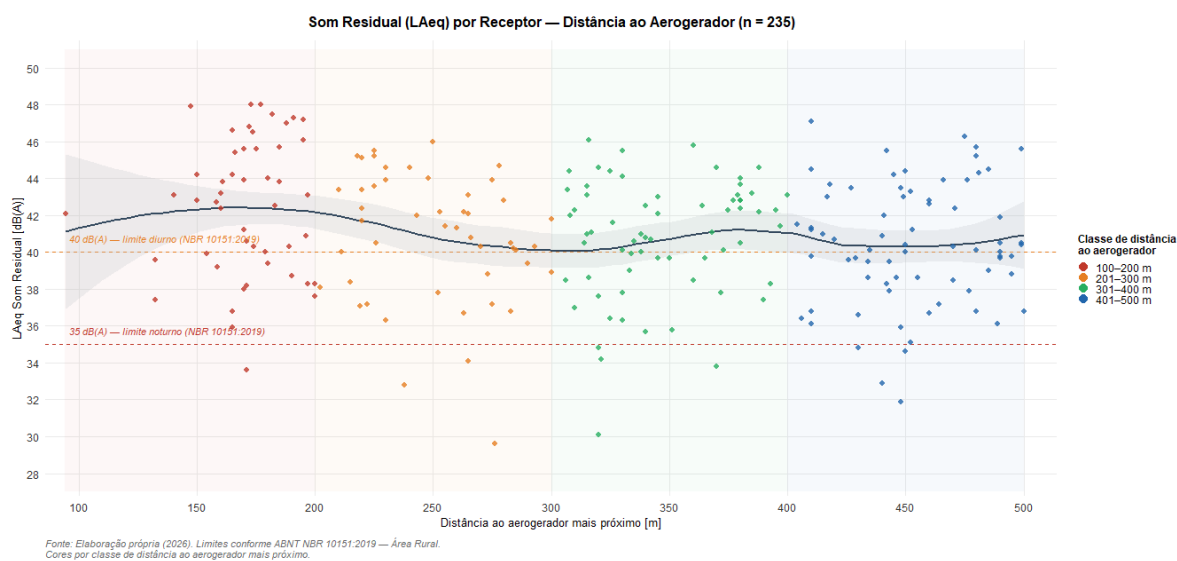


Figura 3.4 – Som residual (L_{Aeq}) registrado por receptor, ordenado por distância crescente ao aerogerador mais próximo

Fonte: Elaboração própria (2026).

3.3 Distribuição por classe de distância

A análise do som residual por classe de distância, considerando os 237 receptores com dados válidos, indica variação restrita dos valores médios entre as faixas avaliadas. O teste de Kruskal-Wallis indicou diferença estatisticamente significativa entre as classes ($H = 10,257$; $p = 0,017$), porém de menor magnitude em comparação ao som específico ($H = 162,114$; $p < 0,001$), confirmando que o som residual responde predominantemente a condicionantes locais do ambiente e não apresenta dependência sistemática da distância ao aerogerador. O tamanho de efeito reduzido reflete a preponderância de fatores locais, cobertura vegetal, topografia, fontes antrópicas difusas e atividade de fauna, sobre o gradiente de distância na composição do campo sonoro residual.

O teste post-hoc de Dunn, com correção de Bonferroni para comparações múltiplas, indicou que a diferença significativa concentra-se entre as classes extremas, de 100 a 200 m e de 401 a 500 m ($p = 0,010$), não havendo diferença estatisticamente significativa entre os demais pares de classes ($p > 0,05$). Esse resultado é coerente com o som residual mais elevado observado na faixa de 100 a 200 m, associado à zona de interferência direta da infraestrutura do empreendimento (seção 7).

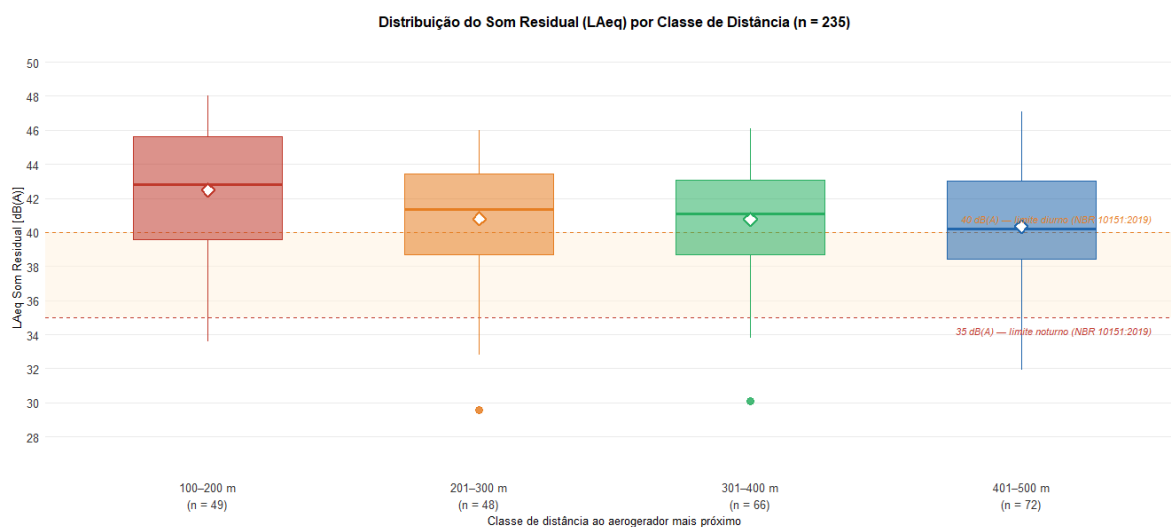


Figura 3.5 – Distribuição do som residual por classe de distância (boxplot), considerando os 237 receptores com dados válidos

Fonte: Elaboração própria (2026).

4 RELAÇÃO ENTRE SOM RESIDUAL, OPERAÇÃO DOS AEROGERADORES E SOM ESPECÍFICO

4.1 Distinção conceitual e metodológica

A norma ABNT NBR 10151:2019 e a ABNT NBR 16313:2025 distinguem três grandezas acústicas centrais para a avaliação de impacto sonoro em parques eólicos. O som residual representa o ambiente acústico preexistente, medido na ausência da fonte específica. O som específico (Lsp) corresponde à contribuição exclusiva dos aerogeradores ao campo sonoro total, calculado por subtração logarítmica entre o som total e o som residual, sendo considerado tecnicamente confiável apenas quando a diferença entre o som total e o som residual é igual ou superior a 3 dB(A), conforme a ISO 1996-2:2017 (ISO, 2017). O som total representa a combinação de todas as fontes sonoras em operação simultânea (ABNT, 2019). Quando essa diferença é inferior a 3 dB(A), ocorre mascaramento acústico energético: o som residual suprime a detecção confiável do som específico, tornando inviável a subtração logarítmica e indicando que a fonte específica não é predominante naquele ponto (ISO, 2017; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

A base de dados utilizada nas análises de som específico correspondeu a 225 receptores, excluídos os 12 casos com diferença entre som total e residual inferior a 3 dB(A). Os dados de som residual e velocidade do vento referem-se ao conjunto completo de 235 receptores com medições válidas para essas variáveis.

4.2 Nível de pressão sonora simulado, residual e específico por classe de distância

A Tabela 3.3 apresenta as estatísticas descritivas do nível de pressão sonora simulado para a condição de referência $W_{80} = 7,0$ m/s (<7,7), do nível de pressão sonora som residual medido em campo e do nível de pressão sonora do som específico calculado (Lsp), estratificados por classe de distância ao aerogerador mais próximo, para os 235 receptores com dados simultâneos de simulação e som residual. O Lsp foi obtido por subtração logarítmica entre o nível simulado e o som residual, conforme procedimento estabelecido na ABNT NBR 10151:2019 e na ISO 1996-2:2017 (ABNT, 2019; ISO, 2017). Os receptores com diferença inferior a 3 dB(A) são mantidos na análise por constituírem evidência direta da não predominância do ruído dos aerogeradores em relação ao ambiente acústico preexistente na condição de referência adotada.

Tabela 3.3 – Estatística descritiva do L_{Aeq} simulado ($W_{80} = 7,0$ m/s), do som residual e do Lsp calculado por classe de distância

Classe de distância	n total	n Lsp válido	L_{Aeq} sim. médio (dB)	DP sim.	Som resid. médio (dB)	DP resid.	Lsp médio (dB)	DP Lsp
100–200 m	48	34	48,29	1,06	42,48	3,72	47,37	1,27
201–300 m	48	31	45,66	1,34	40,79	3,52	44,48	1,48
301–400 m	66	25	43,05	1,59	40,76	3,20	42,30	1,77
401–500 m	72	19	40,95	1,44	40,35	3,30	39,97	1,09

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: L_{Aeq} simulado para $W_{80} = 7,0$ m/s (62,2% de permanência anual). Lsp calculado por subtração logarítmica conforme ISO 1996-2:2017. Receptores com diferença simulado–residual < 3 dB(A) mantidos na análise como evidência de mascaramento acústico e não predominância da fonte; excluídos apenas do cálculo pontual do Lsp. Nesta tabela, o Lsp é calculado por subtração entre o nível simulado e o som residual, base distinta da adotada nos Capítulos 2 e 4 (som total medido – som residual; n = 225).

O nível sonoro simulado médio reduziu de 48,29 dB(A) na faixa de 100 a 200 m para 40,95 dB(A) na faixa de 401 a 500 m, refletindo a atenuação geométrica da propagação sonora com o aumento da distância, em conformidade com o modelo ISO 9613-2. O Lsp apresentou redução progressiva compatível, de 47,37 dB(A) para 39,97 dB(A) entre as mesmas faixas, comportamento consistente com os processos físicos de propagação (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

Em contraste, o som residual médio apresentou variação mais restrita entre as classes, oscilando entre 40,35 dB(A) (faixa de 401 a 500 m) e 42,48 dB(A) (faixa de 100 a 200 m), evidenciando maior influência de condicionantes locais do ambiente sonoro de fundo, independentes da distância ao aerogerador.

A proporção decrescente de receptores com Lsp calculável ao longo do gradiente de distância, de 34 em 48 receptores na faixa de 100 a 200 m (70,8%) para 19 em 72 na faixa de 401 a 500 m (26,4%), constitui evidência quantitativa direta da redução da predominância do ruído dos aerogeradores com o afastamento da fonte, na condição de referência $W_{80} = 7,0$ m/s. Em termos de tamanho de efeito, o $R^2 = 0,154$ obtido na regressão entre NDVI e som residual na classe de 301 a 400 m indica que aproximadamente 15,4% da variabilidade do som residual nessa faixa é explicada pela cobertura vegetal, resultado que evidencia contribuição estatisticamente relevante da vegetação como moduladora do campo sonoro de fundo nessa zona de transição.

4.3 Predominância do som específico em relação ao som residual

Para avaliar a predominância da contribuição dos aerogeradores no campo sonoro local, os 235 receptores foram agrupados em dois grupos com base na distância ao aerogerador mais próximo: Grupo 1 (distância inferior a 250 m, $n = 72$) e Grupo 2 (distância igual ou superior a 250 m, $n = 163$). Os resultados são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Comparação entre L_{Aeq} simulado, som residual e diferença média por grupo de distância ($n = 235$)

Variável	Grupo 1 (< 250 m) $n = 72$	Grupo 2 (≥ 250 m) $n = 163$
L_{Aeq} simulado médio (dB)	47,68	42,44
Som residual médio (dB)	42,25	40,45

Diferença média simulado – residual (dB)	5,43	2,00
Receptores com diferença < 3 dB (n / %)	24 (33,3%)	101 (62,0%)

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: L_{Aeq} simulado para $W_{80} = 7,0$ m/s (condição de referência — maior permanência anual: 62,2%).

Para o Grupo 1 (distância inferior a 250 m), a diferença média entre o nível simulado e o som residual foi de 5,43 dB, indicando contribuição dos aerogeradores na composição do campo sonoro dos receptores, com predominância acústica verificada em 66,7% dos receptores desse grupo. Para o Grupo 2 (distância igual ou superior a 250 m), a diferença média foi de 2,00 dB, inferior ao limiar de 3 dB(A) estabelecido pela ABNT NBR 10151:2019 para caracterizar a predominância da fonte (ABNT, 2019), e 62,0% dos receptores (101 de 163) apresentaram condição de mascaramento acústico, em que o som residual suprime a detecção confiável do som específico dos aerogeradores.

Esses resultados indicam que, na condição operacional de maior permanência anual do empreendimento ($W_{80} = 7,0$ m/s, 62,2% do tempo), o ruído dos aerogeradores não se sobrepõe de forma predominante ao som residual para a maioria dos receptores situados a distâncias iguais ou superiores a 250 m. Esse comportamento é coerente com o contexto ambiental da área de estudo, caracterizada por paisagem rural semiárida com presença de vegetação nativa, atividade de fauna, movimentação do vento na vegetação e atividades agropecuárias difusas, que contribuem para a formação de um campo sonoro de fundo relativamente elevado e variável. É importante destacar que a não predominância acústica na condição de referência não implica ausência de incômodo percebido: a literatura documenta que fatores psicossociais e o contraste perceptivo entre períodos silenciosos e de operação podem amplificar a resposta subjetiva ao ruído mesmo quando os níveis absolutos não ultrapassam o som residual (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; GUSKI, 1999; MÜLLER et al., 2023).

4.4 Validação da modelagem acústica

A validação da modelagem acústica é apresentada em detalhe no Capítulo 2 (seção 4.10), com índice de concordância de 97,02% em 235 receptores no critério de ± 5 dB (MAE = 2,51 dB; RMSE = 3,05 dB). Esses indicadores sustentam a confiabilidade dos níveis simulados utilizados neste capítulo para o cálculo do som específico e para a análise de predominância.

5 ELEMENTOS DA PAISAGEM SONORA NO ENTORNO DOS RECEPTORES

5.1 Composição do ambiente acústico preexistente

O ambiente acústico do entorno do complexo eólico avaliado é condicionado pelo conjunto de fontes sonoras naturais e antrópicas presentes no território. A paisagem sonora rural do semiárido nordestino é caracterizada pela presença de vegetação nativa da Caatinga em diferentes estágios de conservação, cuja interação com o vento contribui para a formação do campo sonoro (som residual). A atividade de fauna, atividades agropecuárias difusas e a movimentação do vento na vegetação integram o ambiente sonoro preexistente e contribuem para a formação de um campo sonoro residual relativamente elevado e variável.

Essa composição multifatorial do nível de pressão sonora do som residual explica, em parte, os níveis observados: a média de 40,98 dB(A) com desvio padrão de 3,51 dB(A) reflete não apenas características físicas do terreno, como topografia e cobertura vegetal, mas também a variabilidade temporal das fontes sonoras naturais e antrópicas ao longo das campanhas de medição.

A paisagem sonora da Caatinga é intrinsecamente dinâmica, variando de forma significativa entre os períodos seco e chuvoso. No período chuvoso, a atividade acústica da fauna, especialmente de anfíbios e aves, é consideravelmente mais intensa, o NDVI tende a apresentar valores mais elevados em razão da brotação sazonal da vegetação e a biofonia contribui de forma mais expressiva para a composição do nível do som residual (LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003; RODRIGUES LEMOS et al., 2018). No período seco, por sua vez, a vegetação perde folhas, reduzindo a interação vento-dossel e potencialmente diminuindo o campo sonoro

residual associado à movimentação do vento na vegetação, ao mesmo tempo em que a fauna reduz sua atividade acústica e os ganhos ficam expostos o que altera a característica sonora residual (SAMPAIO, 2010; RODRIGUES LEMOS et al., 2018). Essa variabilidade sazonal implica que o ambiente sonoro residual caracterizado nas campanhas realizadas em março, abril e junho de 2025, período de transição entre o úmido e o seco no Agreste pernambucano, pode não representar a amplitude total da variação anual, aspecto relevante para a generalização dos resultados e para o planejamento de monitoramento acústico contínuo (SAMPAIO, 2010; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

5.2 Percepção do ambiente sonoro natural pelos moradores

A avaliação da percepção do ambiente sonoro natural foi conduzida por meio da Seção G do questionário estruturado aplicado junto aos respondentes no estudo piloto. Essa seção avaliou especificamente a percepção do ambiente sonoro natural do território, e não o ruído dos aerogeradores. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Avaliação do ambiente sonoro natural pelos respondentes (n = 5, estudo piloto)

Avaliação	n	%
Muito agradável	1	20%
Agradável	3	60%
Desagradável	1	20%
Muito desagradável	0	0%

Fonte: Elaboração própria (2026).

A maioria dos respondentes (80%, n = 4) avaliou o ambiente sonoro natural como agradável ou muito agradável, indicando que o incômodo relatado com o ruído dos aerogeradores não implica necessariamente percepção negativa global do território. O único respondente que avaliou o ambiente como desagradável também registrou incômodo elevado nos períodos geral e noturno, reforçando a coerência interna das respostas. Esse resultado indica que, para a maior parte dos respondentes, a paisagem sonora natural do entorno é percebida de forma positiva, o que confere relevância adicional ao contraste introduzido pelo som dos aerogeradores. A introdução de uma nova fonte sonora em um território percebido

como acusticamente agradável pode amplificar a resposta de incômodo, independentemente dos níveis absolutos de pressão sonora, fenômeno documentado na literatura como efeito de contraste acústico (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; FIELDS, 1998; MANOHARE et al., 2026). Ressalta-se que a amostra é composta por apenas cinco respondentes em estudo piloto, limitando a generalização desse resultado.

6 INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS LOCAIS

6.1 Cobertura vegetal Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e nível de pressão sonora do som residual

6.1.1 Base de dados e procedimento de cálculo do NDVI

A base de dados e o procedimento de cálculo do NDVI, com imagens Sentinel-2 nível L2A de 10 m de resolução e extração por buffer de 100 m centrado em cada receptor ($n = 225$; amplitude de 0,198 a 0,777; média de 0,453; DP = 0,118), são descritos em detalhe no Capítulo 4 (seção 2.3), sendo aqui utilizado o mesmo conjunto de dados. Ressalta-se que a análise deste capítulo refere-se à associação entre o NDVI e o som residual, ao passo que o Capítulo 4 avalia o efeito da cobertura vegetal sobre o som específico dos aerogeradores, tratando-se, portanto, de análises complementares.

6.1.2 Resultados da análise global e por classe de distância

No conjunto total de 225 receptores, a associação entre NDVI e o nível de pressão sonora do som residual foi negativa e estatisticamente significativa ($\beta = -7,391$; $r = -0,251$; $R^2 = 0,063$; $p < 0,001$; IC 95%: $-11,150$ a $-3,632$), indicando que maiores valores de NDVI tendem a estar associados a menores níveis de som residual. Em termos de tamanho de efeito, o R^2 de 0,063 indica que aproximadamente 6,3% da variabilidade total do som residual é explicada pela cobertura vegetal, estatisticamente robusto, coerente com a literatura em ambientes externos onde múltiplos fatores condicionam simultaneamente o campo sonoro de fundo (AYLOR, 1972; FIELDS, 1998).

A redução estimada é de $-0,74$ dB para cada incremento de 0,1 unidade de NDVI, resultado que, embora de magnitude limitada, sugere que a cobertura vegetal modula o ambiente sonoro residual, possivelmente por meio da redução da velocidade

do vento próximo ao solo (aumento da rugosidade) e da absorção de sons de origem natural e antrópica (AYLOR, 1972; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971).

A análise estratificada por classe de distância revelou comportamento heterogêneo. Na classe de 100 a 200 m, observou-se tendência positiva fraca e não significativa ($\beta = +2,055$; $r = +0,065$; $p = 0,665$; $R^2 = 0,004$), sem relação interpretável entre NDVI e som residual. A partir de 201 m, o padrão se inverte e a associação negativa se intensifica progressivamente, atingindo seu valor mais expressivo na classe de 301 a 400 m ($\beta = -11,855$; $r = -0,393$; $p = 0,002$; $R^2 = 0,154$, ou seja, 15,4% da variabilidade do som residual nessa faixa explicada pelo NDVI). Na classe de 401 a 500 m, a relação permaneceu negativa e significativa ($\beta = -9,442$; $r = -0,357$; $p = 0,003$; $R^2 = 0,127$).

Ambientes semiáridos como a Caatinga apresentam menor densidade contínua de vegetação do que florestas úmidas, de modo que pequenos incrementos de cobertura vegetal podem representar alterações relativamente importantes na rugosidade superficial e na interação vento-vegetação, justificando o efeito observado mesmo com valores de R^2 moderados (SAMPAIO, 2010; AYLOR, 1972; RODRIGUES LEMOS et al., 2018; SOUZA FILHO et al., 2026).

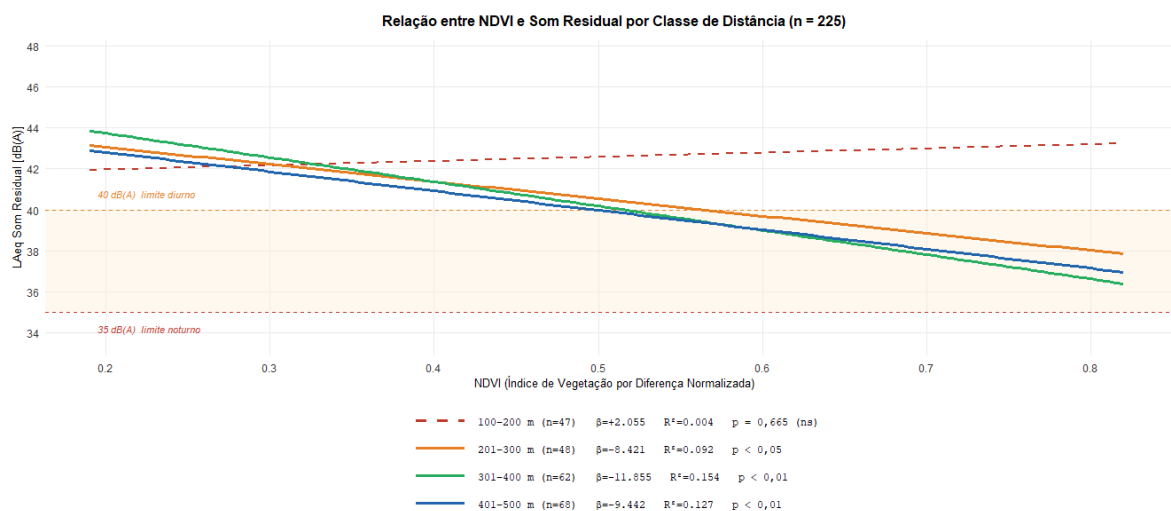


Figura 3.6 – Relação entre NDVI e nível de pressão sonora do som residual por classe de distância, com reta de regressão linear simples (n = 225)

Fonte: Elaboração própria (2026).

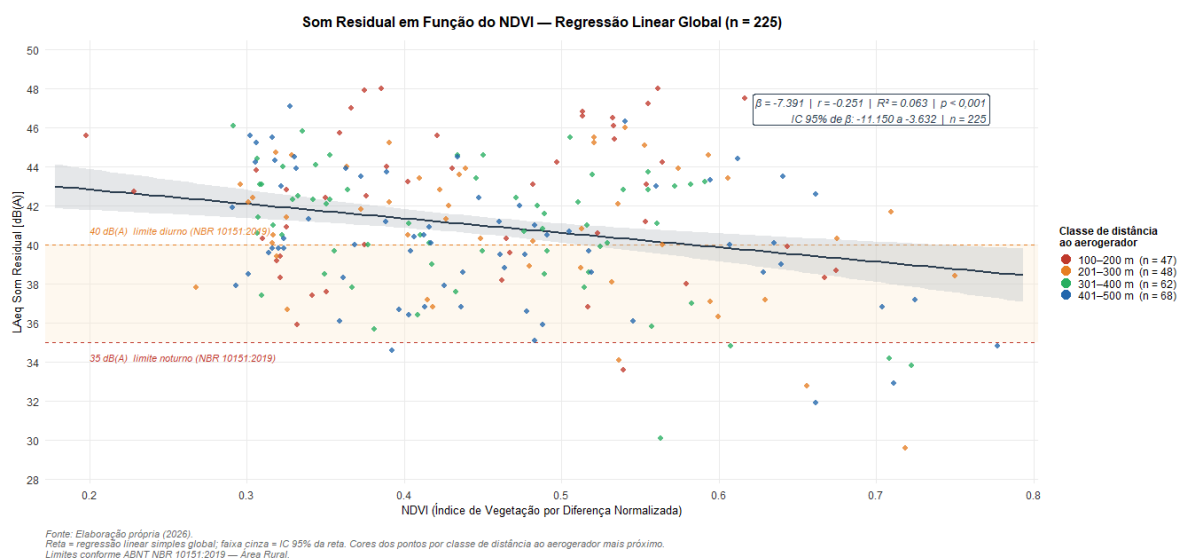


Figura 3.7 – Diagrama de dispersão do nível de pressão sonora do som residual em função do NDVI, com reta de regressão linear simples e intervalo de confiança de 95% (n = 225)

Fonte: Elaboração própria (2026).

6.2 Velocidade do vento e ambiente acústico preexistente

Como apresentado na seção 2.2, a velocidade do vento na nacele apresentou correlação positiva moderada e estatisticamente significativa com o nível de som residual ($r = 0,383$; $p < 0,001$; $n = 237$), resultado coerente com os mecanismos físicos de geração sonora pelo vento e com o fenômeno de mascaramento acústico induzido pelo vento (wind-induced masking) (AYLOR, 1972; FIELDS, 1998; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

Essa relação possui implicação metodológica direta. As medições dos níveis de pressão sonora do som residual foram realizadas sob velocidades de vento na altura da nacele superiores à faixa de 7,0–7,7 m/s, que concentra a maior frequência de ocorrência anual no complexo eólico estudado. Assim, os níveis sonoros obtidos representam condições climáticas predominantes, reforçando a representatividade estatística da base de dados e conferindo caráter adequado à avaliação do nível de pressão sonora do som residual. (ABNT, 2019).

6.3 Bioma Caatinga: contexto ecológico e sonoro

O complexo eólico avaliado está inserido no bioma Caatinga, floresta tropical sazonalmente seca com espécies altamente adaptadas ao estresse hídrico e

processos ecológicos sensíveis às alterações no uso do solo (SAMPAIO, 2010; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003). A fauna associada ao bioma inclui diversidade significativa de aves, répteis e anfíbios, muitos deles endêmicos ou com distribuição restrita ao semiárido brasileiro, cujas manifestações sonoras integram a paisagem acústica natural do território e compõem ativamente o campo sonoro residual registrado nas campanhas de medição.

A cobertura vegetal na área de estudo é heterogênea, com NDVI médio de 0,453 (DP = 0,118) e amplitude observada de 0,198 a 0,777 entre os 225 receptores analisados, abrangendo desde áreas com vegetação esparsa até formações com vegetação densa e vigorosa. A análise de variância não indicou gradiente espacial significativo de vegetação entre as classes de distância (ANOVA: $F = 0,280$; $p = 0,840$), indicando que a heterogeneidade da cobertura vegetal é distribuída de forma independente da distância aos aerogeradores, resultado que isola a distância à fonte como variável analítica nas regressões por classe.

7 IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO ACÚSTICA E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da caracterização do nível de pressão sonora do som residual têm implicações diretas para a gestão acústica ambiental do território e para a interpretação dos dados de conformidade normativa. O fato de 94,5% dos receptores (224 de 237) apresentarem som residual superior ao limite noturno rural de 35 dB(A) indica que o ambiente acústico preexistente já se encontra, em sua maior parte, acima dos referenciais normativos noturnos, independentemente da contribuição dos aerogeradores. Esse contexto reduz a margem acústica disponível para a contribuição do nível de pressão sonora do som específico e implica que qualquer avaliação de conformidade deve considerar, de forma rigorosa, a caracterização do som residual e a metodologia de cálculo do L_{sp} (ABNT, 2019; ISO, 2017).

Os resultados reforçam a limitação do uso exclusivo de métricas energéticas médias para representar a percepção de impactos sonoros ou até mesmo da utilização do nível de pressão sonora do som total como indicador de conformidade.

A faixa de 100 a 200 m dos aerogeradores apresentou comportamento acústico e ecológico distinto das demais classes de distância, exigindo interpretação cautelosa. Nessa faixa, a correlação entre NDVI e som residual foi positiva e não significativa (β

= +2,055; $r = +0,065$; $R^2 = 0,004$; $p = 0,665$), invertendo o padrão negativo observado nas classes subsequentes. A ausência de associação não decorre de ausência de cobertura vegetal: 51,1% dos 47 receptores avaliados foram classificados como alta cobertura vegetal (NDVI médio = $0,449 \pm 0,118$), valor comparável às demais classes. O que distingue essa faixa é a natureza do ambiente sonoro residual: as áreas até 200 m dos aerogeradores correspondem à zona de interferência direta da implantação do empreendimento, caracterizada por acessos internos, linhas de transmissão, subestações e estruturas de manutenção, que introduzem fontes sonoras antrópicas difusas, movimentação de veículos, operação de equipamentos elétricos e som aerodinâmico das linhas de transmissão, que elevam o patamar do som residual de forma independente da cobertura vegetal. O som residual médio nessa faixa foi de 42,48 dB(A) (DP = 3,72 dB), o mais elevado entre todas as classes, superando em 2,26 dB(A) a média da faixa subsequente (40,7 dB(A) na faixa de 201 a 300 m), com velocidade de vento na nacele praticamente idêntica (8,31 m/s versus 8,22 m/s), o que descarta a variabilidade anemométrica como fator explicativo. Em termos metodológicos, a proximidade da infraestrutura atua como variável confundidora relevante, mascarando o efeito atenuador da vegetação documentado nas distâncias superiores (LARATRO et al., 2014; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

A validação acústica, com índice de assertividade de 97,02% em 235 pontos de comparação, sustenta a confiabilidade do modelo de propagação sonora adotado como ferramenta de suporte à tomada de decisão sobre gestão do território. A integração entre o nível de pressão sonora do som residual caracterizado em campo e os níveis simulados permite delimitar com maior precisão as zonas de gestão acústica, subsidiando critérios objetivos para ações de mitigação e realocação (EUROPEAN COMMISSION, 2007; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

8 LIMITAÇÕES DA ANÁLISE

As seguintes limitações são reconhecidas e devem ser consideradas na interpretação dos resultados deste capítulo.

Condições meteorológicas das campanhas. As medições de som residual foram realizadas sob velocidades de vento superiores a faixa de 7,0- 7,7 m/s na nacele. A correlação observada ($r = 0,383$; $p < 0,001$), apesar de representar

o maior intervalo de ocorrência, os níveis registrados podem ser mais elevados do que aqueles que ocorreriam em condições de menor intensidade anemométrica, e menor ocorrência anual, o que deve ser considerado na avaliação dos referenciais normativos noturnos (35 dB(A)).

Representatividade temporal e sazonalidade. As campanhas ocorreram em março, abril e junho de 2025, cobrindo o período de transição úmido-seco. A sazonalidade das chuvas e da atividade da fauna no bioma Caatinga pode influenciar significativamente o nível de pressão sonora residual ao longo do ano. O NDVI, por sua vez, pode apresentar variação sazonal expressiva entre os períodos seco e chuvoso, afetando a relação entre cobertura vegetal e som residual de forma não capturada pelo presente estudo.

Cobertura horária das medições. As medições concentraram-se entre o fim da tarde e o início da noite (15h37 às 22h41), situando-se majoritariamente no período diurno normativo da ABNT NBR 10151:2019 (07h01 às 22h00); o período noturno normativo (22h01 às 07h00) foi amostrado apenas marginalmente. Como o som residual na madrugada tende a apresentar menor contribuição antrópica e, portanto, maior contraste potencial com o som específico dos aerogeradores, a avaliação do som residual no período noturno normativo constitui recomendação para estudos futuros.

Incerteza instrumental e de medição. A incerteza total das medições resulta da combinação de incerteza instrumental dos sonômetros, influência do vento no microfone, variabilidade temporal do ambiente e variabilidade espacial entre posições de medição. O IC 95% da média ($\pm 0,45$ dB(A)) reflete a estabilidade estatística da estimativa global, mas não elimina a incerteza associada a receptores individuais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10151: acústica — medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16313: acústica — terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

- AYLOR, D. Noise reduction by vegetation and ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 1B, p. 197–205, 1972.
- COOK, D. I.; VAN HAVERBEKE, D. F. *Trees and shrubs for noise abatement*. Nebraska: University of Nebraska, 1971.
- ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. *Sentinel-2 user handbook*. Paris: ESA, 2022.
- EUROPEAN COMMISSION. *Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure*. Luxembourg: European Commission, 2007. (Working Group — Assessment of Exposure to Noise, WG-AEN).
- FIELDS, J. M. Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 4, p. 2245–2260, 1998.
- GUSKI, R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, v. 1, n. 4, p. 45–56, 1999.
- HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. *Wind farm noise: measurement, assessment and control*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 1996-2: acoustics — description, measurement and assessment of environmental noise — part 2: determination of sound pressure levels*. Geneva: ISO, 2017.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 12999-1: acoustics — determination and application of measurement uncertainties in building acoustics — part 1: sound insulation*. Geneva: ISO, 2014.
- LARATRO, A.; ARJOMANDI, M.; KELSO, R.; CAZZOLATO, B. A discussion of wind turbine interaction and stall contributions to wind farm noise. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 127, p. 1–10, 2014.
- LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (ed.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. Recife: Editora Universitária UFPE, 2003.
- MANOHARE, M.; GUERRERO, S. G.; O'HORA, D.; KING, E. Noise annoyance mapping for wind turbines: a psychoacoustic approach incorporating noise sensitivity. *Applied Acoustics*, v. 248, 2026.
- MÜLLER, F. J. Y.; LESCHINGER, V.; HÜBNER, G.; POHL, J. Understanding subjective and situational factors of wind turbine noise annoyance. *Energy Policy*, v. 173, 2023.
- PEDERSEN, E.; PERSSON WAYE, K. Perception and annoyance due to wind turbine noise — a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 6, p. 3460–3470, 2004.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation, 2024.

- RODRIGUES LEMOS, J. et al. Variação temporal de índices de vegetação obtidos por imagens de satélites para indicar a cobertura vegetal da Caatinga. *Revista de Biologia e Farmácia*, v. 39, 2018.
- SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. (ed.). *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- SOUZA FILHO, J.; VECCI, M. A.; UEZU, A.; CELESTINO, L. Effect of vegetation cover on wind turbine noise propagation in the Caatinga biome, Brazil. In: *INTER-NOISE 2026 – INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING*, 2026, Adelaide. *Proceedings [...]*. Adelaide: Australian Acoustical Society, 2026.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Environmental noise guidelines for the European Region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.

CAPÍTULO 4

**EFEITO DA COBERTURA VEGETAL NA PROPAGAÇÃO DO RUÍDO
DE**

TURBINAS EÓLICAS NO BIOMA CAATINGA, BRASIL

Artigo publicado nos Proceedings of INTER-NOISE 2026

Este capítulo apresenta o artigo científico publicado nos Proceedings of INTER-NOISE 2026, intitulado "*Effect of Vegetation Cover on Wind Turbine Noise Propagation in the Caatinga Biome, Brazil*". O artigo constitui parte integrante desta dissertação e está reproduzido em tradução para o português, com formatação adaptada às normas ABNT, mantendo integralmente os dados, resultados, análises e conclusões originais.

RESUMO

Este estudo investiga a influência da cobertura vegetal, quantificada pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), na propagação do ruído de turbinas eólicas no bioma Caatinga semiárido do Nordeste brasileiro. Níveis de pressão sonora equivalentes contínuos ponderados em A (L_{Aeq}) foram medidos em 225 receptores residenciais no entorno de um parque eólico durante a estação chuvosa. Os níveis de pressão sonora do som específico das turbinas (L_{sp}) foram calculados por subtração logarítmica energética. Os valores de NDVI foram derivados de imagens Sentinel-2 (resolução de 10 m) e calculados como média em um buffer de 100 m ao redor de cada receptor. Os resultados indicam associação estatisticamente significativa entre o NDVI e os níveis sonoros específicos. Após controle para distância e velocidade do vento, um incremento de 0,1 unidade de NDVI associou-se a uma redução de aproximadamente -0,77 dB. O efeito demonstrou dependência da distância, com a atenuação mais expressiva observada em distâncias intermediárias (301–400 m), onde as projeções baseadas no modelo indicaram reduções potenciais de até aproximadamente 8,8 dB ao longo do gradiente de NDVI observado. Os resultados apoiam a integração de variáveis ecológicas em referenciais de avaliação de ruído ambiental e sugerem que a restauração da vegetação pode constituir estratégia complementar de mitigação baseada na natureza para parques eólicos em regiões de elevada sensibilidade ecológica.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia eólica é uma das principais fontes de energia renovável no mundo, com capacidade instalada de 1.136 GW em 2024 (GWEC, 2025). No Brasil, desempenha papel central na transição e segurança energética do país, tendo se expandido para o semiárido nordestino, onde o bioma Caatinga predomina nas zonas de desenvolvimento de parques eólicos (GWEC, 2025; ABEEÓLICA, 2024; SAMPAIO, 2011). Apesar de seus benefícios ambientais, o ruído de turbinas eólicas é uma preocupação reconhecida em áreas habitadas (FIELDS, 1998; JOSIMOVIC et al., 2023; KUWANO et al., 2014; WHO, 2018).

A Caatinga é uma floresta tropical sazonalmente seca, caracterizada por vegetação xerofítica e elevada biodiversidade, com respostas florísticas e estruturais expressivas à sazonalidade das chuvas. A vegetação é conhecida por atenuar o som por meio de dispersão, absorção e interação com o solo (AYLOR, 1972; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971). Entretanto, a aplicação de métricas de vegetação por sensoriamento remoto na avaliação do ruído de turbinas eólicas em ecossistemas semiáridos permanece amplamente inexplorada. A elevada variabilidade fenológica da Caatinga, associada à sazonalidade das chuvas, modula a densidade da vegetação e, potencialmente, as condições de propagação acústica (ABEEÓLICA, 2024; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) baseia-se na razão de diferença normalizada proposta por Rouse et al. (1973) e é amplamente utilizado como indicador de densidade e complexidade estrutural da vegetação (RODRIGUES LEMOS et al., 2018). Sua integração em modelos acústicos pode apoiar o desenvolvimento de estratégias de mitigação de ruído baseadas na natureza para parques eólicos em regiões de elevada sensibilidade ecológica.

Este estudo investiga a influência da cobertura vegetal nativa, quantificada pelo NDVI, sobre os níveis sonoros específicos de turbinas eólicas em 225 receptores residenciais no entorno de um parque eólico no bioma Caatinga, Brasil. A integração de variáveis ecológicas em modelos de avaliação de ruído ambiental pode apoiar estratégias complementares de mitigação baseadas na natureza. Análises estratificadas por distância e por classe de vegetação foram empregadas para avaliar o papel da vegetação nativa na atenuação acústica e para subsidiar estratégias de mitigação de impactos.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em um complexo de parques eólicos inserido no bioma Caatinga, estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 4.1). A área é caracterizada por clima semiárido, com precipitação concentrada entre janeiro e abril. A vegetação xerofítica nativa apresenta variabilidade fenológica expressiva, com aumento marcante do NDVI durante a estação chuvosa (ABEEÓLICA, 2024; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971; LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

O parque eólico é composto por 107 turbinas (GE 1.7-100; 1,7 MW; altura de cubo 80 m; diâmetro do rotor 100 m) em operação desde 2012. Foram avaliados 225 receptores residenciais. As classes de distância foram definidas com base na distância medida de forma contínua de cada receptor à turbina mais próxima: 100–200 m (47 receptores), 201–300 m (48 receptores), 301–400 m (62 receptores) e 401–500 m (68 receptores) (Tabela 4.1).

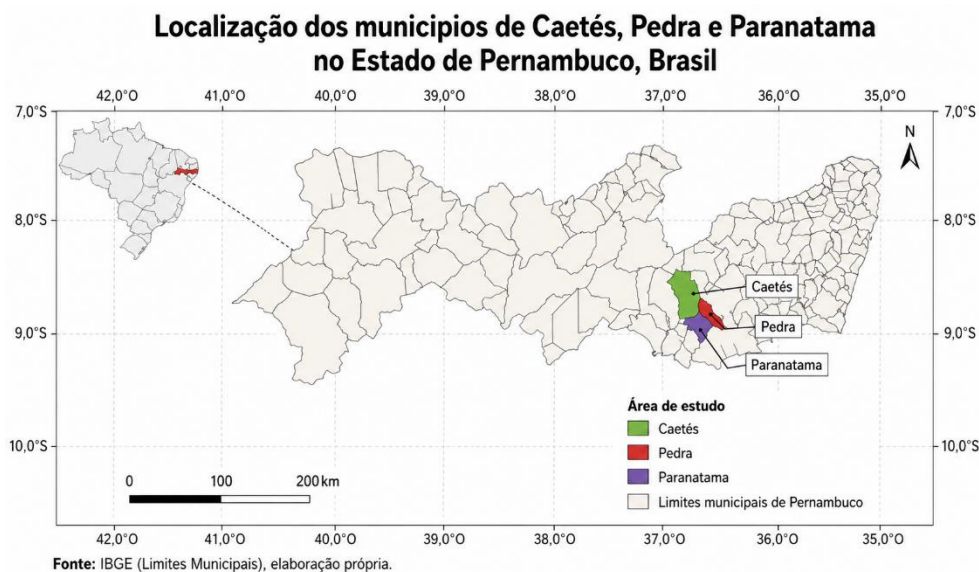


Figura 4.1 – Área de estudo: estado de Pernambuco, Brasil, com a localização do complexo eólico e dos receptores de medição

Fonte: Elaboração própria (2026).

2.2 Medições acústicas e cálculo do nível sonoro específico

As medições seguiram os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 10151:2019, registrando níveis de pressão sonora equivalentes contínuos ponderados em A (L_{Aeq}) nas condições operacionais (som total) e de não operação (som residual, com turbinas desligadas em um raio de 1 km). As campanhas de campo foram realizadas entre março e abril de 2025, coincidindo com o pico de cobertura vegetal durante a estação chuvosa.

A velocidade do vento na nacele foi registrada simultaneamente pelo sistema SCADA, equipado com anemômetro instalado na nacele da turbina. Essa variável afeta diretamente a emissão de ruído pela turbina e gera turbulência atmosférica que influencia a propagação acústica (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017); foi utilizada como covariável nos modelos de regressão para isolar o efeito específico da vegetação.

A velocidade média registrada do vento foi de 8,26 m/s (DP = 0,58 m/s; amplitude: 7,04–11,00 m/s), e a diferença média entre os níveis de pressão sonora total e residual foi de 8,97 dB(A).

O nível sonoro específico (L_{sp}) foi calculado por subtração logarítmica energética (Equação 1) (RODRIGUES LEMOS et al., 2018; ABNT, 2019):

$$L_{sp} = 10 \cdot \log_{10} (10^{(L_{total}/10)} - 10^{(L_{residual}/10)}) \quad (\text{Equação 1})$$

em que L_{total} e $L_{residual}$ são expressos em dB(A) e L_{sp} é o nível sonoro específico calculado da turbina eólica.

Dos 232 receptores inicialmente avaliados, sete nos quais a diferença entre os níveis total e residual era inferior a 3 dB foram excluídos da análise, pois a subtração logarítmica é considerada não confiável em condições de baixa relação sinal-ruído, em consonância com as diretrizes da ISO 1996-2:2017 (ISO, 2017). O conjunto de dados final compreende 225 receptores.

2.3 Dados do NDVI

O NDVI foi derivado de imagens Sentinel-2 L2A (ESA, 2022) (resolução de 10 m; data de aquisição: 5 de março de 2026) e calculado pela equação $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$, em que B4 e B8 são as bandas espectrais do satélite (Figura 4.2). O NDVI médio foi calculado em buffers de 100 m ao redor de cada receptor no QGIS 3.40 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2024). Os receptores foram classificados em

quatro classes de cobertura vegetal com base em intervalos definidos a partir da distribuição observada de NDVI, calibrados em relação às fisionomias vegetais da Caatinga (RODRIGUES LEMOS et al., 2018) (Quadro 4.1; Figura 4.3). Embora as medições acústicas (março–abril de 2025) e as imagens Sentinel-2 (março de 2026) tenham sido adquiridas com cerca de um ano de diferença, ambas correspondem à estação chuvosa; a correspondência fenológica entre os períodos é discutida na Seção 4.

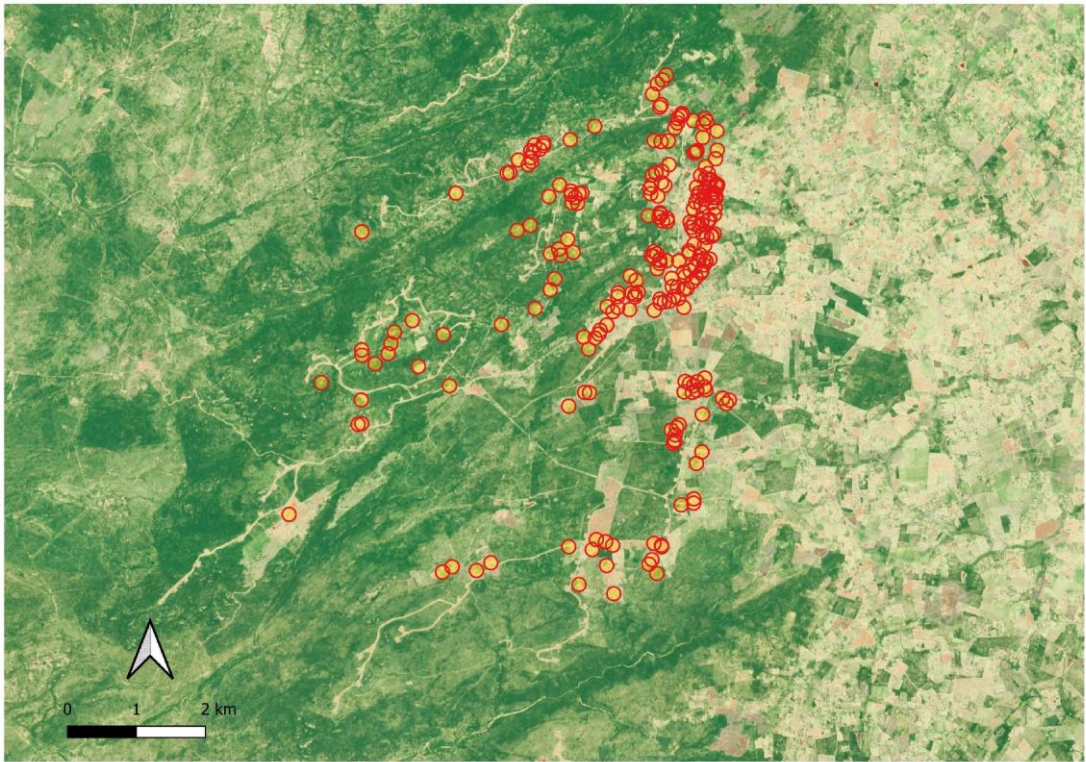


Figura 4.2 – Distribuição espacial dos receptores de medição sobrepostos ao mapa de cobertura vegetal (NDVI) derivado do Sentinel-2 (10 m). Tons de verde mais escuros indicam maior densidade de vegetação

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 4.1 – Classificação da cobertura vegetal com base nos intervalos de NDVI observados, calibrada em relação às fisionomias da Caatinga (RODRIGUES LEMOS et al., 2018)

Classe de cobertura	Intervalo NDVI	Interpretação ecológica
Baixa cobertura vegetal	0,198–0,359	Vegetação esparsa ou solo exposto
Cobertura moderada	0,361–0,397	Cobertura de dossel intermediária
Cobertura intermediária	0,402–0,439	Vegetação arbórea estruturada
Alta cobertura vegetal	0,446–0,777	Vegetação densa e vigorosa

Fonte: Elaboração própria (2026).

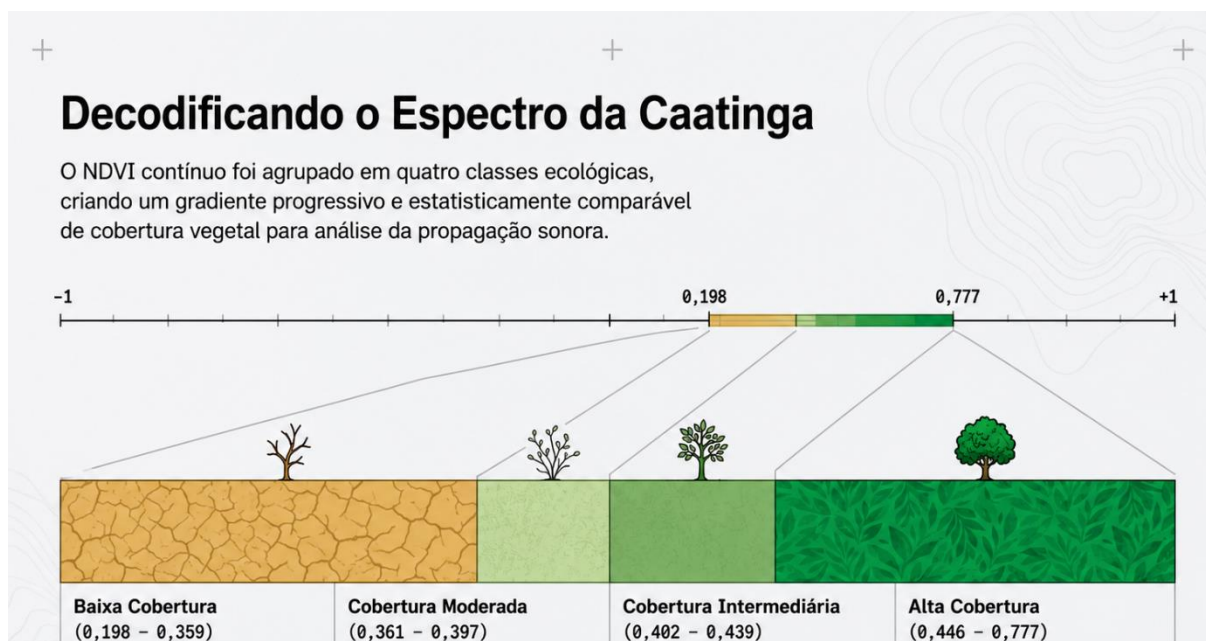


Figura 4.3 – Classificação ecológica dos valores de NDVI em quatro classes de cobertura vegetal, calibrada em relação às fisionomias da Caatinga
 Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 4.1 – Distribuição dos receptores de medição por classe de distância

Classe de distância (m)	Receptores (n)	%
100–200	47	20,9
201–300	48	21,3
301–400	62	27,6
401–500	68	30,2
Total	225	100,0

Fonte: Elaboração própria (2026).

2.4 Análise estatística

Modelos de regressão linear simples e múltipla foram ajustados com L_{sp} como variável resposta e NDVI, $\log_{10}(\text{distância})$ e velocidade do vento na nacele como preditores. As diferenças entre classes de NDVI foram avaliadas pelo teste de Kruskal–Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952), seguido pelo teste post-hoc de Dunn (DUNN, 1964) com correção de Holm (HOLM, 1979). A heterocedasticidade foi avaliada pelo teste de Breusch–Pagan (BREUSCH; PAGAN, 1979); erros padrão robustos HC3 foram aplicados quando detectada (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012; LONG; ERVIN, 2000). A multicolinearidade foi avaliada pelo fator de inflação da variância (FIV). Todas as análises foram realizadas no R 4.x (R CORE TEAM, 2024), com nível de significância de 5%.

3 RESULTADOS

3.1 Estatísticas descritivas e modelos de regressão simples

Os níveis sonoros específicos (L_{sp}) apresentaram ampla variabilidade entre os 225 receptores (DP = 4,8 dB(A); amplitude: 24,4 dB(A)). O NDVI médio foi de 0,456 (DP = 0,119; amplitude: 0,198–0,777). A velocidade média do vento na nacele foi de 8,26 m/s (DP = 0,58; amplitude: 7,04–11,00 m/s). As regressões lineares simples revelaram efeitos significativos para os três preditores (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Modelos de regressão linear simples para o nível sonoro específico L_{sp} [dB(A)]. Erros padrão robustos HC3 aplicados

Preditor	β	EP	t	p	IC 95%	R^2
NDVI	-10,47	2,96	-3,99	< 0,001	-16,29 a -4,64	0,066
$\log_{10}(\text{distância})$	-19,50	1,54	-12,32	< 0,001	-22,54 a -16,46	0,417
Velocidade do vento (nacele)	+3,00	0,52	+5,94	< 0,001	+1,98 a +4,01	0,131

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: EP = erro padrão; IC = intervalo de confiança.

3.2 Decaimento do nível sonoro específico com a distância

A relação entre L_{sp} e a distância à turbina apresentou comportamento linear com $\log_{10}(\text{distância})$ (Figura 4.4; $\beta = -19,50$; $R^2 = 0,417$; $p < 0,001$), consistente com a teoria da propagação sonora em campo livre, que prevê decaimento logarítmico dos níveis com a distância. A distância constituiu o principal determinante do L_{sp} nos receptores.

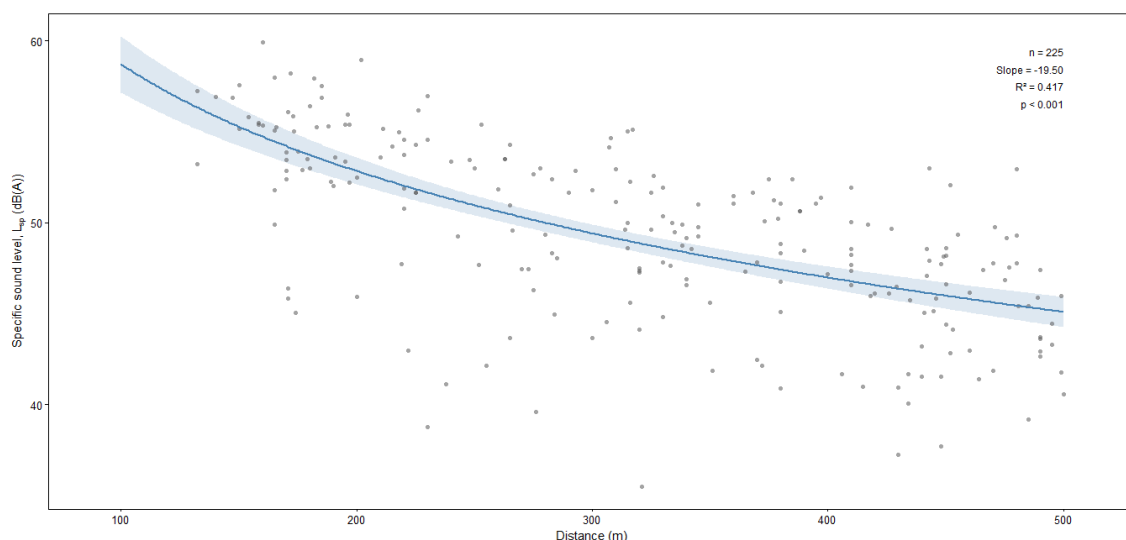


Figura 4.4 – Diagrama de dispersão de L_{sp} versus $\log_{10}(\text{distância})$ com ajuste de regressão log-linear e intervalo de confiança de 95%

Fonte: Elaboração própria (2026).

3.3 Associação entre NDVI e nível sonoro específico

Uma associação significativa foi observada entre NDVI e Lsp (Figura 4.5). Na regressão simples, $\beta = -10,47$ por unidade de NDVI (EP = 2,96; $R^2 = 0,066$; $p < 0,001$), equivalente a aproximadamente $-1,05$ dB por incremento de 0,1 em NDVI. A contribuição independente do NDVI é sustentada pelo modelo de regressão múltipla ($R^2 = 0,588$), no qual permaneceu estatisticamente significativo após controle para as demais covariáveis ($\beta = -7,68$; $p < 0,001$). O teste de Kruskal–Wallis revelou diferenças significativas entre as classes de vegetação ($H = 10,64$; $gl = 3$; $p = 0,014$; $n = 225$). Os testes post-hoc de Dunn (correção de Holm) identificaram diferenças significativas entre a classe de baixa cobertura e a classe de cobertura intermediária ($p = 0,030$) e de alta cobertura ($p = 0,012$).

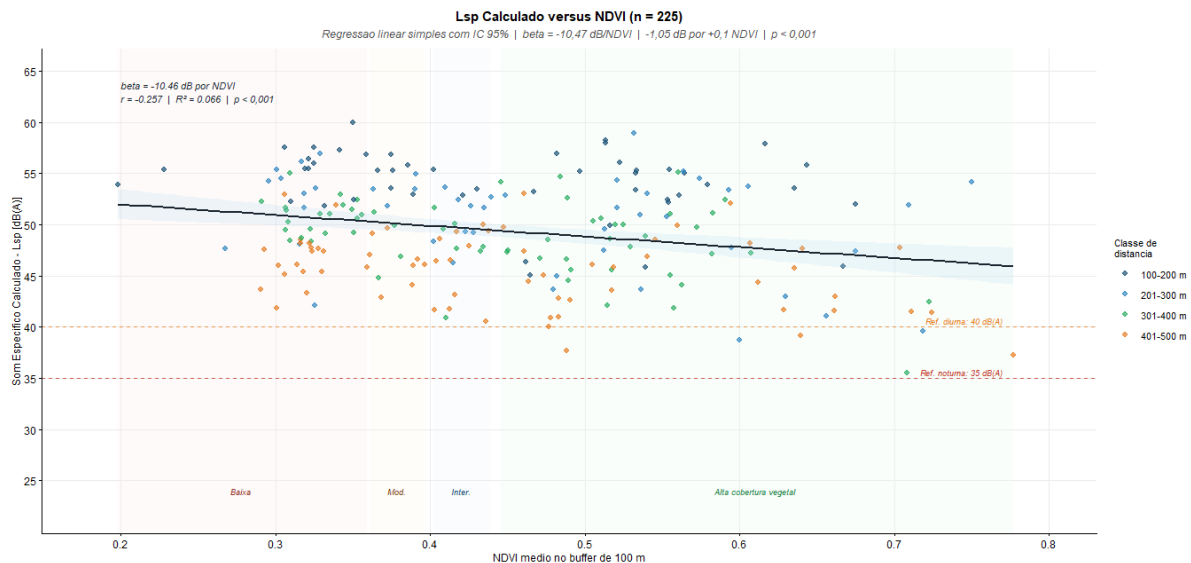


Figura 4.5 – Diagrama de dispersão de Lsp versus NDVI com reta de regressão

Fonte: Elaboração própria (2026).

3.4 Modelo de regressão múltipla

No modelo de regressão múltipla (Tabela 4.3), o NDVI permaneceu estatisticamente significativo após controle para distância e velocidade do vento ($\beta = -7,68$; EP = 1,86; $p < 0,001$), correspondendo a aproximadamente $-0,77$ dB por incremento de 0,1 em NDVI. Os valores do FIV variaram de 1,001 a 1,116, confirmando ausência de multicolinearidade relevante. O teste de Breusch–Pagan

indicou heterocedasticidade (BP = 10,17; p = 0,017); erros padrão robustos HC3 foram aplicados. O modelo explicou 58,8% da variância em Lsp.

Tabela 4.3 – Modelo de regressão linear múltipla (n = 225). Erros padrão robustos HC3

Parâmetro	β	EP	p	IC 95%
Intercepto	+80,71	5,58	< 0,001	+69,72 a +91,71
NDVI	-7,68	1,86	< 0,001	-11,34 a -4,02
log ₁₀ (distância)	-19,90	1,26	< 0,001	-22,39 a -17,42
Velocidade do vento (nacele)	+2,60	0,44	< 0,001	+1,74 a +3,46
R ² do modelo (n = 225)	0,588			

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: EP = erro padrão; IC = intervalo de confiança.

3.5 Análise estratificada por distância

As regressões estratificadas por distância revelaram efeitos significativos do NDVI sobre a atenuação sonora em duas das quatro faixas de distância (Tabela 4.4; Figura 4.6). O efeito mais expressivo foi observado na faixa de 301–400 m ($\beta = -15,15$; $R^2 = 0,199$; p < 0,001), indicando que os mecanismos de interação vegetação-solo são mais eficazes em distâncias intermediárias entre fonte e receptor.

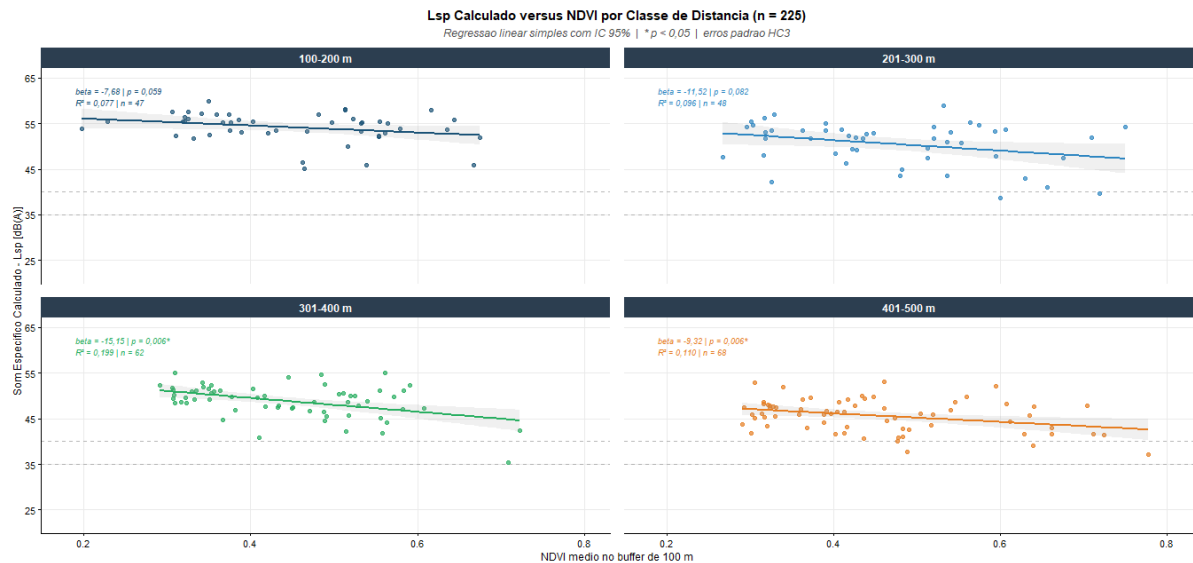


Figura 4.6 – Diagramas de dispersão estratificados por distância de L_{sp} versus NDVI por classe de distância, com retas de regressão e intervalos de confiança de 95%

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 4.4 – Regressão linear simples estratificada por distância de NDVI versus L_{sp} por classe de distância. Classes de distância definidas por medição contínua até a turbina mais próxima

Classe de distância (m)	n	β (NDVI)	p-valor	R ²
100–200	47	–7,68	0,059	0,077
201–300	48	–11,52	0,082	0,096
301–400	62	–15,15	0,006	0,199
401–500	68	–9,32	0,006	0,110

Fonte: Elaboração própria (2026).

3.6 Projeção da redução do ruído por restauração da vegetação

A Tabela 4.5 apresenta as reduções projetadas de L_{sp} (Figura 4.7) derivadas dos coeficientes dos modelos de regressão para diferentes cenários de restauração da vegetação (Δ NDVI). Os valores representam projeções teóricas assumindo linearidade dentro do intervalo de NDVI observado (0,198–0,777; Δ NDVI = 0,579).

Tabela 4.5 – Redução projetada de L_{sp} [dB(A)] em função do nível de restauração da vegetação (Δ NDVI) e da classe de distância. Coluna Geral derivada do modelo de regressão múltipla (β = –7,68; HC3); colunas estratificadas provenientes das regressões simples por classe de distância

Restauração (%)	Δ NDVI	Geral	100–200 m	201–300 m	301–400 m	401–500 m
10%	0,058	–0,44	–0,44	–0,67	–0,88	–0,54
20%	0,116	–0,89	–0,89	–1,33	–1,75	–1,08
30%	0,174	–1,33	–1,33	–2,00	–2,63	–1,62
40%	0,231	–1,78	–1,78	–2,67	–3,51	–2,16
50%	0,289	–2,22	–2,22	–3,33	–4,39	–2,70
60%	0,347	–2,67	–2,67	–4,00	–5,26	–3,24
70%	0,405	–3,11	–3,11	–4,67	–6,14	–3,78
80%	0,463	–3,56	–3,56	–5,34	–7,02	–4,31
90%	0,521	–4,00	–4,00	–6,00	–7,90	–4,85

100%	0,579	-4,44	-4,45	-6,67	-8,77	-5,39
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: As estimativas estratificadas representam efeitos totais e não devem ser comparadas diretamente em magnitude com o modelo global ajustado, pois representam efeitos totais e não parciais.

O modelo geral projeta redução máxima de L_{sp} de -4,44 dB(A) ao longo do gradiente total de NDVI observado. Na faixa de 301–400 m, a projeção teórica atinge -8,77 dB(A) para recuperação total do NDVI dentro do gradiente observado, cenário elaborado para ilustrar a magnitude potencial da associação, não constituindo predição direta de resultados de intervenção.

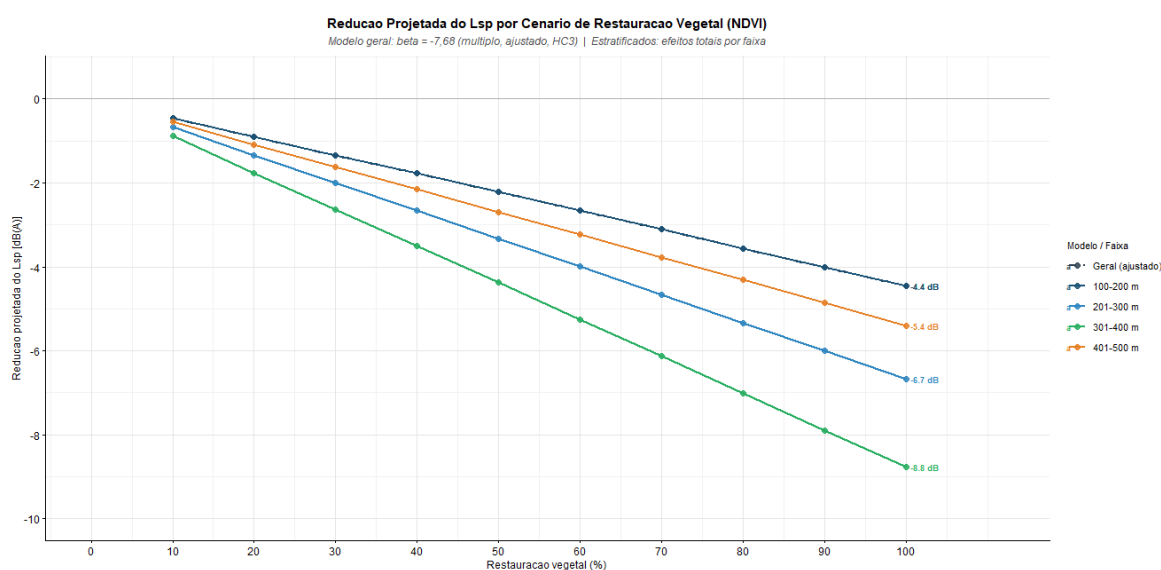


Figura 4.7 – Redução projetada de L_{sp} em função do nível de restauração da vegetação (Δ NDVI), estratificada por classe de distância

Fonte: Elaboração própria (2026).

Do ponto de vista da aplicação, os cenários de restauração não precisam se restringir ao plantio exclusivo de espécies nativas. No entorno dos receptores, as áreas são utilizadas pelas famílias para agricultura de subsistência, o que pode limitar a adesão a projetos de restauração que retirem essas áreas do uso produtivo. Nesse contexto, os sistemas agroflorestais (SAF), que consorciam espécies arbóreas nativas da Caatinga com cultivos agrícolas e frutíferas de interesse das famílias, constituem alternativa de maior viabilidade social, por conciliar o incremento da cobertura vegetal com a manutenção da produção de alimentos e da renda. Ressalta-se que as projeções da Tabela 4.5 foram derivadas do gradiente de NDVI observado, associado predominantemente à vegetação nativa, e que arranjos agroflorestais podem apresentar estrutura vertical, densidade foliar e sazonalidade distintas, sobretudo nos

períodos de colheita e na estação seca. Assim, recomenda-se que os SAF priorizem componentes arbóreos perenes e estratificados, capazes de manter a cobertura vegetal ao longo do ano, e que o ganho acústico associado a esses arranjos seja verificado por monitoramento acústico e de NDVI antes e após a implantação.

4 DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que a distância à turbina mais próxima é o principal determinante de L_{sp} ($\beta = -19,50$; $R^2 = 0,417$), consistente com a teoria estabelecida de propagação sonora em campo livre (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). A velocidade do vento na nacele contribuiu significativamente para a variabilidade da emissão ($\beta = +3,00$; $R^2 = 0,131$; $p < 0,001$), refletindo a dependência operacional da emissão de ruído em relação à velocidade de rotação das pás e à turbulência aerodinâmica (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). O NDVI manteve associação estatisticamente significativa e independente após controle para os principais fatores físicos de propagação sonora (distância e velocidade do vento), indicando contribuição independente da cobertura vegetal sobre os níveis de pressão sonora. O NDVI deve ser interpretado como indicador proxy da densidade da vegetação, não como parâmetro acústico direto, pois não captura propriedades estruturais como altura, porosidade ou distribuição da área foliar que governam diretamente a dispersão e a absorção sonora; estudos futuros que incorporem métricas estruturais podem fortalecer a interpretação mecanicista das associações observadas.

Faixas de vegetação têm sido reportadas como capazes de fornecer reduções de 5 a 10 dB em condições estruturalmente favoráveis (WHO, 2018; AYLOR, 1972; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971). Evidências de ambientes de florestas, incluindo estudos de propagação do ruído de turbinas eólicas em florestas australianas (GRONBERG, 2015), apoiam a relevância da estrutura vegetal como fator modulador da propagação sonora. As projeções teóricas aqui obtidas (até $-4,44$ dB(A) para o modelo geral e cerca de $-8,8$ dB(A) na faixa de 301–400 m) são de magnitude comparável, sugerindo que a caracterização ecológica baseada no NDVI pode subsidiar modelos de propagação sonora em ambientes semiáridos. Essas projeções devem ser interpretadas como estimativas ilustrativas da associação observada, não como predições diretas de resultados de intervenção.

A análise estratificada por distância revelou que o efeito do NDVI foi significativo em duas das quatro faixas de distância ($p < 0,05$). O pico de efeito na faixa de 301–400 m ($\beta = -15,15$; $R^2 = 0,199$) é consistente com os mecanismos físicos de atenuação sonora induzida pela vegetação, incluindo dispersão pelas folhas e galhos e absorção pelo solo, que dependem da frequência e da distância (AYLOR, 1972; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971; ISO, 1996; ATTENBOROUGH, 2002). Esse padrão é compatível com a progressiva interação entre a estrutura vegetal e os efeitos do solo, pela qual distâncias intermediárias permitem propagação sonora suficiente para que os mecanismos de dispersão e absorção se tornem eficazes (AYLOR, 1972; COOK; VAN HAVERBEKE, 1971).

As principais limitações incluem o uso do NDVI como indicador indireto da estrutura vegetal e a diferença temporal de aproximadamente um ano entre as imagens Sentinel-2 e a campanha de medições acústicas, embora ambas correspondam à estação chuvosa. Na Caatinga, o pico de cobertura vegetal ocorre consistentemente durante a estação chuvosa (janeiro–abril), independentemente do ano, em resposta à precipitação sazonal (ABEEÓLICA, 2024; RODRIGUES LEMOS et al., 2018). A correspondência fenológica entre os dois períodos mitiga parcialmente o efeito do intervalo interanual, embora variações na intensidade das chuvas entre anos possam introduzir incerteza residual no NDVI observado. A variabilidade temporal análoga na atenuação sonora pela vegetação foi documentada em áreas verdes urbanas, em que mudanças sazonais na densidade foliar produzem diferenças mensuráveis na atenuação sonora (TASHAKOR, 2020). A incerteza inerente às medições acústicas ambientais (± 3 dB) decorre de variações nas condições meteorológicas, topografia e calibração dos equipamentos (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017); no entanto, o efeito médio do NDVI ($-0,77$ dB por 0,1 unidade de NDVI) se acumula ao longo do gradiente espacial. A natureza transversal do conjunto de dados limita a inferência causal; as associações observadas devem ser interpretadas como padrões estatísticos. Estudos futuros que incorporem dados de sensoriamento remoto temporalmente coincidentes, métricas estruturais de vegetação e análises dependentes da frequência são recomendados.

5 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou associação significativa entre a cobertura vegetal, representada pelo NDVI, e a atenuação dos níveis sonoros específicos de turbinas eólicas em receptores residenciais no bioma Caatinga. A classificação por distância baseada em medições contínuas revelou variação distância-dependente relevante nos efeitos da vegetação, com padrões consistentes de atenuação observados em todas as faixas de distância. Efeitos estatisticamente significativos concentraram-se em distâncias intermediárias e maiores, particularmente na faixa de 301–400 m, onde a atenuação mais expressiva foi observada.

O modelo de regressão múltipla explicou 58,8% da variância em L_{sp} , reforçando a cobertura vegetal como fator independente e ecologicamente relevante que influencia a propagação sonora em ambientes semiáridos. Os resultados apoiam a integração de variáveis ecológicas em referenciais de avaliação de ruído ambiental para parques eólicos e indicam que a restauração e conservação da vegetação, inclusive por meio de sistemas agroflorestais compatíveis com a agricultura de subsistência das famílias, podem constituir estratégias complementares de gestão de ruído baseadas na natureza, sujeitas a validação em estudos prospectivos. Recomenda-se pesquisa adicional incorporando métricas estruturais de vegetação, variabilidade temporal e aplicações em diferentes biomas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEólica). Boletim anual de geração eólica 2024. São Paulo: ABEEólica, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10151: acústica — medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ATTENBOROUGH, K. Sound propagation close to the ground. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 34, p. 51–82, 2002.
- AYLOR, D. Noise reduction by vegetation and ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 1B, p. 197–205, 1972.
- BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*, v. 47, n. 5, p. 1287–1294, 1979.
- COOK, D. I.; VAN HAVERBEKE, D. F. Trees and shrubs for noise abatement. Nebraska: University of Nebraska, 1971.
- DUNN, O. J. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241–252, 1964.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel-2 user handbook. 2. ed. Paris: ESA, 2022.
- FIELDS, J. M. Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 4, p. 2245–2260, 1998.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Global Wind Report 2025. Brussels: GWEC, 2025.
- GRONBERG, A. Sound propagation through Australian forest land: with special regards to noise generated by wind turbines. 2015. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Engineering LTH, Lund University, Lund, 2015.
- HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. Wind farm noise: measurement, assessment and control. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- HOLM, S. A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, v. 6, n. 2, p. 65–70, 1979.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 1996-2: acoustics — description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: determination of sound pressure levels. Geneva: ISO, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 9613-2: acoustics — attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: general method of calculation. Geneva: ISO, 1996.
- JOSIMOVIĆ, B. et al. Cumulative impact of wind farm noise. *Applied Sciences*, v. 13, n. 15, p. 8792, 2023.

- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952.
- KUWANO, S. et al. Social survey on community response to wind turbine noise in Japan. *Noise Control Engineering Journal*, v. 62, n. 6, p. 503–520, 2014.
- LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Ed.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. Recife: Editora Universitária UFPE, 2003.
- LONG, J. S.; ERVIN, L. H. On the small sample properties of heteroscedasticity-consistent covariance matrix estimators. *The American Statistician*, v. 54, n. 3, p. 217–222, 2000.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. *Introduction to linear regression analysis*. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2012.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System, Version 3.40. Open Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org>.
- R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org>.
- RODRIGUES LEMOS, J. et al. Variação temporal de índices de vegetação obtidos por imagens de satélites para indicar a cobertura vegetal da Caatinga. *Revista Espacios*, v. 39, n. 34, p. 7, 2018.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM*, 3., 1973, Washington. Proceedings... Washington: NASA, 1973. v. 1, p. 309–317. (NASA SP-351).
- SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: DIRZO, R. et al. (Ed.). *Seasonally Dry Tropical Forests*. Island Press, 2011. p. 35–63.
- TASHAKOR, S. Temporal variability of noise pollution attenuation by vegetation in urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 53, p. 126723, 2020.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Environmental noise guidelines for the European Region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.

CAPÍTULO 5

INFRASSOM E RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA EM PARQUES EÓLICOS: AVALIAÇÃO EM RECEPTORES RESIDENCIAIS

RESUMO

O ruído gerado por aerogeradores apresenta componentes de baixa frequência e infrassom, que pouco influenciam na ponderação A e para as quais não há norma brasileira específica. Este capítulo caracteriza o conteúdo de baixa frequência e infrassom do ruído na área de influência de um complexo eólico composto por 107 aerogeradores em operação no Agreste de Pernambuco. A avaliação empregou o critério de triagem da norma alemã DIN 45680, em 10 receptores residenciais situados entre 88 m e 500 m do aerogerador mais próximo, sob condições operacionais típicas. Em todos os receptores, a diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ variou entre 10 dB e 17 dB, permanecendo abaixo do limite normativo de 20 dB e dispensando a etapa de medições internas. Observou-se enriquecimento espectral nas baixas frequências com o aumento da distância, estatisticamente significativo, porém insuficiente para configurar dominância de baixa frequência. Os resultados fornecem subsídios técnicos para a avaliação acústica de infrassom e ruído de baixa frequência em parques eólicos diante da lacuna normativa brasileira.

Palavras-chave: aerogeradores, acústica ambiental, ponderação em frequência, análise espectral, conformidade normativa.

1 INTRODUÇÃO

O som de baixa frequência e o infrassom constituem aspectos acústicos comumente associados à operação de turbinas eólicas, com características físicas e perceptivas que os distinguem do espectro audível convencional avaliado pela métrica do nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderada em A (L_{Aeq}). O infrassom é definido como o conjunto de oscilações acústicas com frequências inferiores ao limite convencional da audição humana, tipicamente abaixo de 20 Hz. Embora geralmente não sejam percebidas como som audível, essas oscilações podem ser percebidas como vibração ou pressão em níveis elevados de exposição. O ruído de baixa frequência, por sua vez, abrange a faixa espectral compreendida entre 20 Hz e 200 Hz, sendo perceptível auditivamente, mas com características de propagação e de impacto perceptivo distintas das faixas de média e alta frequência (MØLLER; PEDERSEN, 2011; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

Em razão de suas características físicas, o infrassom e o som de baixa frequência apresentam elevada capacidade de propagação, baixa atenuação

atmosférica com a distância e forte sensibilidade às condições meteorológicas e à geometria do ambiente, o que os torna particularmente relevantes em contextos rurais com baixa ambiência sonora (MØLLER; PEDERSEN, 2011; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). No contexto de empreendimentos eólicos, essas componentes espectrais resultam principalmente da interação aerodinâmica das pás com o escoamento do vento e dos efeitos de modulação de amplitude, com potencial para interferir no repouso, no sono e no bem-estar geral, especialmente em situações de exposição contínua ou noturna (DIN, 1997; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

A literatura recente tem enfatizado a necessidade de distinguir tecnicamente o infrassom em sentido estrito, com componentes abaixo de 20 Hz, dos tons de modulação de amplitude (AM) de baixa frequência, que ocorrem entre 20 Hz e 100 Hz e podem permanecer perceptíveis a distâncias nas quais o infrassom é inaudível a pessoas com audição preservada (NGUYEN et al., 2022; HANSEN et al., 2019).

A norma alemã DIN 45680 (DIN, 1997) estabelece critérios para a avaliação de componentes de baixa frequência em ambientes externos e internos, sendo amplamente adotada como referência complementar no setor eólico (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; ZAJAMŠEK et al., 2016; DAVY; BURGEMEISTER; HILLMAN, 2020). No Brasil, não existe norma específica para essa finalidade, lacuna que exige a adoção de referenciais internacionais compatibilizados com as boas práticas da ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019) e com as definições da ABNT NBR 16313:2025 (ABNT, 2025).

Este capítulo tem por objetivo caracterizar o conteúdo de baixa frequência e infrassom do som na área de influência do complexo eólico estudado, combinando o critério de triagem $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ da DIN 45680 (DIN, 1997) e a caracterização espectral em bandas de 1/3 de oitava entre 8 Hz e 100 Hz, com base em medições em 10 receptores distribuídos em distâncias de 88 m a 500 m do aerogerador mais próximo, durante condições operacionais típicas, com velocidade do vento na nacele superior a 7,0 m/s.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ponderações em frequência A, C e G e sua relevância para baixas frequências

A percepção do som pelo ouvido humano varia significativamente em função da frequência. Para representar essa característica fisiológica nas medições acústicas, aplicam-se curvas de ponderação em frequência aos níveis de pressão sonora. As mais relevantes em estudos de ruído ambiental são as ponderações A e C, cujas curvas de resposta em frequência são apresentadas na Figura 5.1.

A ponderação A, que resulta no nível de pressão sonora L_A , aproxima a resposta do ouvido humano em níveis sonoros moderados, correspondendo à curva isofônica de 40 fones. Essa curva, apresentada na Figura 5.1(a), atenua de forma significativa as componentes de baixa frequência e, em menor grau, as de alta frequência, enfatizando a faixa entre aproximadamente 1 kHz e 5 kHz, onde a sensibilidade auditiva humana é mais acentuada. A ponderação A é a mais amplamente adotada em normas e regulamentos ambientais, incluindo a ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019) e a série ISO 1996 (ISO, 2017).

A ponderação C resulta no nível de pressão sonora L_C , e representa a resposta do ouvido humano em níveis sonoros elevados, correspondendo a curvas isofônicas próximas a 100 fones (ISO, 2003; IEC, 2013). Sua resposta em frequência, apresentada na Figura 5.1(b), é praticamente plana ao longo da maior parte da faixa audível, com atenuação significativamente menor das componentes de baixa frequência em comparação à ponderação A. A Tabela 5.1 apresenta os fatores das ponderações A e C por bandas de oitava (ABNT, 2019; IEC, 2013).

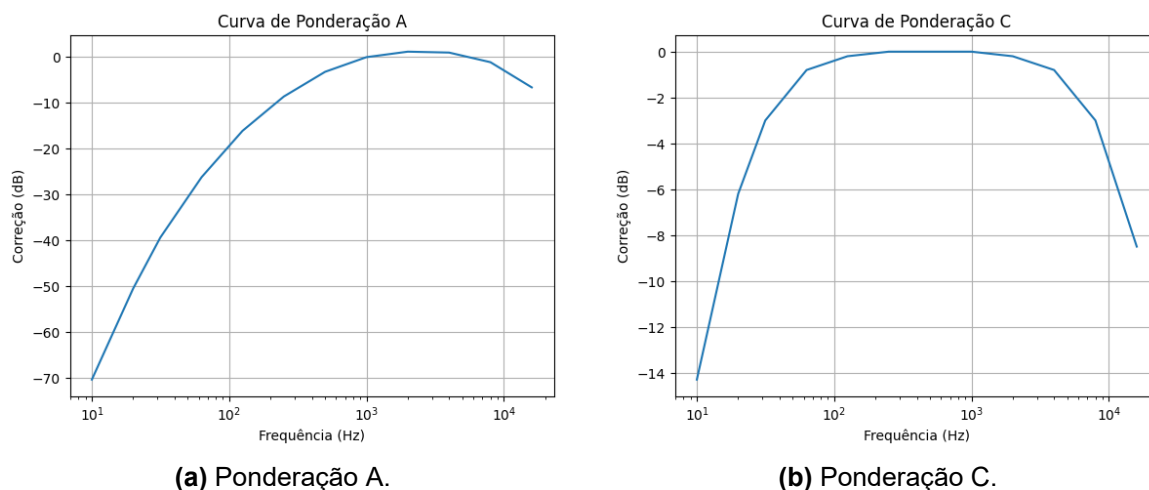


Figura 5.1 – Curvas de resposta em frequência das ponderações (a) A e (b) C
Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 5.1 – Fatores das ponderações A e C por bandas de oitava, em dB

Ponderação	31,5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz	4.000 Hz	8.000 Hz
A (dB)	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1,0	-1,1
C (dB)	-3,0	-0,8	-0,2	0	0	0	-0,2	-0,8	-3,0

Fonte: ABNT (2019); IEC (2013).

A diferença entre L_{Ceq} e L_{Aeq} é frequentemente utilizada como indicador da presença de componentes de baixa frequência no ruído ambiental, sendo particularmente relevante em parques eólicos, cujo ruído apresenta expressivo conteúdo espectral nas faixas de baixa frequência e infrassom (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; ZAJAMŠEK et al., 2016). Diferenças elevadas entre os dois descritores sinalizam conteúdo expressivo em baixas frequências, frequentemente associado a maior potencial de incômodo e a percepções subjetivas que a ponderação A isoladamente não é capaz de representar (MØLLER; PEDERSEN, 2011; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2014).

Além das ponderações A e C, a ponderação G, definida pela ISO 7196 (ISO, 1995), foi especificamente concebida para a avaliação do infrassom, com resposta máxima na faixa próxima a 20 Hz e atenuação acentuada fora do intervalo de 1 Hz a 20 Hz. O nível resultante é amplamente empregado na literatura, com limiar de percepção humana situado entre 85 dBG e 100 dBG (NGUYEN et al., 2022). Destaca-se, contudo, que o presente estudo não empregou a ponderação G: a avaliação baseou-se no critério de triagem estabelecido na DIN 45680 (DIN, 1997), fundamentado na diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$, e os valores em dB(G) mencionados neste capítulo referem-se exclusivamente a resultados da literatura (NGUYEN et al., 2022; HANSEN et al., 2019), apresentados como parâmetros comparativos.

2.2 Fundamentação normativa: DIN 45680

A norma alemã DIN 45680 estabelece procedimentos específicos para medição, avaliação e interpretação de som de baixa frequência em ambientes internos, reconhecendo explicitamente que a ponderação A é inadequada para representar o impacto perceptivo de conteúdos espectrais nessa faixa. A metodologia baseia-se em análise espectral em bandas de 1/3 de oitava, cobrindo a faixa de 8 Hz a 100 Hz, com ênfase nas medições em ambientes internos, onde a resposta estrutural das edificações pode amplificar determinadas componentes por ressonância e acoplamento vibroacústico (DIN, 1997).

A norma adota um procedimento bifásico. Na primeira etapa, realizada em ambiente externo, se verifica se os sons possuem características de baixa frequência e infrassom a partir da diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$. Quando $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 20$ dB, os sons apresentam tais características e a avaliação deve prosseguir para a segunda etapa, com medições em ambiente interno e análise espectral por bandas de 1/3 de oitava comparada aos valores de referência da norma; caso contrário ($L_{Ceq} - L_{Aeq} \leq 20$ dB), o critério normativo é atendido sem necessidade de medições internas nas edificações (DIN, 1997).

No contexto de empreendimentos eólicos, a DIN 45680 é frequentemente adotada como referência técnica complementar para a avaliação de queixas relacionadas a infrassom e baixas frequências. As componentes aerodinâmicas de baixa frequência, resultantes da interação pá-torre e da modulação de amplitude, permanecem como fontes relevantes, sobretudo em condições de estabilidade atmosférica noturna, quando a propagação de baixas frequências é favorecida (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; ZAJAMŠEK et al., 2016; VAN DEN BERG, 2006). O incômodo associado ao ruído de baixa frequência, ademais, está mais relacionado à sua estrutura espectral, persistência temporal e intrusividade do que ao nível energético total medido em dB na ponderação A (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018).

2.3 Infrassom e modulação de amplitude de baixa frequência: distinção técnica

Estudos com abordagem probabilística conduzidos em parques eólicos australianos demonstram que o infrassom medido a distâncias superiores a 1 km apresenta níveis de pressão sonora em bandas de 1/3 de oitava consistentemente abaixo do limiar auditivo médio para audição preservada, com probabilidade de percepção inferior a 5×10^{-5} , indicando que o infrassom não é percebido pela maioria da população nessas distâncias, com níveis globais que não ultrapassaram 75 dBG, valor 10 dBG inferior ao limite dinamarquês de referência de 85 dBG e abaixo do limiar de percepção de infrassom (NGUYEN et al., 2022).

Em contrapartida, os mesmos estudos evidenciam que os efeitos de modulação de amplitude (AM), resultantes da modulação periódica de componentes tonais na frequência de passagem das pás (*blade-pass frequency*), podem ser perceptíveis a distâncias maiores em condições de alta potência e vento favorável. Esses efeitos apresentam-se no domínio da frequência como componentes tonais com bandas

laterais espaçadas pela frequência de passagem das pás, podendo ser erroneamente interpretados como infrassom pelos moradores, uma vez que se manifestam perceptivamente como um ruído de “baixa frequência” ou “zumbido” (NGUYEN et al., 2022; HANSEN et al., 2019).

2.4 Lacuna normativa brasileira e o contexto do setor eólico

Atualmente, não há norma brasileira específica que estabeleça procedimentos e critérios de avaliação de som ambiental com características de baixa frequência e infrassom associados à operação de aerogeradores. Essa lacuna é reconhecida na literatura especializada, que aponta a necessidade de referenciais técnicos específicos para essa faixa espectral em contextos de energia eólica (MØLLER; PEDERSEN, 2011; ZAJAMŠEK et al., 2016). Diante disso, adotaram-se as definições conceituais da ABNT NBR 16313:2025 (infrassom, sons de baixa frequência, som total, som específico e som residual) e as recomendações gerais da ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019, 2025).

No plano técnico, a ISO 9613-2 (ISO, 1996), a série IEC 61400 (IEC, 2012) e a DIN 45680 (DIN, 1997) oferecem subsídios metodológicos adicionais amplamente adotados em estudos e licenciamentos no setor eólico (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017), permitindo uma avaliação que abrange tanto o espectro audível quanto as componentes de infrassom e baixa frequência.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo e caracterização do empreendimento

O estudo foi conduzido no entorno de um complexo eólico localizado no bioma Caatinga, nos municípios de Caetés, Pedra e Paranatama, no Agreste Meridional do estado de Pernambuco. O complexo é composto por 107 aerogeradores do modelo GE 1.7-100 (potência nominal de 1,7 MW; altura de cubo de 80 m; diâmetro do rotor de 100 m), em operação desde 2012.

3.2 Critério normativo e procedimento de avaliação

A avaliação foi conduzida conforme o procedimento bifásico da DIN 45680 (DIN, 1997). Na primeira etapa, verificou-se, em ambiente externo às edificações

residenciais, a diferença aritmética entre os níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, ponderada em C e em A ($L_{Ceq} - L_{Aeq}$). O critério adotado foi:

- $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 20$ dB: sons com características de baixa frequência e infrassom; a avaliação prossegue para a segunda etapa (medições internas nas edificações);
- $L_{Ceq} - L_{Aeq} \leq 20$ dB: ausência de características significativas de baixa frequência e infrassom; critério normativo atendido.

Adicionalmente, foram observadas as definições e os conceitos acústicos estabelecidos na ABNT NBR 16313:2025, e os procedimentos de medição foram compatibilizados com as recomendações gerais da ABNT NBR 10151:2019, especialmente quanto à calibração dos equipamentos, ao controle de interferências e ao registro das condições meteorológicas (ABNT, 2019, 2025).

3.3 Receptores e condições de medição

As medições foram realizadas em 10 receptores externos, próximos a residências, no entorno do complexo eólico, com distâncias variando de 88 m a 500 m do aerogerador mais próximo, no período de 20 de março a 14 de junho de 2025. As medições foram conduzidas com os aerogeradores em operação (som total), sob velocidade do vento na nacele (W_{80}) superior a 7,0 m/s, critério que assegura a representatividade das condições operacionais típicas. Os pontos de medição foram posicionados em ambiente externo, a 1,5 m de altura em relação ao solo e a uma distância mínima de 2,0 m de superfícies refletoras (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). Cada medição apresentou tempo de integração de 10 minutos, com registro contínuo dos níveis sonoros de 1 em 1 segundo. Registros sonoros atípicos, transitórios ou não representativos, foram excluídos da análise de dados.

3.4 Instrumentação

Foram utilizados sonômetro Brüel & Kjær 2270 e calibrador sonoro Brüel & Kjær 4231, ambos de Classe 1, com certificados de calibração vigentes (CBR 2400309 e CBR 2400311, respectivamente, válidos até maio de 2026). A incerteza expandida de medição declarada é de $\pm 1,6$ dB (fator de abrangência $k = 2,0$; probabilidade de abrangência de 95%). Os equipamentos atendem aos requisitos da IEC 61672-1 (IEC, 2013), sendo submetidos à verificação de calibração antes e após cada campanha de

medição, assegurando a rastreabilidade metrológica dos resultados. Os níveis de pressão sonora foram determinados utilizando as ponderações A e C, bem como análise espectral em bandas de 1/3 de oitava, abrangendo as frequências centrais de 8 Hz a 100 Hz (MØLLER; PEDERSEN, 2011; ZAJAMŠEK et al., 2016).

3.5 Incerteza e representatividade das medições

Embora as medições tenham sido realizadas sob condições operacionais típicas e com controle metrológico compatível com a ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019), reconhece-se que a propagação de componentes de baixa frequência em parques eólicos apresenta elevada dependência das condições atmosféricas, da estabilidade térmica, da direção do vento e da rugosidade do terreno, podendo apresentar variabilidade temporal significativa (NGUYEN et al., 2022; VAN DEN BERG, 2006).

A representatividade das medições pode ser adicionalmente avaliada pela comparação entre o decaimento sonoro observado e o previsto por modelos teóricos. A ISO 9613-2 (ISO, 1996) descreve a atenuação por divergência geométrica de uma fonte pontual em campo livre por meio do termo $A_{div} = 20 \log_{10}(d) + 11$, equivalente a uma redução de 20 dB por década de distância, independentemente da frequência. A regressão log-linear (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012) dos níveis sonoros medidos, detalhada na seção 4.4 (Tabela 5.4 e Figura 5.5), indicou decaimento de 13,9 dB por década para o L_{Aeq} ($r^2 = 0,79$) e de 5,6 dB por década para o L_{Ceq} ($r^2 = 0,19$), ambos inferiores em magnitude ao valor teórico. Esse comportamento é fisicamente coerente com uma fonte espacialmente distribuída, composta por 107 aerogeradores, com efeito reforçado pela reflexão no solo e pela refração atmosférica (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; VAN DEN BERG, 2006). O baixo ajuste do L_{Ceq} reflete, ainda, a elevada variabilidade espacial da emissão de baixa frequência entre receptores (MØLLER; PEDERSEN, 2011; NGUYEN et al., 2022), de modo que a extrapolação do L_{Ceq} e da diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ para distâncias superiores às efetivamente medidas devem ser interpretada com cautela.

4 RESULTADOS

4.1 Diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ por receptor

Os resultados das medições externas de L_{Ceq} e L_{Aeq} e as diferenças aritméticas obtidas nos 10 receptores avaliados, são apresentados na Tabela 5.2, com indicação de conformidade ao critério da DIN 45680 (DIN, 1997).

Tabela 5.2 – Níveis de pressão sonora ponderados em C e em A e diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ nos receptores avaliados, em ambiente externo às edificações residenciais (som total; $W_{80} > 7,0$ m/s)

Receptor	Distância (m)	$L_{Ceq,T}$ (dB)	$L_{Aeq,T}$ (dB)	$L_{Ceq} - L_{Aeq}$ (dB)	Conformidade com DIN 45680
R-001	88	69,7	59,5	10	Atende
R-004	128	68,6	57,3	11	Atende
R-013	154	74,6	60,0	15	Atende
R-229	207	63,7	52,6	11	Atende
R-239	229	68,5	56,3	12	Atende
R-071	253	66,4	55,6	11	Atende
R-240	359	69,5	52,2	17	Atende
R-129	386	69,2	51,7	17	Atende
R-161	404	65,9	52,3	14	Atende
R-210	500	64,7	48,1	17	Atende

Fonte: Oppus Acústica (RT-41/25, 2025). Nota: incerteza expandida de medição de $\pm 1,6$ dB ($k = 2,0$; probabilidade de abrangência de 95%); limite normativo: $L_{Ceq} - L_{Aeq} \leq 20$ dB.

Em todos os 10 receptores avaliados, a diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ permaneceu inferior ao limite de 20 dB estabelecido na DIN 45680, variando entre 10 dB (R-001, a 88 m) e 17 dB (R-240, R-129 e R-210, entre 359 m e 500 m). A média foi de 13,5 dB (desvio-padrão de 2,84 dB; intervalo de confiança de 95%: 11,5 dB a 15,5 dB), calculada com distribuição t de Student para $n = 10$ ($gl = 9$; $t = 2,262$) (STUDENT, 1908). O intervalo de confiança permanece integralmente abaixo do limiar normativo, reforçando a robustez do resultado. Dessa forma, em conformidade com o procedimento bifásico da norma, não foi necessária a realização de medições nos ambientes internos das edificações.

4.2 Análise gráfica dos resultados

Os valores de $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ por receptor, são apresentados na Figura 5.2, ordenados por distância crescente, com a linha de referência normativa da DIN 45680.

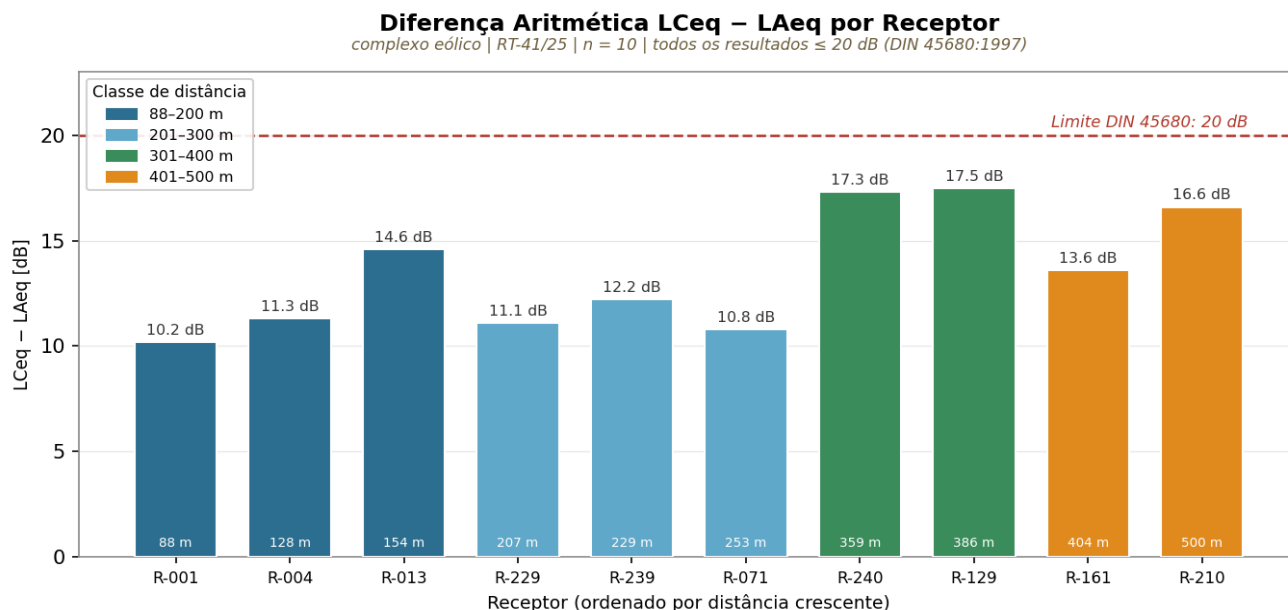


Figura 5.2 – Diferença aritmética L_{Ceq} – L_{Aeq} por receptor, com linha de referência normativa de 20 dB (DIN, 1997). Receptores ordenados por distância crescente ao aerogerador mais próximo

Fonte: Elaboração própria (2026).

Observa-se tendência de aumento da diferença L_{Ceq} – L_{Aeq} com o incremento da distância ao aerogerador mais próximo. A correlação de Spearman (SPEARMAN, 1904) entre distância e diferença L_{Ceq} – L_{Aeq} foi de $\rho = 0,65$ ($p = 0,042$), confirmando associação positiva estatisticamente significativa entre as duas variáveis. Essa tendência é fisicamente esperada, uma vez que as frequências mais altas sofrem maior atenuação atmosférica ao longo da propagação, tornando o espectro sonoro progressivamente mais rico em componentes de baixa frequência com o aumento da distância (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DIN, 1997; NGUYEN et al., 2022). Ainda assim, a tendência observada não foi suficiente para ultrapassar o limiar normativo em nenhum dos receptores, incluindo o R-210, a 500 m, que registrou diferença de 17 dB.

Os níveis L_{Ceq} e L_{Aeq} , em função da distância ao aerogerador mais próximo, são apresentados na Figura 5.3 evidenciando o comportamento diferenciado de atenuação dos dois descritores.

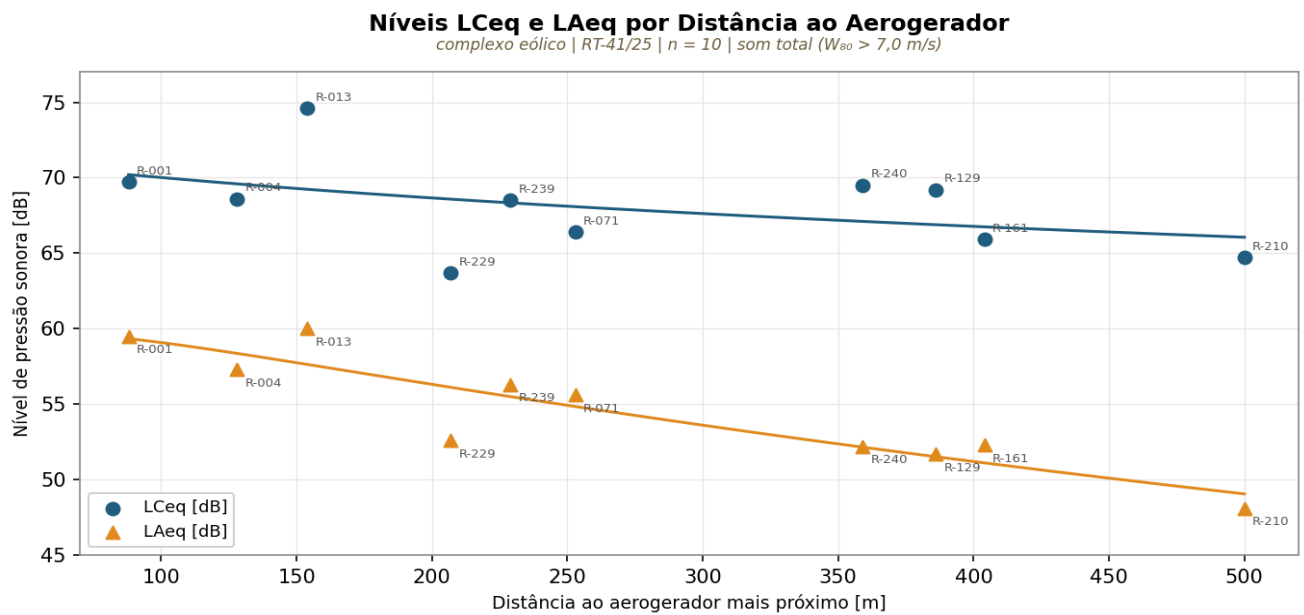


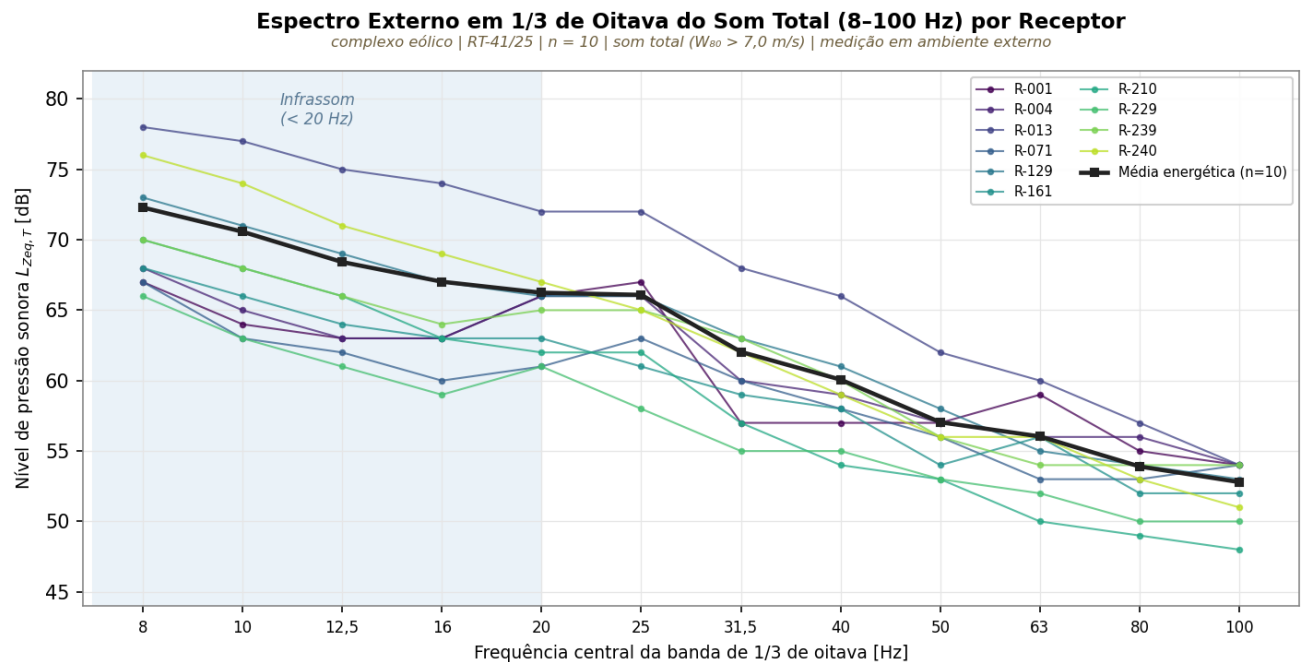
Figura 5.3 – Níveis sonoros equivalentes contínuos ponderados L_{Ceq} e L_{Aeq} em função da distância ao aerogerador mais próximo

Fonte: Elaboração própria (2026).

Observa-se redução mais pronunciada do L_{Aeq} com a distância, enquanto o L_{Ceq} apresenta variação menos acentuada. Esse comportamento é compatível com a maior influência relativa das componentes de baixa frequência na ponderação C e com as diferenças nas taxas de atenuação atmosférica em função da frequência: componentes de alta frequência sofrem maior atenuação por absorção atmosférica e por efeitos de solo ao longo da propagação, enquanto as componentes de baixa frequência se propagam com menor perda (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DIN, 1997; ISO, 1996). Esse padrão é consistente com os achados de Nguyen et al. (2022), que documentaram inclinação do espectro de infrassom entre 3 dB e 6 dB por oitava com o aumento da distância, com inclinações mais acentuadas nos locais mais afastados.

4.3 Caracterização espectral do infrassom e da baixa frequência

Embora o critério de triagem da seção 4.1 indique a ausência de características dominantes de baixa frequência e infrassom em todos os receptores, os níveis sonoros medidos no espectro do som total em bandas de 1/3 de oitava, permitem caracterizar diretamente o conteúdo nas bandas de infrassom (8 Hz a 20 Hz) e de baixa frequência (até 100 Hz) definidas na DIN 45680 (DIN, 1997). A Figura 5.4 apresenta o espectro externo dos dez receptores na faixa de 8 Hz a 100 Hz, com destaque para a faixa de infrassom e para a média energética do conjunto.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na faixa de infrassom, os níveis por banda situam-se entre 59 dB e 78 dB, com a média energética do conjunto decrescendo de 72,3 dB em 8 Hz para 66,2 dB em 20 Hz. Os maiores níveis ocorrem no receptor R-013, a 154 m, seguido do R-240, a 359 m, enquanto os menores são observados nos receptores R-229 e R-071. Na Tabela 5.3 estão reunidos os níveis por banda de infrassom e o nível global de infrassom (L_{inf}), obtido pela soma energética das bandas de 8 Hz a 20 Hz.

Tabela 5.3 – Níveis de pressão sonora em 1/3 de oitava nas bandas de infrassom (8 Hz a 20 Hz) e nível global de infrassom por receptor, em ambiente externo

Receptor	Dist. (m)	8 Hz	10 Hz	12,5 Hz	16 Hz	20 Hz	L_{inf} (8–20 Hz)
R-001	88	67	64	63	63	66	71,9
R-004	128	68	65	63	63	66	72,4
R-013	154	78	77	75	74	72	82,7
R-071	253	67	63	62	60	61	70,4
R-129	386	73	71	69	67	66	76,9
R-161	404	68	66	64	63	63	72,3
R-210	500	70	68	66	63	62	73,8
R-229	207	66	63	61	59	61	69,7

Receptor	Dist. (m)	8 Hz	10 Hz	12,5 Hz	16 Hz	20 Hz	L _{inf} (8–20 Hz)
R-239	229	70	68	66	64	65	74,1
R-240	359	76	74	71	69	67	79,6

Fonte: Oppus Acústica (RT-41/25, 2025). Nota: L_{inf} corresponde ao nível global obtido pela soma energética das bandas de 8 Hz a 20 Hz e não equivale ao descritor ponderado em G definido pela ISO 7196 (ISO, 1995).

Destaca-se que os limites espectrais da DIN 45680 são definidos para medições em ambientes internos, ao passo que os valores aqui apresentados foram obtidos de medições realizadas em ambientes externos. Como o isolamento típico de fachada atenua o som em cerca de 10 dB a 25 dB, a comparação direta entre o espectro externo e os limites internos da norma não é normativamente válida e não foi realizada. Pela sistemática bifásica, a etapa interna só é acionada quando a triagem externa sinaliza a presença de baixa frequência, o que não ocorreu em nenhum receptor. A caracterização espectral cumpre, portanto, função descritiva, evidenciando que a energia de infrassom, embora mensurável, decresce de forma consistente com a frequência e não configura predominância espectral na faixa avaliada (DIN, 1997).

4.4 Projeção dos níveis até 1.000 m

A tendência de aumento da diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ com a distância, confirmada estatisticamente na seção 4.2, motivou a avaliação do comportamento projetado dos descritores até 1.000 m, faixa de interesse para a discussão de percepção do infrassom em locais distantes. A projeção foi obtida por regressão log-linear dos dados medidos nos 10 receptores. Na Tabela 5.4 são apresentadas as taxas de decaimento observadas com a referência teórica de divergência geométrica de fonte da ISO 9613-2 (ISO, 1996).

Tabela 5.4 – Comparação entre o decaimento teórico (divergência geométrica, ISO 9613-2) e o decaimento observado por regressão log-linear, e níveis projetados a 1.000 m

Descritor	Teórico ISO 9613-2 (dB/década)	Observado (dB/década)	r ²	Nível medido a 500 m (dB)	Nível projetado a 1.000 m (dB)
L _{Aeq}	-20,0	-13,9	0,79	48,1	45,9
L _{Ceq}	-20,0	-5,6	0,19	64,7	64,6
L _{Ceq} - L _{Aeq}	N/A	+8,4	0,52	16,6	18,7

Fonte: Elaboração própria (2026). Nota: o valor teórico corresponde à divergência geométrica de fonte pontual, independente da frequência; a diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ projetada corresponde à diferença entre as projeções individuais, e o r^2 de 0,52 refere-se ao ajuste da diferença, distinto da correlação de Spearman da seção 4.2.

Os dois descritores apresentam decaimento menos acentuado que o previsto pela divergência geométrica teórica de campo livre, com diferença de 6,1 dB por década para o L_{Aeq} e de 14,4 dB por década para o L_{Ceq} , compatível com a geometria de fonte distribuída do complexo e com a menor atenuação das baixas frequências. Sob a hipótese idealizada de divergência puramente geométrica, a diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ permaneceria constante com a distância, pois a atenuação geométrica independe da frequência. O incremento observado, de 8,4 dB por década, evidencia, portanto, um enriquecimento espectral real nas baixas frequências ao longo da propagação, atribuível a mecanismos dependentes da frequência, como a absorção atmosférica diferencial e os efeitos de solo, além da geometria espacial do complexo, que afasta o conjunto do comportamento de uma fonte pontual (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DIN, 1997).

A projeção dos níveis L_{Ceq} e L_{Aeq} até 1.000 m, são apresentados na Figura 5.5, com a faixa efetivamente medida representada por linha contínua e a região extrapolada por linha tracejada sobre fundo sombreado.

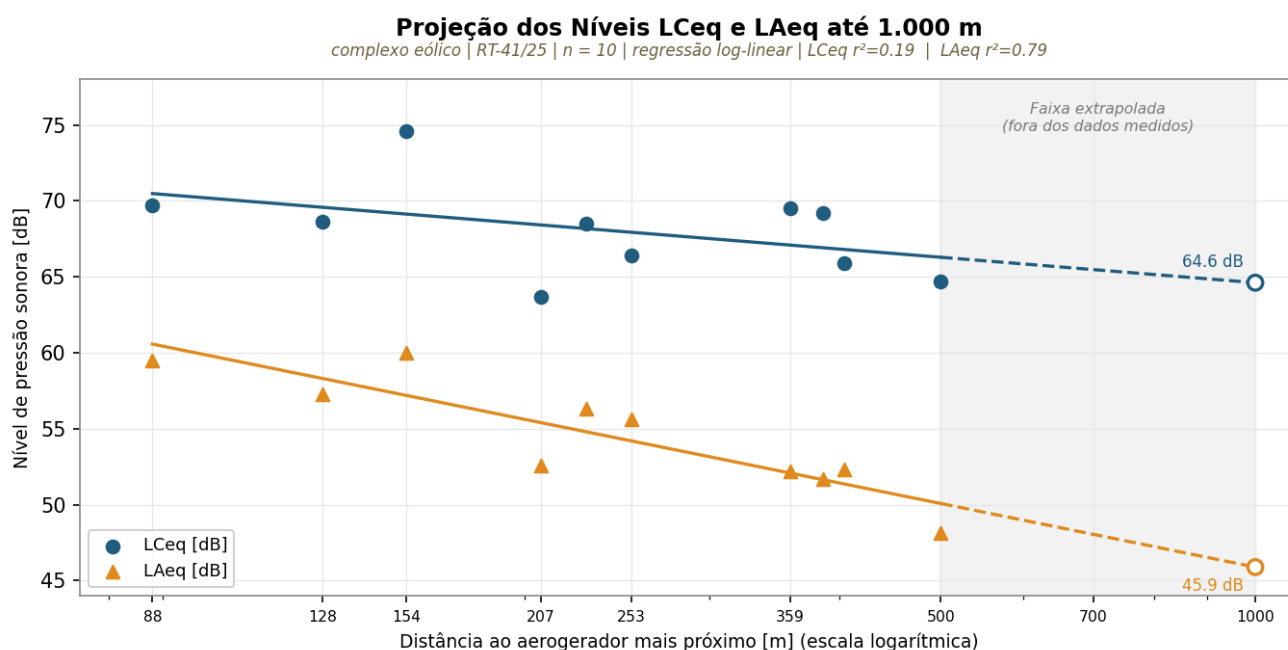


Figura 5.5 – Projeção dos níveis equivalentes ponderados L_{Ceq} e L_{Aeq} até 1.000 m, com distinção entre a faixa medida e a faixa extrapolada

Fonte: Elaboração própria (2026).

A projeção indica, a 1.000 m, L_{Aeq} de aproximadamente 45,9 dB e L_{Ceq} de aproximadamente 64,6 dB. O ajuste robusto do L_{Aeq} confere maior confiabilidade à sua projeção, ao passo que a projeção do L_{Ceq} , dado o baixo ajuste log-linear discutido na seção 3.5, deve ser entendida exclusivamente como exercício exploratório.

A Figura 5.6 apresenta a projeção da diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ até 1.000 m, com a linha de referência normativa de 20 dB estabelecido na norma DIN 45680.

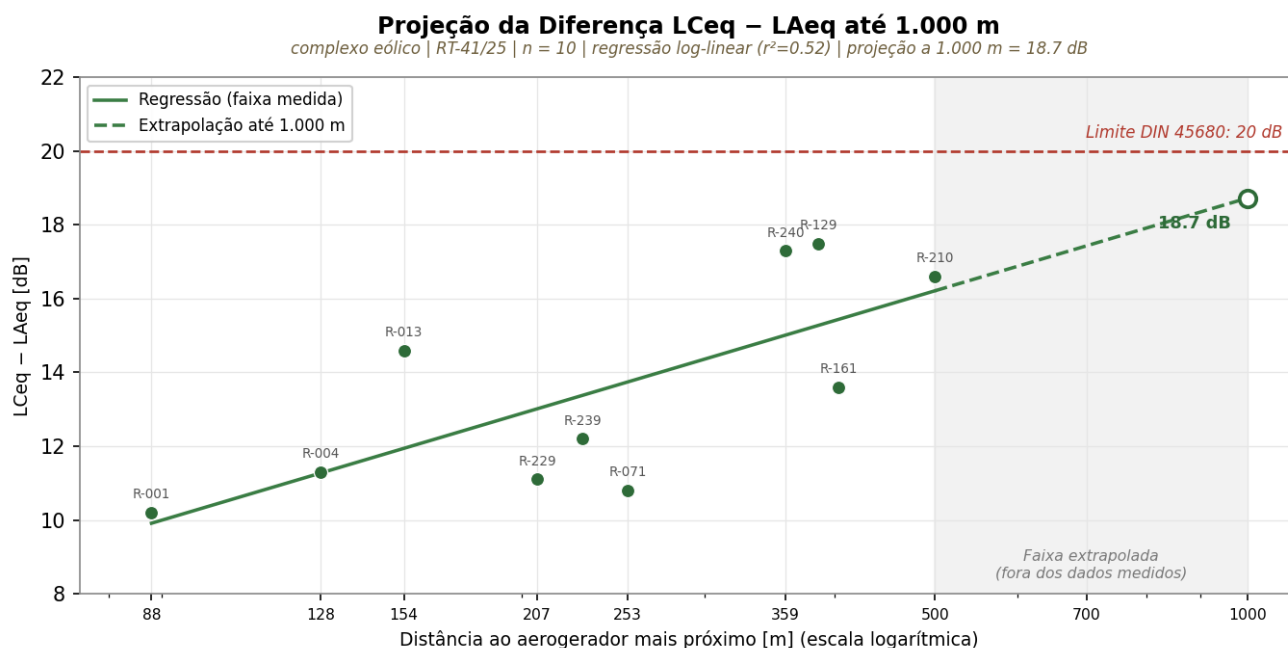


Figura 5.6 – Projeção da diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ até 1.000 m, com a linha de referência normativa de 20 dB (DIN, 1997) e distinção entre a faixa medida e a faixa extrapolada

Fonte: Elaboração própria (2026).

A diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ projetada a 1.000 m é de aproximadamente 18,7 dB, permanecendo abaixo do limiar normativo. Como a projeção combina a regressão ajustada de uma reta com maior fator de inclinação para o L_{Aeq} , se comparada com a regressão ajustada do L_{Ceq} , a incerteza real da diferença projetada é superior à sugerida pelo ajuste estatístico.

5 DISCUSSÃO

Os resultados indicam que a operação dos aerogeradores do complexo eólico avaliado não produz, nas condições operacionais típicas avaliadas, componentes de baixa frequência e infrassom em magnitude suficiente para superar o critério normativo da DIN 45680 ($L_{Ceq} - L_{Aeq} \leq 20$ dB) em nenhum dos 10 receptores. Esse resultado é consistente com a literatura, segundo a qual as componentes

aerodinâmicas de baixa frequência, em condições típicas de operação, tendem a não superar os limiares normativos em ambiente externo (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; ZAJAMŠEK et al., 2016).

O resultado é também coerente com a distinção técnica entre infrassom e modulação de amplitude (AM) de baixa frequência. Trabalhos publicados por Nguyen et al. (2022), baseados em mais de quatro anos de dados registrados, continuamente, em três parques eólicos australianos, indicam que o infrassom gerado em parques eólicos é inaudível a pessoas com audição preservada a distâncias superiores a 1 km, com níveis globais ponderados em G abaixo de 75 dBG.

As projeções dos descritores sonoros até 1.000 m indicam que, ainda que a diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ projetada, de aproximadamente 18,7 dB, se aproxime do limiar normativo de 20 dB, ela permanece abaixo desse limiar, justamente na faixa de distância a partir da qual a literatura (NGUYEN et al., 2022; HANSEN et al., 2019) documenta a ausência de percepção do infrassom. Mesmo no cenário projetado mais desfavorável, o enriquecimento espectral nas baixas frequências, com a distância, não se traduz em indicação de dominância de baixa frequência nos termos normativos.

Até onde foi possível verificar, são escassos os estudos brasileiros com medições sistemáticas da diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ em múltiplos receptores residenciais próximos a parques eólicos em operação.

Do ponto de vista da gestão socioambiental, os resultados subsidiam processos de comunicação com as comunidades do entorno, demonstrando, com base técnica objetiva, a ausência de dominância de baixa frequência nos termos da DIN 45680, e fortalecem a definição de estratégias de gestão acústica prioritariamente voltadas às componentes do espectro audível (NGUYEN et al., 2022; HANSEN et al., 2019).

6 LIMITAÇÕES DA ANÁLISE

Ausência de norma brasileira específica. Não existe norma brasileira específica para a avaliação de infrassom e ruído de baixa frequência associados à operação de parques eólicos (DAVY; BURGEMEISTER; HILLMAN, 2020).

Representatividade das condições de medição. Os resultados representam condições operacionais típicas ($W_{80} > 7,0$ m/s; período de março a junho de 2025). Condições de estabilidade atmosférica noturna, inversões térmicas e situações de propagação favorecida (*downwind*) não foram avaliadas sistematicamente e podem

resultar em diferentes valores de $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ (NGUYEN et al., 2022; VAN DEN BERG, 2006).

Limitação instrumental em frequências muito baixas. Existem limitações associadas à calibração metrológica nas bandas de 8 Hz e 10 Hz, em razão da ausência de laboratórios acreditados no Brasil para essa faixa espectral (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

7 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou a caracterização do conteúdo de sons de baixa frequência e infrassom medidos no entorno de um complexo eólico com 107 aerogeradores, conduzida por meio do critério de triagem $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ e da análise espectral em bandas de 1/3 de oitava, conforme a DIN 45680, em 10 receptores residenciais distribuídos em distâncias de 88 m a 500 m do aerogerador mais próximo.

Os resultados apresentados demonstram que a diferença aritmética $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ ficou abaixo do limite normativo de 20 dB em todos os receptores avaliados, variando entre 10 dB e 17 dB, com média de 13,5 dB (desvio-padrão de 2,84 dB; intervalo de confiança de 95%: 11,5 dB a 15,5 dB). A correlação entre distância e diferença $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ ($\rho = 0,65$; $p = 0,042$) confirmou a tendência fisicamente esperada de enriquecimento espectral nas baixas frequências com o aumento da distância.

Conclui-se também que os sons provenientes da operação dos aerogeradores não atingiram níveis indicativos de dominância de baixa frequência no critério adotado.

Esses achados representam condições operacionais típicas do empreendimento, são consistentes com a literatura (NGUYEN et al., 2022; ZAJAMŠEK et al., 2016; DAVY; BURGEMEISTER; HILLMAN, 2020) e fornecem subsídios técnicos para a avaliação de infrassom e ruído de baixa frequência em parques eólicos no contexto da lacuna normativa brasileira.

Recomenda-se que estudos adicionais de infrassons e baixas frequências sejam realizados para melhor compreensão do tema aqui apresentado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10151: acústica — medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16313: acústica — terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.
- DAVY, J. L.; BURGEMEISTER, K.; HILLMAN, D. Wind turbine sound limits: current standards and where to from here? *Applied Acoustics*, v. 165, p. 107325, 2020. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107325.
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. Wind farm noise: measurement, assessment and control. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- HANSEN, K. L.; NGUYEN, P.; ZAJAMŠEK, B.; CATCHESIDE, P.; HANSEN, C. H. Prevalence of wind farm amplitude modulation at long-range residential locations. *Journal of Sound and Vibration*, v. 455, p. 136–149, 2019. doi: 10.1016/j.jsv.2019.05.008.
- IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-11: wind turbines — part 11: acoustic noise measurement techniques. Geneva: IEC, 2012.
- IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61672-1: electroacoustics — sound level meters — part 1: specifications. Geneva: IEC, 2013.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7196: acoustics — frequency-weighting characteristic for infrasound measurements. Geneva: ISO, 1995.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9613-2: acoustics — attenuation of sound during propagation outdoors — part 2: general method of calculation. Geneva: ISO, 1996.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 226: acoustics — normal equal-loudness-level contours. Geneva: ISO, 2003.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1996-2: acoustics — description, measurement and assessment of environmental noise — part 2: determination of sound pressure levels. Geneva: ISO, 2017.
- MØLLER, H.; PEDERSEN, C. S. Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 129, n. 6, p. 3727–3744, 2011. doi: 10.1121/1.3543957.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. Introduction to linear regression analysis. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- NGUYEN, P. D.; HANSEN, K. L.; LECHAT, B.; HANSEN, C.; CATCHESIDE, P.; ZAJAMŠEK, B. Audibility of wind farm infrasound and amplitude modulated tonal noise at long-range locations. *Applied Acoustics*, v. 201, p. 109106, 2022. doi: 10.1016/j.apacoust.2022.109106.

- OPPUS ACÚSTICA. Relatório técnico de ensaio de avaliação de infrassom e baixas frequências. Relatório RT-41/25. Belo Horizonte: Oppus Acústica, 2025.
- PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA, M. et al. Guidelines for occupational exposure to whole-body vibration and infrasound. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, v. 27, n. 3, p. 321–342, 2014.
- PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA, M. et al. Low frequency noise and infrasound from wind turbines: exposure and effects on health. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, v. 31, n. 6, p. 721–735, 2018.
- SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, v. 15, n. 1, p. 72–101, 1904. doi: 10.2307/1412159.
- STUDENT. The probable error of a mean. *Biometrika*, v. 6, n. 1, p. 1–25, 1908. doi: 10.1093/biomet/6.1.1.
- VAN DEN BERG, G. P. The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. 2006. Tese (Doutorado) — University of Groningen, Groningen, 2006.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.
- ZAJAMŠEK, B.; HANSEN, K. L.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, C. H. Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, v. 370, p. 176–190, 2016. doi: 10.1016/j.jsv.2016.02.001.

CAPÍTULO 6

MITIGAÇÃO ACÚSTICA RESIDENCIAL EM COMUNIDADES DO ENTORNO DE COMPLEXOS EÓLICOS NO SEMIÁRIDO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ISOLAMENTO DE FACHADA EM CENÁRIO ANTES E DEPOIS

RESUMO

A persistência de incômodo sonoro em comunidades rurais do entorno de parques eólicos, mesmo quando os níveis externos atendem aos limites normativos, justifica a adoção de medidas de mitigação atuantes sobre o receptor. Este capítulo avalia o desempenho de intervenções de isolamento acústico de fachada em duas residências localizadas no entorno de um complexo eólico no semiárido pernambucano, situadas a 345 m e a 449 m do aerogerador mais próximo. Adotou-se delineamento quase-experimental do tipo antes e depois, com ensaios de campo de diferença padronizada de nível de fachada ($D_{2m,nT,w}$) conforme a ABNT NBR ISO 16283-3:2021 e a ABNT NBR ISO 717-1:2021, realizados antes (novembro de 2025) e após (junho de 2026) a execução das intervenções. A solução construtiva consistiu em forro de gesso liso com duas chapas resistentes à umidade de 12,5 mm, sobre o qual foram instaladas duas mantas de poliéster (lã de PET) de 7 kg/m³ e 50 mm de espessura cada, complementada por portas e janelas de madeira com sistema de vedação acústica. Nas condições anteriores à intervenção, ambas as residências apresentaram $D_{2m,nT,w}$ igual a 6 dB, inferior ao desempenho mínimo de 20 dB exigido pela ABNT NBR 15575-4:2021 para a Classe de Ruído I. Após a intervenção, os valores se elevaram para 25 dB e 22 dB, ganhos de 19 dB e 16 dB, respectivamente, situando ambas as residências acima do mínimo da Classe I, com a residência a 345 m alcançando o patamar da Classe II. Os ganhos objetivos mostraram-se coerentes com a melhora da resposta perceptiva relatada pelos moradores nos mesmos domicílios. Os resultados evidenciam que intervenções construtivas de baixa complexidade, compatíveis com a tipologia local, são capazes de promover ganhos expressivos de isolamento e de conforto acústico, constituindo alternativa tecnicamente eficaz e socialmente adequada à realocação, e qualificando-se como instrumento técnico, social e estratégico de gestão do ruído em complexos eólicos.

Palavras-chave: Isolamento de fachada; diferença padronizada de nível; ABNT NBR 15575-4; mitigação acústica residencial; energia eólica; semiárido.

1 INTRODUÇÃO

A operação de parques eólicos em áreas rurais habitadas introduz um agente sonoro contínuo em paisagens caracterizadas por baixa ambiência acústica, nas quais o contraste entre o som residual e o ruído proveniente dos aerogeradores tende a amplificar a percepção de incômodo, ainda que os níveis medidos se encontrem dentro dos limites normativos vigentes (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; KUWANO et al., 2014). Nesse contexto, a resposta humana ao ruído é reconhecidamente multifatorial, dependente não apenas da intensidade sonora, mas também de fatores contextuais e psicossociais, o que reforça a necessidade de estratégias de gestão que extrapolem a simples conformidade com limites externos (GUSKI, 1999; MÜLLER et al., 2023; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Entre as estratégias de controle do ruído, as medidas atuantes sobre o receptor, especialmente o aprimoramento do isolamento acústico das edificações, destacam-se como alternativa às intervenções na fonte e na trajetória de propagação, sobretudo quando a permanência das famílias no local é socialmente desejável e tecnicamente viável (DESHMUKH et al., 2019; BOTELHO et al., 2017; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017). A efetividade dessas medidas é particularmente relevante em residências do semiárido nordestino, frequentemente caracterizadas por sistemas construtivos de baixo desempenho acústico, com coberturas apoiadas diretamente sobre as paredes, ausência de laje ou forro e esquadrias com baixa estanqueidade ao ar, condições que reduzem a capacidade de atenuação passiva do envelope construtivo e ampliam a transmissão do ruído externo para os ambientes internos (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019).

O desempenho de isolamento de fachada de uma edificação pode ser caracterizado pela diferença padronizada de nível ponderada, descritor normalizado que sintetiza, em um único número, a capacidade da vedação externa de atenuar o ruído aéreo incidente, conforme procedimentos consolidados em normas internacionais e brasileiras (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; ZAJAMŠEK et al., 2016). A comparação desse descritor com os níveis de desempenho estabelecidos

pela ABNT NBR 15575-4:2021 permite avaliar a adequação acústica das edificações e fundamentar tecnicamente as intervenções de mitigação.

Este capítulo tem por objetivo avaliar, sob delineamento quase-experimental do tipo antes e depois, o desempenho de intervenções de isolamento acústico de fachada em duas residências do entorno de um complexo eólico no semiárido pernambucano. Especificamente, busca-se quantificar o ganho de isolamento promovido pela solução construtiva adotada, comparar os resultados com os patamares normativos da ABNT NBR 15575-4:2021 e relacionar os ganhos objetivos de isolamento com a resposta perceptiva relatada pelos moradores, de modo a subsidiar a proposição de medidas mitigadoras tecnicamente fundamentadas, socialmente contextualizadas e estrategicamente inseridas na gestão socioambiental dos complexos eólicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estratégias de mitigação do ruído eólico: fonte, trajetória e receptor

A gestão do ruído ambiental em parques eólicos articula medidas de controle na fonte, na trajetória de propagação e no receptor, reconhecidas na literatura como componentes complementares de uma política abrangente de controle sonoro (DESHMUKH et al., 2019; BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023). As intervenções sobre o receptor compreendem, de um lado, a realocação de residências, considerada medida excepcional e de última instância, aplicável apenas quando a exposição é crônica e severa e quando as demais intervenções não asseguram condições adequadas de conforto acústico (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DAVY et al., 2020; KARASMANAKI, 2022); de outro, a mitigação acústica construtiva das edificações, priorizada nos casos em que há potencial de redução efetiva do incômodo, especialmente no período noturno, e nos quais a permanência da residência no local se mostra socialmente desejável e tecnicamente viável (BOTELHO et al., 2017; MORSING et al., 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

A decisão entre realocação e mitigação construtiva orienta-se por critérios objetivos e subjetivos, buscando compatibilizar a efetividade acústica das intervenções com princípios de proporcionalidade, razoabilidade e aceitabilidade social (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DAVY et al., 2020). A literatura evidencia, ainda, que a disposição dos moradores em adotar medidas de mitigação é influenciada por fatores não acústicos, como a confiança no empreendedor e a

participação no processo decisório, o que reforça o caráter sociotécnico dessas intervenções (BOTELHO et al., 2017; GUSKI, 1999).

2.2 Desempenho acústico de fachada e marco normativo

O desempenho de isolamento ao ruído aéreo de uma vedação externa é avaliado, em campo, pela diferença padronizada de nível de fachada, $D_{2m,nT,w}$, obtida segundo a ABNT NBR ISO 16283-3:2021, que estabelece o procedimento de medição in situ do isolamento de fachada a ruído aéreo, e ponderada em número único conforme a ABNT NBR ISO 717-1:2021. Esse descritor expressa a diferença entre o nível de pressão sonora externo, medido a 2,0 m da fachada, e o nível médio no ambiente interno, corrigida pelo tempo de reverberação do recinto receptor, determinado de acordo com a ABNT NBR ISO 3382-2:2017 (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; ZAJAMŠEK et al., 2016).

A ABNT NBR 15575-4:2021 estabelece níveis de desempenho mínimo de isolamento a ruído aéreo de vedações externas de dormitórios, organizados em três classes de ruído definidas pelo nível de pressão sonora incidente na fachada. Para a Classe de Ruído I, típica de regiões rurais com nível incidente igual ou inferior a 60 dB, o desempenho mínimo exigido é de $D_{2m,nT,w} \geq 20$ dB. Cabe registrar que a referida norma foi concebida para a avaliação de edificações habitacionais novas, de modo que sua aplicação a edificações existentes, no presente estudo, assume caráter de referência de desempenho, sem pretensão de certificação formal das residências (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015).

2.3 Construção rural do semiárido e suscetibilidade ao ruído

As propriedades físico-acústicas dos sistemas construtivos exercem influência direta sobre a transmissão sonora do ambiente externo para o interior das residências (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; KARASMANAKI, 2022). No semiárido nordestino, predominam tipologias construtivas associadas a menor desempenho de isolamento, como edificações em alvenaria sem laje estrutural, coberturas com telhas diretamente apoiadas, ausência de forro e esquadrias com baixa estanqueidade ao ar. Tais configurações são reconhecidamente associadas a menor atenuação do ruído externo, especialmente nas faixas de média e baixa frequência, ampliando a suscetibilidade à percepção do ruído proveniente dos aerogeradores (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019; ZAJAMŠEK et al., 2016). A

caracterização detalhada do modelo construtivo das edificações constitui, portanto, etapa fundamental para a definição de medidas mitigadoras eficazes e proporcionais.

2.4 Critérios de priorização e aceitabilidade social das intervenções

A definição das medidas mitigadoras considera, além da efetividade acústica mensurável, a compatibilidade com os modelos construtivos locais, a viabilidade técnica e financeira e a mínima interferência no uso cotidiano das residências (DESHMUKH et al., 2019; BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023). Recomenda-se que as intervenções preservem, sempre que possível, as características construtivas e arquitetônicas originais, com as quais os moradores mantêm identidade social e vínculo afetivo (BOTELHO et al., 2017; GUSKI, 1999). Entre as medidas usualmente adotadas, destacam-se o incremento do isolamento acústico de coberturas e forros, a substituição ou o aprimoramento de esquadrias com foco na estanqueidade ao ar e o reforço das vedações existentes, soluções com comprovado potencial de redução do incômodo e compatíveis com as características das edificações avaliadas (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018; DAVY et al., 2020).

2.5 A mitigação como opção técnica, social e estratégica de gestão do ruído

A gestão do ruído no setor eólico é frequentemente reduzida à sua dimensão técnica, embora a literatura reconheça que o incômodo sonoro constitui, mais do que um problema acústico, uma questão de governança socioambiental, que articula de forma interdependente dimensões técnicas, sociais e regulatórias (GUSKI, 1999; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Sob essa perspectiva, a mitigação acústica residencial não se esgota no ganho de isolamento mensurável, configurando-se simultaneamente como opção técnica, social e estratégica de gestão do ruído. Como opção técnica, fundamenta-se em descritores normalizados e em soluções construtivas de eficácia comprovada. Como opção social, atua sobre a experiência sonora cotidiana das famílias e preserva o vínculo afetivo e a identidade territorial das comunidades, ao permitir a permanência das residências no local em vez de sua realocação. Como opção estratégica, integra-se aos instrumentos de gestão socioambiental dos empreendimentos, contribuindo para a prevenção de conflitos e para a sustentação da licença social para operar (BOTELHO et al., 2017; DAVY et al., 2020; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

A dimensão social adquire relevância particular no contexto do semiárido nordestino, onde a implantação de parques eólicos se dá em territórios de populações rurais com forte vínculo histórico e cultural com a terra, em cenário marcado por vulnerabilidades socioeconômicas e por assimetrias na distribuição dos benefícios da atividade (CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; SANTANA; SILVA, 2021). Nessas condições, o ruído ambiental, mesmo quando enquadrado nos limites normativos, pode atuar como catalisador de tensões, sobretudo quando os processos de comunicação social e de participação comunitária são insuficientes (MÜLLER et al., 2023; SANTANA; SILVA, 2021). A percepção do ruído é, assim, mediada pela confiança no empreendedor, pela sensação de equidade no processo decisório e pelo histórico de relacionamento entre empresa e comunidade, fatores não acústicos que condicionam fortemente a resposta ao som (GUSKI, 1999; BOTELHO et al., 2017).

Nesse marco, a mitigação construtiva assume caráter estratégico ao deslocar a gestão do ruído de uma lógica reativa, centrada na mera conformidade com limites, para uma lógica preventiva e relacional, orientada à redução efetiva do incômodo e à construção de confiança. Programas estruturados de mitigação residencial, ao preservarem a permanência das comunidades no território e ao responderem de forma tangível às suas preocupações, contribuem para a convivência harmônica entre empreendimentos e populações do entorno e para a inserção social da energia eólica em uma transição energética que se pretende não apenas limpa, mas também socialmente justa (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018; DAVY et al., 2020; KARASMANAKI, 2022).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo e residências avaliadas

O estudo foi conduzido no entorno de um complexo eólico localizado no semiárido do estado de Pernambuco, no bioma Caatinga. Foram avaliadas duas residências de caráter permanente, ambas em alvenaria, selecionadas entre os receptores do entorno para recebimento de intervenções de mitigação acústica. A primeira residência situa-se a 345 m do aerogerador mais próximo e a segunda a 449 m. Em ambos os casos, o ambiente receptor avaliado foi o dormitório, recinto de maior sensibilidade ao ruído no período noturno. Adotou-se delineamento quase-experimental do tipo antes e depois, no qual cada residência funciona como seu

próprio referencial de comparação, avaliando-se o desempenho de isolamento de fachada antes e após a execução das intervenções (BOTELHO et al., 2017; FEDER et al., 2015).

As duas residências apresentavam, antes da intervenção, tipologia construtiva rural de baixo desempenho acústico, caracterizada no Quadro 6.1. A vedação externa era constituída por alvenaria de tijolo cerâmico com reboco em ambos os lados, e a cobertura, por telha cerâmica apoiada diretamente sobre a estrutura, sem laje e sem forro. As esquadrias eram de madeira, sem sistema de vedação acústica. Essa configuração explica o reduzido isolamento inicial, de apenas 6 dB nas duas residências: a ausência de forro e de laje torna a cobertura o principal caminho de transmissão do ruído aéreo para o interior, enquanto a baixa estanqueidade ao ar das esquadrias de madeira sem vedação compromete o desempenho nas frequências médias e altas. Tais características são reconhecidas na literatura como determinantes da elevada transmissão do ruído externo em edificações rurais de baixo padrão construtivo (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019).

Quadro 6.1 – Caracterização construtiva das residências avaliadas em sua condição anterior à intervenção

Característica	R1 (345 m)	R2 (449 m)
Sistema construtivo	Alvenaria de tijolo cerâmico, com reboco em ambos os lados	Alvenaria de tijolo cerâmico, com reboco em ambos os lados
Cobertura	Telha cerâmica	Telha cerâmica
Laje	Não	Não
Forro	Ausente	Ausente
Tipo de janela	Madeira, sem vedação acústica	Madeira, de duas folhas de giro, sem vedação acústica
Tipo de porta	Madeira, sem vedação acústica	Madeira, sem vedação acústica

Fonte: elaborado pelo autor a partir das características de fachada dos relatórios AE-51/25 e AE-53/25 (Oppus Acústica) e do modelo construtivo registrado nos questionários aplicados na condição anterior à intervenção.

3.2 Ensaios de isolamento de ruído aéreo de fachada

Os ensaios de isolamento de ruído aéreo de fachada foram realizados conforme a ABNT NBR ISO 16283-3:2021 e a ABNT NBR ISO 3382-2:2017, com determinação da diferença padronizada de nível ponderada, $D_{2m,nT,w}$, segundo a ABNT NBR ISO 717-1:2021. Como adaptação de campo, prevista no item 10.3 da ABNT NBR ISO 16283-3:2021, utilizou-se como fonte sonora o próprio ruído proveniente dos aerogeradores em operação, condição que confere validade ecológica à avaliação, por reproduzir a fonte de interesse efetivamente percebida pelos moradores. O ambiente emissor foi o complexo eólico e o ambiente receptor, o dormitório da residência, com todas as portas e janelas mantidas fechadas durante as medições.

Para a medição da isolação sonora, empregou-se uma posição de microfone no exterior, a 2,0 m da fachada, e cinco posições no ambiente receptor, a 1,5 m do piso, com filtragem do sinal em bandas de um terço de oitava. O tempo de reverberação do recinto receptor foi medido pelo método do ruído impulsivo, com seis posições de microfone e três registros por posição. As medições foram realizadas com medidores de nível de pressão sonora Brüel & Kjær, modelos 2270, 2250 e 2250L, e calibradores acústicos modelo 4231, com verificação de calibração imediatamente antes e após os ensaios, não havendo diferença superior a 0,5 dB entre os ajustes. A incerteza expandida das medições foi estimada conforme a ISO 12999-1:2014, resultando em $U = 1,5$ dB para fator de abrangência $k = 1,65$, correspondente a nível de confiança de 95%.

Os ensaios anteriores às intervenções foram realizados em 18 de novembro de 2025 e os ensaios posteriores em 9 de junho de 2026, intervalo de aproximadamente sete meses entre as duas campanhas. Os resultados anteriores constam dos relatórios técnicos AE-51/25 (residência a 345 m) e AE-53/25 (residência a 449 m), e os resultados posteriores, dos relatórios AE-43/26 e AE-44/26, respectivamente, todos emitidos pela mesma instituição executora dos ensaios.

3.3 Intervenção de mitigação executada

As duas residências receberam a mesma solução construtiva de mitigação acústica, concebida para compatibilizar efetividade acústica, baixo custo e simplicidade de execução, sem alteração das características arquitetônicas originais. A intervenção consistiu na instalação de forro de gesso liso composto por duas chapas

resistentes à umidade de 12,5 mm de espessura, sobre o qual foram instaladas duas mantas de poliéster (lã de PET) de densidade 7 kg/m³ e espessura de 50 mm cada. Complementarmente, as portas e janelas externas foram substituídas por elementos de madeira dotados de sistema de vedação acústica, com foco na estanqueidade ao ar. A solução combina, portanto, o incremento do isolamento da cobertura, por meio de sistema multicamadas com manta absorvente, e o aprimoramento das esquadrias, em consonância com as estratégias recomendadas na literatura para edificações rurais de baixo desempenho acústico (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

3.4 Avaliação perceptiva complementar

De forma complementar aos ensaios técnicos, a resposta perceptiva dos moradores foi avaliada por meio de questionário estruturado, fundamentado na ABNT NBR ISO 15666, aplicado nos mesmos domicílios na campanha posterior às intervenções. O instrumento contempla a escala numérica de incômodo geral de 0 a 10, na qual 0 corresponde a nada incomodado e 10 a extremamente incomodado, além da avaliação global do ambiente sonoro do local. A triangulação entre o ganho objetivo de isolamento e a resposta perceptiva relatada permite qualificar a efetividade das intervenções sob as óticas técnica e social (BOTELHO et al., 2017; FEDER et al., 2015; MANOHARE et al., 2026).

4 RESULTADOS

4.1 Critério normativo de referência

O Quadro 6.2 reproduz os níveis de desempenho mínimo de isolamento a ruído aéreo de vedações externas de dormitórios estabelecidos pela ABNT NBR 15575-4:2021, utilizados como referência para a avaliação das residências. Considerando o nível de pressão sonora incidente típico da região, igual ou inferior a 60 dB, aplica-se o critério da Classe de Ruído I.

Quadro 6.2 – Critérios e níveis de desempenho mínimo de isolamento a ruído aéreo de vedações externas (dormitórios), conforme a ABNT NBR 15575-4:2021

Classe de ruído	Nível de pressão sonora incidente na fachada, LINC (dB)	Desempenho mínimo $D_{2m,nT,w}$ (dB)
I	≤ 60	≥ 20
II	61 a 65	≥ 25
III	66 a 70	≥ 30

Fonte: adaptado da Tabela 20 da ABNT NBR 15575-4:2021.

4.2 Desempenho de isolamento antes e depois das intervenções

A Tabela 6.1 sintetiza os valores de $D_{2m,nT,w}$ obtidos nas duas residências antes e após as intervenções, com os respectivos ganhos e o enquadramento normativo. Nas condições anteriores, ambas as residências apresentaram $D_{2m,nT,w}$ igual a 6 dB, valor expressivamente inferior ao mínimo de 20 dB exigido para a Classe de Ruído I, o que fundamentou tecnicamente a necessidade das intervenções. Após a execução da mitigação, os valores se elevaram para 25 dB na residência a 345 m e para 22 dB na residência a 449 m, ganhos de 19 dB e 16 dB, respectivamente.

Tabela 6.1 – Diferença padronizada de nível ponderada de fachada antes e depois das intervenções de mitigação

Residência	Distância (m)	$D_{2m,nT,w}$ pré (dB)	$D_{2m,nT,w}$ pós (dB)	Ganho (dB)	Enquadramento pós (NBR 15575-4)
R1 (AE-51/25; AE-43/26)	345	6	25	+19	Atende Classe I; alcança Classe II
R2 (AE-53/25; AE-44/26)	449	6	22	+16	Atende Classe I

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos relatórios técnicos AE-51/25, AE-53/25, AE-43/26 e AE-44/26 (Oppus Acústica).

4.3 Caracterização espectral do isolamento

A Tabela 6.2 apresenta a diferença padronizada de nível por bandas de um terço de oitava, de 50 Hz a 5 kHz, para as duas residências, nas condições anterior e posterior à intervenção. Observa-se ganho consistente em todo o espectro avaliado, com incremento particularmente acentuado nas frequências médias e altas, faixa em que a manta de poliéster e a estanqueidade das esquadrias atuam de forma mais eficiente. Nas bandas mais baixas, em torno de 50 Hz a 80 Hz, o ganho também é

expressivo, embora os valores absolutos de isolamento permaneçam comparativamente menores, comportamento esperado para o isolamento de fachada nessa faixa de frequência (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; ZAJAMŠEK et al., 2016).

Tabela 6.2 – Diferença padronizada de nível por bandas de um terço de oitava (dB), antes e depois das intervenções

Frequência (Hz)	R1 (345 m) pré	R1 (345 m) pós	R2 (449 m) pré	R2 (449 m) pós
50	9,7	20,4	10,0	20,8
63	7,6	21,3	4,9	17,5
80	13,1	31,1	8,3	28,6
100	10,3	32,1	9,3	25,0
125	7,6	26,3	5,3	26,3
160	5,5	26,9	6,8	23,6
200	1,0	24,9	3,8	25,9
250	-0,4	25,6	0,7	26,2
315	2,0	23,9	0,8	24,2
400	4,0	27,1	3,0	21,0
500	5,5	26,6	4,7	23,8
630	4,6	27,8	6,0	24,9
800	5,7	28,8	7,0	24,9
1k	6,8	27,3	7,4	23,2
1,25k	6,5	25,8	9,5	23,6
1,6k	5,8	24,6	6,9	23,9
2k	5,5	22,7	7,5	21,3
2,5k	5,2	22,1	6,1	18,6
3,15k	5,3	23,5	7,0	14,9
4k	7,2	17,5	6,8	14,1

5k	2,3	22,7	5,4	22,1
----	-----	------	-----	------

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos relatórios técnicos AE-51/25, AE-53/25, AE-43/26 e AE-44/26 (Oppus Acústica). R1: residência a 345 m; R2: residência a 449 m.

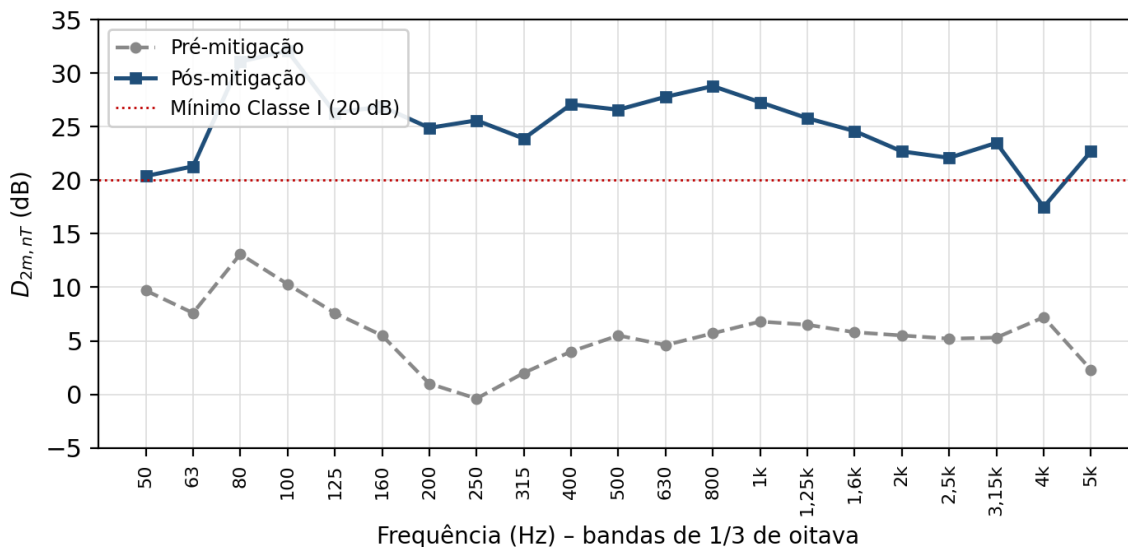


Figura 6.1 – Diferença padronizada de nível por banda de um terço de oitava na residência R1 (345 m), antes e depois da intervenção

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos relatórios técnicos AE-51/25 e AE-43/26 (Oppus Acústica). A linha pontilhada indica o desempenho mínimo de 20 dB da Classe de Ruído I (ABNT NBR 15575-4:2021).

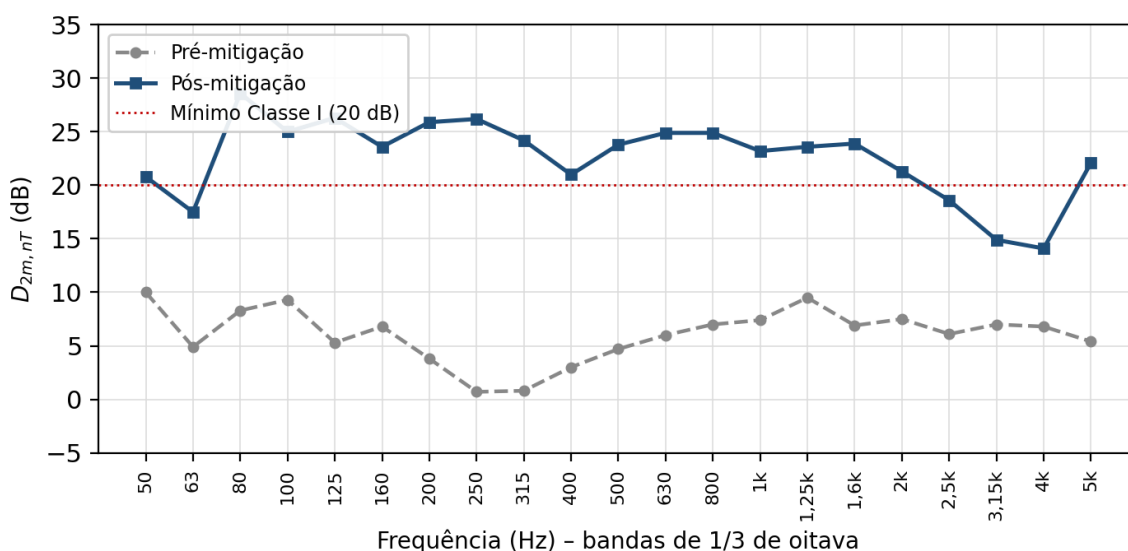


Figura 6.2 – Diferença padronizada de nível por banda de um terço de oitava na residência R2 (449 m), antes e depois da intervenção

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos relatórios técnicos AE-53/25 e AE-44/26 (Oppus Acústica). A linha pontilhada indica o desempenho mínimo de 20 dB da Classe de Ruído I (ABNT NBR 15575-4:2021).

A comparação das curvas anterior e posterior à intervenção (Figuras 6.1 e 6.2) evidencia que, na condição pré-mitigação, ambas as residências apresentavam isolamento reduzido em todo o espectro, com valores predominantemente entre 0 dB e 13 dB e mínimos pronunciados na faixa de 200 Hz a 315 Hz, na qual a residência R1 chega a registrar valor levemente negativo a 250 Hz. Esse comportamento é compatível com edificações de baixo desempenho acústico, nas quais a vedação externa atenua de forma muito limitada o ruído incidente. Após a intervenção, as curvas elevam-se de maneira consistente e ultrapassam o patamar de 20 dB da Classe de Ruído I na quase totalidade das bandas, com pico de isolamento na faixa de 80 Hz a 100 Hz na residência R1, acima de 30 dB, e um platô da ordem de 22 dB a 28 dB ao longo do espectro médio.

Observam-se reduções localizadas do isolamento nas bandas mais altas após a intervenção, notadamente em 4 kHz na residência R1 e entre 3,15 kHz e 4 kHz na residência R2, faixas nas quais as curvas posteriores recuam em relação às bandas vizinhas. Tais quedas pontuais, embora reduzam o ganho nessas frequências específicas, não comprometem o desempenho global, uma vez que o ruído de aerogeradores concentra sua energia nas faixas baixa e média do espectro, justamente onde o ganho foi mais expressivo (ZAJAMŠEK et al., 2016; HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015).

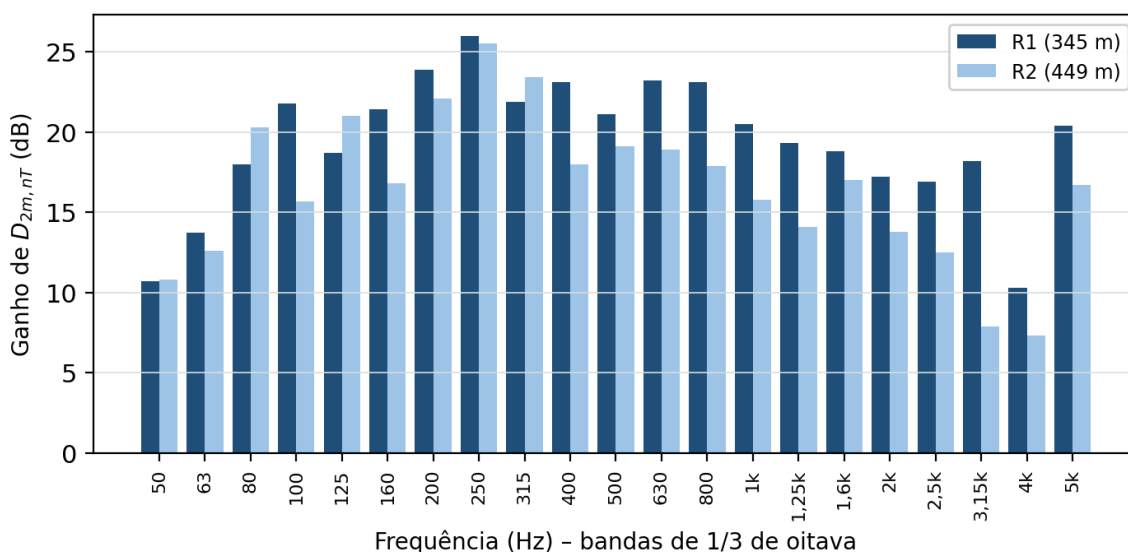


Figura 6.3 – Ganho de isolamento de fachada por banda de um terço de oitava nas residências R1 e R2

Fonte: elaborado pelo autor. Ganho calculado, por banda, como a diferença entre os valores posterior e anterior à intervenção, a partir dos relatórios AE-51/25, AE-53/25, AE-43/26 e AE-44/26 (Oppus Acústica).

A Figura 6.3 sintetiza o ganho de isolamento por banda, calculado como a diferença entre os valores posterior e anterior à intervenção. Os ganhos são expressivos em praticamente todo o espectro, variando de cerca de 10 dB a 26 dB na residência R1 e de cerca de 7 dB a 26 dB na residência R2, com os maiores incrementos concentrados na faixa de 200 Hz a 800 Hz. Esse padrão é coerente com a natureza da intervenção: o forro com manta de poliéster e a vedação acústica das esquadrias atuam de forma mais eficiente nas frequências médias, ao passo que o ganho nas bandas mais baixas, embora relevante, é limitado pela maior dificuldade intrínseca de isolamento nessa faixa (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019).

Cabe destacar que a diferença padronizada de nível constitui propriedade do desempenho da fachada, normalizada em relação às condições do recinto receptor, e, portanto, não depende diretamente da distância entre a residência e o aerogerador, fator que condiciona o nível incidente, e não a capacidade de isolamento. Nesse sentido, o fato de as duas residências, situadas a 345 m e a 449 m, alcançarem desempenhos posteriores próximos, de 25 dB e 22 dB, reflete a consistência da solução construtiva adotada, e não um efeito da distância. A pequena vantagem da residência R1 decorre de seu maior ganho acumulado nas bandas médias, suficiente para alcançar o patamar da Classe II.

4.4 Resposta perceptiva posterior às intervenções

A avaliação perceptiva posterior às intervenções, aplicada nos mesmos domicílios, mostrou-se coerente com os ganhos objetivos de isolamento. Na residência a 345 m, as duas moradoras relataram incômodo geral igual a 0 na escala de 0 a 10, avaliando o ambiente sonoro como agradável e muito agradável, com registro espontâneo de que, após a reforma de mitigação, não percebiam mais os ruídos externos. Na residência a 449 m, o incômodo geral relatado foi 3, contra 10 na avaliação anterior à intervenção, com a avaliação do ambiente sonoro evoluindo de desagradável para agradável. Embora o número reduzido de domicílios não autorize

inferência estatística, a convergência entre o ganho de isolamento medido e a melhora da percepção relatada reforça, de forma descritiva, a efetividade das intervenções.

5 DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que a solução construtiva adotada promoveu ganhos expressivos de isolamento de fachada, elevando a diferença padronizada de nível ponderada de 6 dB, nas duas residências, para 22 dB e 25 dB após a intervenção. Esses ganhos, de 16 dB e 19 dB, conduziram ambas as residências a patamares superiores ao mínimo de 20 dB estabelecido pela ABNT NBR 15575-4:2021 para a Classe de Ruído I, com a residência a 345 m alcançando o nível de desempenho da Classe II. A magnitude dos ganhos é compatível com o esperado para sistemas multicamadas que associam forro com manta absorvente de poliéster e aprimoramento da estanqueidade das esquadrias, soluções reconhecidas na literatura como eficazes para a redução da transmissão do ruído de aerogeradores em residências rurais (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

No que se refere ao conforto térmico, aspecto relevante no clima quente do semiárido, a intervenção não foi acompanhada de medições de temperatura no interior das residências, o que impede conclusões quantitativas. Do ponto de vista construtivo, contudo, o forro de gesso com duas mantas de lã de PET de 50 mm adiciona resistência térmica à cobertura, principal via de ganho de calor nessa tipologia, o que tende a favorecer o desempenho térmico das habitações; em contrapartida, a melhoria da vedação das esquadrias reduz a ventilação natural, aspecto que deve ser gerenciado pelos moradores por meio da operação de portas e janelas. Recomenda-se que estudos futuros incluam a avaliação do desempenho térmico das intervenções, conforme os critérios da ABNT NBR 15575, de modo a caracterizar os cobenefícios ou eventuais conflitos entre o condicionamento acústico e o térmico.

A análise espectral indica que o desempenho da intervenção se distribui por todo o espectro avaliado, com ganhos mais acentuados nas frequências médias e altas e ganhos relativamente menores, em termos absolutos, nas bandas mais baixas. Esse comportamento é coerente com a física do isolamento de fachada, no qual o controle das baixas frequências é intrinsecamente mais difícil, e reforça a importância de associar o tratamento da cobertura ao das aberturas, dado que a estanqueidade

ao ar é determinante para o desempenho nas frequências médias e altas (ZAJAMŠEK et al., 2016; HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015).

A convergência entre os ganhos objetivos de isolamento e a melhora da resposta perceptiva relatada pelos moradores é o achado de maior relevância prática deste capítulo. A redução do incômodo relatado, acompanhada da evolução positiva na avaliação do ambiente sonoro, sugere que a intervenção atuou de forma efetiva sobre a experiência sonora das famílias, e não apenas sobre um indicador técnico. Esse resultado dialoga com o entendimento de que o incômodo é fenômeno multifatorial e de que intervenções tecnicamente bem fundamentadas, quando associadas a processos socialmente adequados, podem produzir reduções perceptíveis de incômodo (GUSKI, 1999; BOTELHO et al., 2017; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Algumas limitações devem ser explicitadas. O número de residências avaliadas é reduzido, o que restringe a análise ao plano descritivo e impede generalizações estatísticas. A avaliação foi conduzida com adaptação de campo, utilizando o próprio ruído dos aerogeradores como fonte sonora, em vez de fonte sonora padronizada, opção que aumenta a validade ecológica, por reproduzir a fonte de interesse, mas que difere do procedimento de laboratório e introduz dependência das condições operacionais e atmosféricas vigentes durante os ensaios. Além disso, a ABNT NBR 15575-4:2021 foi concebida para edificações novas, de modo que sua adoção aqui cumpre função de referência de desempenho, sem pretensão de certificação formal das residências existentes (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015). Por fim, a avaliação restringiu-se ao dormitório, recinto de maior criticidade no período noturno, não abrangendo os demais ambientes das edificações.

Apesar dessas limitações, os resultados sustentam que intervenções construtivas de baixa complexidade, compatíveis com a tipologia local e com o vínculo afetivo dos moradores com suas residências, constituem alternativa tecnicamente eficaz e socialmente adequada à realocação, especialmente em contextos rurais do semiárido nos quais a permanência das famílias no território é desejável. Tais achados fornecem subsídios concretos para a estruturação de programas de mitigação acústica residencial no âmbito da gestão socioambiental de complexos eólicos (BOTELHO et al., 2017; DAVY et al., 2020; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

Lida sob essas três dimensões, a intervenção avaliada ilustra de forma concreta o caráter integrado da mitigação como instrumento de gestão do ruído. No plano técnico, o ganho de isolamento de fachada, de 16 dB e 19 dB, elevou ambas as residências a patamares superiores ao mínimo normativo. No plano social, esse ganho traduziu-se em redução do incômodo relatado e em avaliação mais favorável do ambiente sonoro, preservando a permanência das famílias em suas residências, com as quais mantêm vínculo afetivo, e evitando a ruptura territorial associada à realocação. No plano estratégico, a intervenção materializa uma resposta tangível às preocupações das comunidades, com potencial de prevenção de conflitos e de fortalecimento da relação entre empreendimento e moradores, dimensão especialmente relevante em territórios do semiárido nordestino marcados por assimetrias socioeconômicas e por histórico de tensões socioambientais (BOTELHO et al., 2017; CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; SANTANA; SILVA, 2021). Dessa forma, a mitigação acústica residencial qualifica-se não apenas como solução de engenharia, mas como componente da governança socioambiental dos complexos eólicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo avaliou o desempenho de intervenções de isolamento acústico de fachada em duas residências do entorno de um complexo eólico no semiárido pernambucano, sob delineamento antes e depois. As intervenções, baseadas em forro com manta de poliéster e em esquadrias com vedação acústica, elevaram a diferença padronizada de nível ponderada de 6 dB para 22 dB e 25 dB, ganhos de 16 dB e 19 dB, conduzindo ambas as residências a patamares superiores ao mínimo normativo da Classe de Ruído I. A melhora dos indicadores objetivos foi acompanhada de redução do incômodo relatado e de avaliação mais favorável do ambiente sonoro pelos moradores.

Os resultados indicam que a mitigação acústica construtiva, quando tecnicamente fundamentada e socialmente contextualizada, representa medida eficaz e proporcional, de natureza simultaneamente técnica, social e estratégica, para a gestão do ruído em comunidades do entorno de parques eólicos, oferecendo alternativa concreta à realocação. Recomenda-se, em estudos futuros, a ampliação do número de residências avaliadas, a inclusão de grupo controle e o

acompanhamento perceptivo de médio e longo prazo, de modo a consolidar a base de evidências sobre a efetividade dessas intervenções.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15575-4: edificações habitacionais – desempenho – parte 4: sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR ISO 15666: acústica – avaliação do incômodo causado por ruído por meio de pesquisas sociais e socioacústicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR ISO 16283-3: acústica – medição de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações – parte 3: isolamento de fachada a ruído aéreo. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR ISO 3382-2: acústica – medição de parâmetros de acústica de salas – parte 2: tempo de reverberação em salas comuns. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR ISO 717-1: acústica – avaliação do isolamento acústico em edifícios e de elementos de construção – parte 1: isolamento a ruído aéreo. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BERTAGNOLIO, F.; HERR, M.; MADSEN, K. D. A roadmap for required technological advancements to further reduce onshore wind turbine noise impact on the environment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 12, n. 3, 2023. DOI: 10.1002/wene.469.

BOTELHO, A.; AREZES, P.; BERNARDO, C.; DIAS, H.; COSTA PINTO, L. M. Effect of wind farm noise on local residents' decision to adopt mitigation measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 14, n. 7, 2017. DOI: 10.3390/ijerph14070753.

CHAVES, L. O.; BRANNSTROM, C.; SILVA, E. V. Energia eólica e a criação de conflitos: ocupação dos espaços de lazer em uma comunidade no Nordeste do Brasil. *Sociedade e Território*, Natal, v. 29, n. 2, p. 49–69, 2017.

DAVY, J. L.; BURGEMEISTER, K.; HILLMAN, D.; CARLILE, S. A review of the potential impacts of wind turbine noise in the Australian context. *Acoustics Australia*, v. 48, n. 2, p. 181–197, 2020. DOI: 10.1007/s40857-020-00192-4.

DESHMUKH, S.; BHATTACHARYA, S.; JAIN, A.; PAUL, A. R. Wind turbine noise and its mitigation techniques: a review. *Energy Procedia*, v. 160, p. 633–640, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.215.

FEDER, K.; MICHAUD, D. S.; KEITH, S. E.; VOICESCU, S. A.; MARRO, L.; THAN, J.; GUAY, M.; DENNING, A.; BOWER, T. J.; LAVIGNE, E.; WHELAN, C.; VAN DEN BERG, F. An assessment of quality of life using the WHOQOL-BREF among participants living in the vicinity of wind turbines. *Environmental Research*, v. 142, p. 227–238, 2015. DOI: 10.1016/j.envres.2015.06.043.

GUSKI, R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, v. 1, n. 4, p. 45–56, 1999.

HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. Wind farm noise: measurement, assessment and control. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

HANSEN, K. L.; HANSEN, C. H.; ZAJAMŠEK, B. Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences. *Building and Environment*, v. 94, p. 764–772, 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12999-1: acoustics – determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – part 1: sound insulation. Geneva: ISO, 2014.

KARASMANAKI, E. Is it safe to live near wind turbines? Reviewing the impacts of wind turbine noise. *Energy for Sustainable Development*, v. 69, p. 87–102, 2022. DOI: 10.1016/j.esd.2022.05.012.

KUWANO, S.; YANO, T.; KAGEYAMA, T.; SUEOKA, S.; TACHIBANA, H. Social survey on community response to wind turbine noise in Japan. *Noise Control Engineering Journal*, v. 62, n. 6, p. 503–520, 2014.

MANOHARE, M.; GUERRERO, S. G.; O'HORA, D.; KING, E. Noise annoyance mapping for wind turbines: a psychoacoustic approach incorporating noise sensitivity. *Applied Acoustics*, v. 248, 2026. DOI: 10.1016/j.apacoust.2026.111280.

MORSING, J. A.; SMITH, M. G.; ÖGREN, M.; THORSSON, P.; PEDERSEN, E.; FORSSÉN, J.; WAYE, K. P. Wind turbine noise and sleep: pilot studies on the influence of noise characteristics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 11, 2018. DOI: 10.3390/ijerph15112573.

MÜLLER, F. J. Y.; LESCHINGER, V.; HÜBNER, G.; POHL, J. Understanding subjective and situational factors of wind turbine noise annoyance. *Energy Policy*, v. 173, 2023. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113361.

PEDERSEN, E.; PERSSON WAYE, K. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 6, p. 3460–3470, 2004. DOI: 10.1121/1.1815091.

SANTANA, M. G.; SILVA, L. P. Conflitos socioambientais e energia eólica no Nordeste brasileiro. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.

ZAJAMŠEK, B.; HANSEN, K. L.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, C. H. Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, v. 370, p. 176–190, 2016. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.02.001.

CAPÍTULO 7

PERCEPÇÃO DE IMPACTO DO RUÍDO EM COMUNIDADES DO ENTORNO DE COMPLEXOS EÓLICOS NO SEMIÁRIDO

RESUMO

O incômodo causado pelo ruído de aerogeradores é um fenômeno multifatorial, no qual a resposta humana depende não apenas do nível de pressão sonora, mas também da sensibilidade individual e de fatores psicossociais, psicoacústicos e contextuais de cada localidade. Este capítulo avalia a percepção de impacto sonoro de moradores do entorno de um complexo eólico no semiárido pernambucano, sob delineamento do tipo antes e depois, comparando duas residências que receberam intervenções com a implementação de tecnologias de mitigação acústica de fachada com duas residências de controle, não mitigadas, situadas a distâncias equivalentes. A coleta empregou a escala numérica e qualitativa da ABNT NBR ISO 15666:2022, aplicada nas campanhas anterior e posterior às intervenções. Entre as residências mitigadas, apenas uma apresentava incômodo elevado antes da intervenção, tendo reduzido o incômodo geral de 10 para 3 e o noturno de 10 para 0; a outra já se encontrava no valor mínimo da escala em ambas as campanhas, entretanto na pesquisa qualitativa apresentou incômodo antes e redução após a implementação das tecnologias de mitigação. Nas residências de controle, o incômodo permaneceu estável entre as campanhas, situando-se entre 6 e 8, com persistência de incômodo noturno máximo e de perturbação do sono no ponto de maior exposição e de maior sensibilidade individual. A estabilidade do grupo de controle torna a intervenção a explicação para a redução observada, embora o número reduzido de domicílios restrinja a análise ao plano descritivo. A redução do incômodo noturno mostrou-se coerente com o ganho de isolamento de fachada de 16 dB medido para a mesma residência no capítulo de mitigação, o que articula a resposta perceptiva ao desempenho acústico mensurado.

Palavras-chave: Percepção de ruído; incômodo sonoro; ABNT NBR ISO 15666; sensibilidade ao ruído; energia eólica; semiárido.

1 INTRODUÇÃO

A operação de parques eólicos em áreas rurais habitadas introduz um agente sonoro contínuo em paisagens de baixa ambiência acústica, nas quais o contraste entre o som residual e o som dos aerogeradores tende a amplificar a percepção de incômodo, ainda que os níveis medidos permaneçam dentro dos limites normativos (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; KUWANO et al., 2014).

A resposta ao ruído não é determinada apenas pela exposição acústica, a conformidade com limites de nível normativo não assegura, por si só, a ausência de percepção de incômodo, e aplicação de um conjunto de medidas de mitigação sobre o receptor podem produzir ganhos perceptivos relevantes (GUSKI, 1999; BOTELHO et al., 2017).

Avaliar a percepção de impacto antes e depois de uma intervenção exige, contudo, um grupo de comparação não submetido a essa intervenção. Sem ele, variações temporais, ambientais e operacionais decorrentes de mudanças sazonais na operação do parque ou de oscilações sociais dos respondentes poderiam ser indevidamente atribuídas à medida de mitigação (FIELDS, 1998). O presente estudo adota, por isso, um delineamento controlado do tipo antes e depois, com residências mitigadas e residências de controle situadas a distâncias equivalentes.

O objetivo deste capítulo é avaliar a percepção de impacto sonoro de moradores do entorno de um complexo eólico no semiárido pernambucano e verificar se intervenções de mitigação acústica de fachada se associam à redução do incômodo relatado.

A Figura 7.1 sintetiza o modelo conceitual que orienta o estudo. O ruído externo incidente na fachada da residência, mediado pelo modelo construtivo da residência, determina o ruído interno. Esse nível interno, em interação com a sensibilidade individual e com fatores não acústicos e psicossociais, pode conduzir à percepção do ruído e ao incômodo, que se desdobram em desfechos de saúde, como a perturbação do sono e a qualidade de vida. A mitigação acústica nas residências atua precisamente sobre a transmissão do ruído para o interior, sendo esse o ponto de maior percepção de impacto em operações de complexos eólicos.

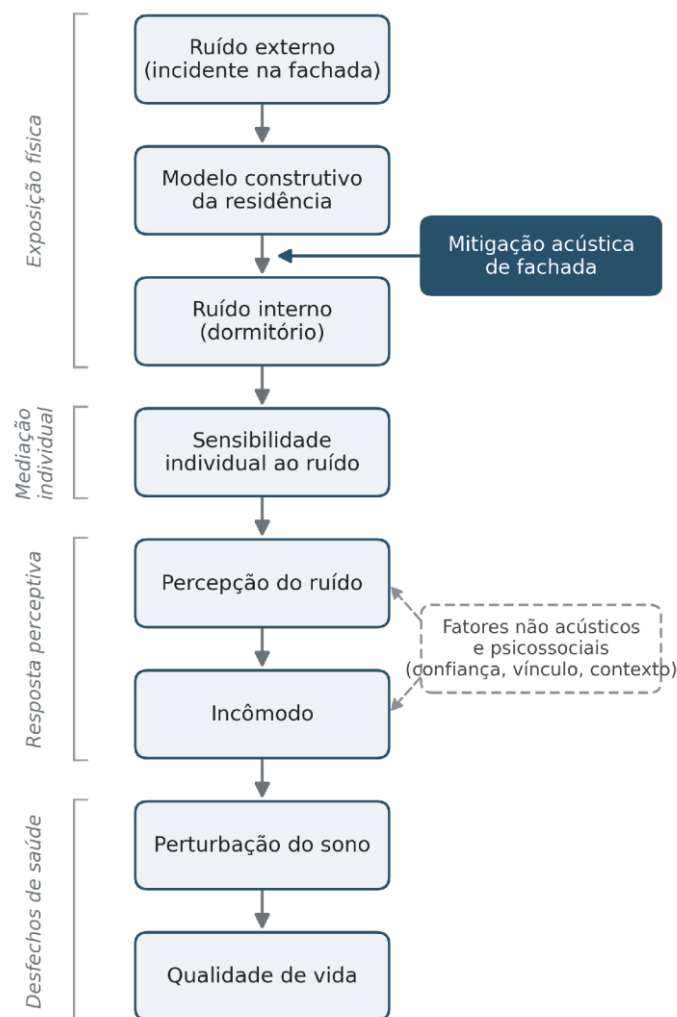


Figura 7.1 – Modelo conceitual da percepção de impacto do ruído de aerogeradores adotado no estudo

Fonte: elaborado pelo autor com base em Guski (1999), Pedersen e Persson Waye (2004) e Manohare et al. (2026). As setas tracejadas indicam a ação moderadora dos fatores não acústicos e psicossociais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O incômodo sonoro como fenômeno multifatorial

Guski (1999) define o incômodo sonoro como uma avaliação negativa de longo prazo das condições de vida em relação ao ambiente acústico, construída a partir de atitudes, expectativas e interpretações, e não de episódios isolados de perturbação. A resposta ao ruído depende, assim, de fatores como sensibilidade individual, estado de saúde, condições sociais e histórico de relacionamento com o empreendimento,

além do nível sonoro propriamente dito. Estudos de campo demonstram que atitudes em relação aos parques eólicos, benefícios percebidos e percepção de equidade no processo de planejamento podem influenciar o incômodo de modo tão ou mais determinante do que o próprio nível de pressão sonora, pois influencia na resposta psicoacústica no organismo (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MÜLLER et al., 2023).

Essas características psicoacústicas são tratadas em detalhe nos capítulos de caracterização do ruído e de infrassom desta dissertação; aqui, interessa o seu desdobramento sobre a resposta perceptiva, captada diretamente junto aos moradores.

2.2 Sensibilidade individual ao ruído

A sensibilidade individual ao ruído é um dos preditores mais consistentemente associados ao incômodo, com correlação robusta independentemente do nível sonoro objetivo (GUSKI, 1999; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2018; MANOHARE et al., 2026). Manohare et al. (2026), em estudo conduzido na Irlanda com quarenta e seis participantes e dados de quatorze pontos de monitoramento ao redor de parques eólicos, integraram indicadores psicoacústicos, incluindo medidas de *loudness*, a níveis de sensibilidade individual. Os autores observaram que indivíduos de baixa sensibilidade apresentaram baixa probabilidade de incômodo já a partir de algumas centenas de metros, enquanto indivíduos de alta sensibilidade mantiveram probabilidades elevadas mesmo a distâncias superiores. Esse resultado indica que dois moradores expostos a um mesmo nível de pressão sonora podem responder de modo bastante distinto e que a definição de distâncias mínimas, como raios fixos, sem avaliação ampla multifatorial, é insuficiente como critério único de avaliação ou de mitigação de impactos.

2.3 O modelo conceitual de Guski

A relação entre a exposição ao ruído e o incômodo é descrita pelo modelo conceitual de Guski (1999), que articula um agente ambiental, neste estudo os aerogeradores em operação, uma carga ambiental, expressa pela exposição acústica mensurável, variáveis moderadoras de natureza individual e psicossocial, como a sensibilidade ao ruído e a confiança nas instituições, e variáveis mediadoras, como a interferência no repouso e na comunicação. O efeito psicológico resultante, o

incômodo, emerge da interação entre esses elementos, e não de uma relação direta com o nível de exposição ao ruído (GUSKI, 1999; GUSKI; FELSCHER-SUHR; HAGEN, 1999).

Esse modelo orienta o delineamento adotado. A mitigação de ruído nas residências atua sobre a carga ambiental, reduzindo o nível sonoro no interior da residência, enquanto o grupo de controle mantém aproximadamente constantes as variáveis moderadoras e mediadoras entre as campanhas. A comparação entre os grupos permite, assim, isolar o efeito da redução de carga sobre o incômodo. Guski (1999) ressalta, ainda, que reduções em moderadores negativos, como o fortalecimento da confiança através de iniciativas de relacionamento social e o acesso à informação, podem ser tão eficazes quanto reduções equivalentes de ruído, o que recomenda abordagens integradas.

2.4 Fatores não acústicos e contexto rural do semiárido

A percepção do ruído é condicionada por fatores que extrapolam o nível medido, como a expectativa em relação ao empreendimento, a confiança nas empresas e o histórico de relacionamento socioambiental (KUWANO et al., 2014; PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA et al., 2014; ALAMIR et al., 2019). Em áreas rurais, nas quais o silêncio predomina durante grande parte do dia e, sobretudo, à noite, o contraste entre a paisagem sonora preexistente e o ruído dos aerogeradores amplifica a percepção de incômodo (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; KUWANO et al., 2014). No semiárido nordestino, esse quadro é acentuado por vulnerabilidades socioeconômicas e por fortes vínculos das populações com o território, e estudos brasileiros relatam que comunidades frequentemente não foram consultadas adequadamente antes da instalação dos parques, o que aprofunda a desconfiança e amplifica a percepção negativa dos impactos (CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; SANTANA; SILVA, 2021).

2.5 Modelo construtivo rural e transmissão do ruído ao interior

A percepção do ruído no interior das residências depende não apenas do nível externo, mas também da capacidade de atenuação da envoltória construtiva. Edificações rurais do semiárido caracterizam-se, com frequência, por baixo desempenho acústico, com coberturas de telha apoiadas diretamente sobre a estrutura, telhas artesanais com muitas frestas, ausência de laje e de forro e

esquadrias de madeira sem vedação, condições que reduzem a atenuação do ruído externo e ampliam a exposição efetiva nos ambientes internos, sobretudo nas frequências médias e baixas (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019). Em residências sem laje, a cobertura constitui o principal caminho de transmissão do ruído aéreo para o interior, ao passo que a presença de laje e forro acústico e a vedação das aberturas reduzem o nível interno. O modelo construtivo é, portanto, um fator físico-contextual relevante para a percepção de impacto, pois modula a relação entre o ruído incidente na residência e aquele efetivamente percebido no interior.

2.6 O instrumento ABNT NBR ISO 15666

A avaliação do incômodo por pesquisas socioacústicas é normalizada pela ABNT NBR ISO 15666:2022, que padroniza a pergunta-chave de incômodo e as escalas de resposta para assegurar comparabilidade entre estudos. Neste capítulo, adotou-se a escala numérica de dez pontos, de 0 a 10, na qual 0 corresponde a nada incomodado e 10 a extremamente incomodado. A pergunta-chave de incômodo geral foi formulada nos seguintes termos: pensando nos últimos doze meses, quando o morador está em casa, o quanto o ruído do complexo eólico o incomodou, de modo geral. O instrumento contempla, ainda, itens de incômodo por período do dia, efeitos associados percebidos, sensibilidade individual e avaliação global do ambiente sonoro, além da relação com a localidade, empreendimento eólico e modelo construtivo da residência.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo, amostra e delineamento

O estudo foi conduzido no entorno de um complexo eólico no semiárido de Pernambuco, no bioma Caatinga, em residências rurais de caráter permanente situadas no raio de maior proximidade dos aerogeradores. Adotou-se delineamento experimental controlado do tipo antes e depois. O grupo de intervenção é composto pelas duas residências que receberam mitigação acústica de fachada no complexo, localizadas a 345 m e a 449 m do aerogerador mais próximo, de modo que se trata de um censo das residências mitigadas, e não de uma amostra probabilística. O grupo de controle é formado por duas residências não mitigadas, situadas a 448 m e a 470

m, selecionadas por proximidade e conveniência entre os receptores de distância equivalente.

O grupo de controle não foi pareado às residências de intervenção quanto ao incômodo inicial ou às características construtivas, e sua função é servir de referência para a estabilidade temporal das respostas na ausência de intervenção. A coleta perceptiva ocorreu em duas campanhas, anterior e posterior às intervenções, com aplicação do mesmo instrumento aos moradores dos dois grupos. As residências e os respondentes são identificados por rótulos anônimos, preservando o sigilo das informações pessoais.

3.2 Instrumento e variáveis

O instrumento foi um questionário estruturado fundamentado na ABNT NBR ISO 15666:2022, organizado em seções de identificação geral, exposição ao ruído, incômodo geral, incômodo por período do dia, efeitos associados, sensibilidade individual e avaliação do ambiente sonoro. A variável central é o incômodo geral, medido na escala numérica de 0 a 10 descrita na seção 2.6. São também analisados o incômodo nos períodos diurno e noturno, na mesma escala, os efeitos associados percebidos, como a perturbação do sono, a sensibilidade individual ao ruído, classificada em baixa, moderada ou alta, e a avaliação do ambiente sonoro, registrada de muito agradável a muito desagradável. Como a apreensão da escala numérica nem sempre é uniforme entre respondentes, em especial em populações com baixa escolaridade, adotou-se também uma avaliação qualitativa da percepção, composta pela frequência com que o ruído é percebido, de nunca a sempre, e pelo período predominante de percepção, que funcionam como medidas complementares ao incômodo numérico. Por fim, registraram-se as características construtivas de cada residência, com destaque para a cobertura, a presença e o tipo de forro e as esquadrias, de modo a relacionar o modelo construtivo à percepção de impacto.

3.3 Análise dos dados

Dado o número reduzido de domicílios, a análise é descritiva, sem inferência estatística. A interpretação apoia-se na comparação dos valores entre as campanhas anterior e posterior e entre os grupos de intervenção e de controle. O grupo de controle funciona como referência da estabilidade temporal das respostas, de modo que a divergência de comportamento entre os grupos constitui o principal elemento de

interpretação. Reconhece-se, desde já, que uma das residências de intervenção apresentava incômodo numérico nulo antes da intervenção, apresentando incômodo somente no qualitativo, configurando efeito de piso, e que, por isso, a evidência de redução antes e depois concentra-se na residência que partia de incômodo elevado.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização da amostra

O Quadro 7.1 apresenta as residências que compõem o desenho controlado antes e depois, com a distância ao aerogerador mais próximo, o grupo a que pertencem e o número de respondentes em cada campanha.

Quadro 7.1 – Residências e delineamento da avaliação antes e depois

Residência	Distância (m)	Grupo	Respondentes (pré / pós)
R1	345	Intervenção (mitigada)	2 / 2
R2	449	Intervenção (mitigada)	1 / 1
C1	448	Controle (não mitigada)	2 / 2
C2	470	Controle (não mitigada)	2 / 1

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos questionários ABNT NBR ISO 15666:2022. R1 e R2: residências mitigadas; C1 e C2: residências de controle.

4.2 Incômodo relatado antes e depois

Entre as residências mitigadas, apenas a residência R2 apresentava incômodo elevado antes da intervenção, com nota 10 no incômodo geral e no incômodo noturno. Após a mitigação, esses valores reduziram-se para 3 e 0, respectivamente, e a avaliação do ambiente sonoro passou de desagradável para agradável. A residência R1 já se encontrava no valor mínimo da escala antes da intervenção, com incômodo geral e noturno iguais a 0, condição que permaneceu inalterada e que, por configurar efeito de piso, não permite evidenciar redução. As residências de controle, não submetidas a qualquer intervenção, mantiveram o incômodo geral estável entre as campanhas, em torno de 6 na residência C1 e de 8 na residência C2, esta última com incômodo noturno máximo nas duas campanhas. O Quadro 7.2 e a Figura 7.2 sintetizam esses resultados.

Quadro 7.2 – Incômodo geral e noturno, avaliação do ambiente sonoro e sensibilidade, antes e depois, por residência

Residência	Grupo	Incômodo geral (antes / depois)	Incômodo noturno (antes / depois)	Ambiente sonoro (antes / depois)	Sensibilidade
R1	Intervenção	0 / 0	0 / 0	Agradável / Agradável	Baixa
R2	Intervenção	10 / 3	10 / 0	Desagradável / Agradável	Moderada
C1	Controle	6 / 6	6 / 7	Neutro / Agradável	Moderada
C2	Controle	8 / 8	10 / 10	Neutro / Agradável	Alta

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos questionários ABNT NBR ISO 15666:2022. Escala de incômodo de 0 (nada incomodado) a 10 (extremamente incomodado). Nas residências com dois respondentes, os valores apresentados foram concordantes; quando a avaliação do ambiente divergiu entre respondentes, indica-se a predominante.

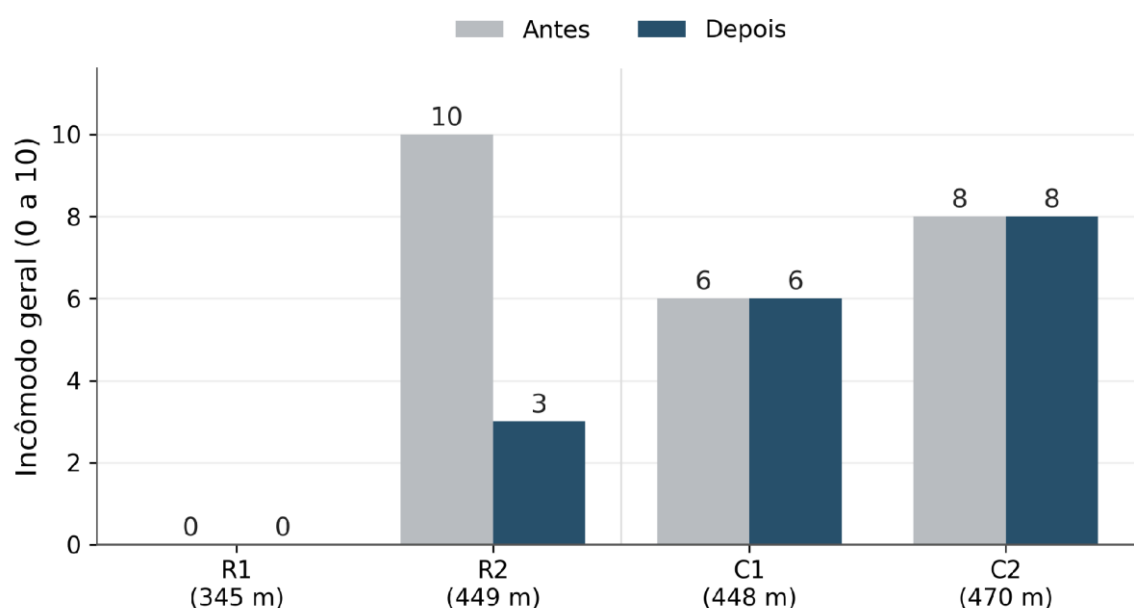


Figura 7.2 – Incômodo geral relatado antes e depois das intervenções, por residência

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos questionários ABNT NBR ISO 15666:2022. R1 e R2: residências mitigadas (à esquerda da linha tracejada); C1 e C2: residências de controle, não mitigadas (à direita). O n de respondentes é indicado sob cada residência.

O contraste entre os grupos é o achado central. A única residência mitigada que partia de incômodo elevado apresentou forte redução, ao passo que as residências de controle, situadas na mesma faixa de distância, mantiveram o incômodo praticamente inalterado. Esse padrão é consistente com a hipótese de que a redução decorre da intervenção, e não da simples passagem do tempo, hipótese examinada criticamente na Discussão.

4.3 Frequência e período de percepção: avaliação qualitativa

A escala numérica de incômodo nem sempre é apreendida de modo uniforme pelos respondentes, sobretudo em populações rurais com menor familiaridade com escalas de 0 a 10. Por isso, a avaliação qualitativa da percepção, baseada na frequência com que o ruído é percebido e no período predominante, oferece uma medida complementar e, em alguns casos, mais sensível. O Quadro 7.3 e a Figura 7.3 apresentam esses resultados antes e depois das intervenções.

Quadro 7.3 – Frequência e período de percepção do ruído, antes e depois, por residência

Residência	Grupo	Frequência de percepção (antes / depois)	Período predominante (antes / depois)
R1	Intervenção	Sempre; Às vezes / Não percebe; Nunca	Manhã; Madrugada / Não percebe
R2	Intervenção	Sempre / Raramente	Tarde / Não percebe
C1	Controle	Frequentemente / Frequentemente	Noite / Noite
C2	Controle	Sempre / Sempre	Noite / Noite

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos questionários ABNT NBR ISO 15666:2022. A residência R1 possui dois respondentes, cujos valores são apresentados separadamente.

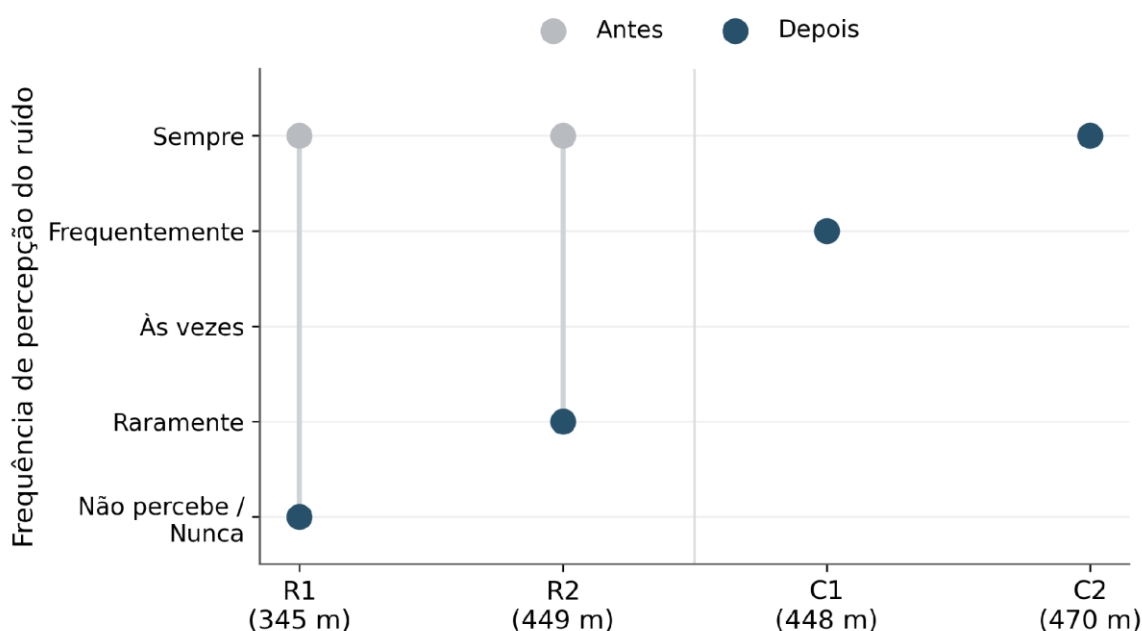


Figura 7.3 – Frequência de percepção do ruído antes e depois das intervenções, por residência

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos questionários ABNT NBR ISO 15666:2022. Nas residências de controle, os pontos antes e depois coincidem, indicando ausência de mudança. Para R1, adotou-se o valor de maior frequência entre os dois respondentes.

O dado qualitativo revela uma mudança que a escala numérica não capta na residência R1. Embora o incômodo geral dessa residência permanecesse em 0 nas duas campanhas, por efeito de piso, a frequência de percepção evoluiu de sempre e às vezes, antes da intervenção, para não percebe e nunca, depois, corroborando o relato espontâneo dos moradores de que deixaram de perceber o ruído externo. Na residência R2, a frequência caiu de sempre para raramente, em consonância com a

redução do incômodo de 10 para 3. Já nas residências de controle, a frequência manteve-se elevada e inalterada, em frequentemente na residência C1 e em sempre na residência C2, sempre no período noturno. A convergência entre as medidas numérica e qualitativa fortalece a leitura dos resultados e demonstra o valor de uma avaliação que não dependa exclusivamente da escala numérica.

Cabe registrar que, embora a avaliação qualitativa tenha revelado mudanças não captadas pela escala numérica, optou-se por manter os dois formatos: a escala numérica de 0 a 10 é o instrumento padronizado pela ABNT NBR ISO 15666:2022 e assegura a comparabilidade com a literatura socioacústica, enquanto a avaliação qualitativa a complementa, captando variações de percepção em situações de efeito de piso, como a observada na residência R1.

4.4 Modelo construtivo das residências e percepção de impacto

As residências avaliadas apresentam tipologia construtiva característica do semiárido, com vedações em alvenaria, coberturas de telha apoiada e, em parte dos casos, ausência de forro e esquadrias de madeira sem vedação. Essas características condicionam a transmissão do ruído externo para o interior e, por consequência, a percepção de impacto. O Quadro 7.4 relaciona o modelo construtivo de cada residência ao incômodo geral relatado.

Quadro 7.4 – Modelo construtivo das residências e incômodo geral relatado

Residência	Grupo	Forro	Esquadrias	Incômodo geral (antes / depois)
R1	Intervenção	Ausente → acústico	Madeira sem vedação → com vedação	0 / 0
R2	Intervenção	Ausente → acústico	Madeira sem vedação → com vedação	10 / 3
C1	Controle	Forro PVC	Madeira e vidro	6 / 6
C2	Controle	Ausente	Madeira sem vedação	8 / 8

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos questionários ABNT NBR ISO 15666:2022 e do capítulo de mitigação acústica residencial. A seta indica a alteração construtiva decorrente da intervenção.

Dois padrões emergem. Entre as residências de controle, não mitigadas, a que dispõe de forro de PVC (C1) relatou incômodo geral 6, inferior ao da residência sem forro (C2), com incômodo 8 e incômodo noturno máximo, o que é coerente com o

papel do forro na redução da transmissão do ruído para o interior, mesmo não sendo um forro específico para atenuação do ruído. Entre as residências de intervenção, ambas partiam sem forro e receberam forro acústico associado a manta absorvente e a esquadrias com vedação, conforme o capítulo de mitigação, apresentando redução da percepção e do incômodo após a obra. Embora o número de domicílios não permita inferência, o conjunto sugere que o modelo construtivo, em especial a presença e o tipo de forro, é um fator relevante na modulação da percepção de impacto sonoro nessas comunidades (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019).

5 DISCUSSÃO

Os resultados confirmam, no plano descritivo, padrões consolidados na literatura. A estabilidade do incômodo nas residências de controle, mantido entre 6 e 8 ao longo de campanhas separadas por meses, é coerente com a persistência do incômodo ao ruído de aerogeradores em ambientes rurais de baixa ambiência relatada por Pedersen e Persson Waye (2004) e por Kuwano et al. (2014), nos quais o contraste com o som residual sustenta a percepção de impacto. A redução observada na residência mitigada R2, por sua vez, alinha-se à evidência de que medidas atuantes sobre o receptor podem reduzir o incômodo (BOTELHO et al., 2017).

A interpretação exige, contudo, confrontar explicações concorrentes. A residência R2 partia do valor máximo da escala, e parte de sua redução poderia, em princípio, refletir regressão à média, fenômeno pelo qual valores extremos tendem a se aproximar do centro em uma segunda medição. Três elementos tornam essa explicação isolada pouco provável. Primeiro, as residências de controle não regrediram, mantendo-se estáveis entre as campanhas. Segundo, a redução concentrou-se no período noturno, no qual o incômodo caiu de 10 para 0, e não se distribuiu de forma difusa, como seria esperado de flutuação aleatória. Terceiro, e de modo decisivo, a redução é coerente com o desempenho acústico medido: para essa mesma residência, o capítulo de mitigação documenta um ganho de isolamento de fachada de 16 dB, atuação física esperada justamente sobre a transmissão noturna do ruído para o dormitório. A convergência entre a queda do incômodo noturno e o ganho de isolamento mensurado fortalece a atribuição causal à intervenção e ilustra

a articulação, prevista no modelo de Guski (1999), entre redução da carga ambiental e redução do efeito psicológico.

O caso da residência de controle C2 é igualmente informativo. A 470 m, com sensibilidade individual alta, o morador manteve incômodo geral 8 e incômodo noturno máximo, com relato de perturbação do sono. Esse perfil é exatamente o previsto por Manohare et al. (2026), para quem indivíduos de alta sensibilidade permanecem suscetíveis a distâncias elevadas, e reforça a sensibilidade como moderadora central da resposta, em linha com Guski (1999) e Pawlaczyk-Łuszczynska et al. (2018). A persistência de incômodo noturno máximo e de perturbação do sono enquadra-se, ademais, nas preocupações das diretrizes de ruído noturno da Organização Mundial da Saúde, que tratam a perturbação do sono como desfecho de saúde, e não como mero desconforto (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). O relato, na residência de controle C1, de que o ruído incomoda mais à noite, mas que a pessoa se acostuma com o tempo, evidencia processos de habituação que coexistem com o incômodo persistente, sem eliminá-lo, o que recomenda cautela ao interpretar a estabilidade do controle como ausência de impacto.

A leitura conjunta das medidas numérica e qualitativa convida a uma interpretação psicoacústica e psicossocial. Do ponto de vista psicoacústico, o ruído de aerogeradores é marcado pela modulação de amplitude e por componentes de baixa frequência, atributos que conferem ao som caráter nem sempre capturado pelo nível de pressão sonora equivalente ponderado em A (FIELDS, 1998; PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004). A frequência de percepção, medida de modo qualitativo, funciona como indicador dessa detectabilidade e, por isso, revelou mudança na residência R1 mesmo quando o incômodo numérico, já no piso, nada indicava. Essa sensibilidade da medida qualitativa dialoga com a abordagem de Manohare et al. (2026), que integra indicadores psicoacústicos, incluindo a loudness, à sensibilidade individual. Do ponto de vista psicossocial, a própria compreensão da escala numérica é mediada por fatores socioculturais, e a convergência com a medida qualitativa aumenta a validade da avaliação em populações rurais, ao mesmo tempo em que reforça o papel de moderadores como a confiança no empreendimento e o vínculo com o território na construção do incômodo (GUSKI, 1999; KUWANO et al., 2014; CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017).

O modelo construtivo das residências do semiárido emerge como fator contribuinte adicional. A menor atenuação proporcionada por coberturas sem forro e por esquadrias sem vedação eleva o nível de ruído no interior dos dormitórios, ambiente crítico no período noturno, o que é coerente com o maior incômodo observado na residência de controle sem forro (C2) em relação à que dispõe de forro de PVC (C1), e com a redução da percepção nas residências de intervenção após a instalação de forro acústico (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019). Esse achado articula o presente capítulo ao de mitigação acústica residencial, no qual o ganho de isolamento de fachada das residências de intervenção foi quantificado, e reforça que a percepção de impacto não depende apenas da distância ou do nível de ruído externo, mas também das condições construtivas que medeiam a exposição efetiva no interior das residências.

A convergência entre as evidências perceptivas, construtivas e acústicas configura uma triangulação metodológica que fortalece a interpretação causal dos resultados. O Quadro 7.5 sintetiza os principais achados e o seu diálogo com a literatura.

Quadro 7.5 – Síntese dos achados e diálogo com a literatura

Evidência	Resultado	Referência principal
Mitigação de fachada	Redução do incômodo na residência tratada	BOTELHO et al. (2017)
Grupo de controle	Estabilidade do incômodo sem intervenção	FIELDS (1998)
Sensibilidade individual	Forte influência na resposta ao ruído	MANOHARE et al. (2026)
Modelo construtivo	Influência do forro na percepção de impacto	HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK (2015)
Percepção noturna	Maior impacto e perturbação do sono	WORLD HEALTH ORGANIZATION (2018)
Avaliação qualitativa	Sensível a mudanças não captadas pela escala numérica	ABNT NBR ISO 15666 (2022)

Fonte: elaborado pelo autor.

A principal contribuição deste capítulo é metodológica: a avaliação perceptiva controlada, do tipo antes e depois, de mitigação acústica residencial em comunidade do semiárido brasileiro é pouco documentada na literatura, que se concentra em

estudos transversais de dose-resposta sem grupo de comparação (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; FIELDS, 1998). Até onde foi possível verificar, não foram identificados estudos brasileiros que tenham avaliado, sob delineamento controlado do tipo antes e depois, a percepção do ruído de aerogeradores após intervenções de mitigação acústica residencial. O desenho adotado, ao incorporar um grupo de controle, permite distinguir o efeito da intervenção da variação temporal, e a articulação com o ganho de isolamento medido conecta a resposta perceptiva ao desempenho acústico, integrando os achados deste capítulo aos demais resultados da dissertação, em especial à modelagem acústica, ao nível do som residual, à avaliação de infrassom e baixas frequências, cujos níveis nos receptores permaneceram abaixo dos limites de referência. Essa integração subsidia, ainda, o roadmap setorial, ao indicar que critérios de gestão baseados apenas em distâncias fixas são insuficientes diante da variabilidade da sensibilidade local, individual e social.

Em conjunto, os resultados indicam que o gerenciamento do ruído ambiental de parques eólicos não deve basear-se exclusivamente em níveis sonoros ou em distâncias fixas. A resposta humana ao ruído emerge da interação entre a exposição acústica, as características sociais e construtivas das residências, a sensibilidade individual e o contexto psicossocial. Estratégias integradas de mitigação, que atuem simultaneamente sobre essas dimensões, apresentam, portanto, maior potencial para reduzir efetivamente o incômodo percebido pelas comunidades e melhorar a qualidade de vida da população do entorno, promovendo a boa convivência entre os parques eólicos e as comunidades e garantindo, assim, a sustentabilidade.

6 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Este capítulo reúne um conjunto de contribuições para o estudo da percepção do ruído de aerogeradores em contextos rurais. Entre as principais, destacam-se: (i) constituir, até onde foi possível verificar, um dos primeiros estudos brasileiros a avaliar a percepção do ruído de aerogeradores sob delineamento controlado do tipo antes e depois em comunidades do entorno; (ii) integrar a avaliação acústica e a avaliação perceptiva, articulando o incômodo relatado ao ganho de isolamento de fachada efetivamente mensurado; (iii) adotar um desenho controlado, com grupo de comparação não submetido à intervenção; (iv) ancorar a análise em medições reais de campo, e não em estimativas; (v) aplicar a ABNT NBR ISO 15666 em ambiente rural do semiárido, contexto ainda pouco representado na literatura; e (vi) propor uma

avaliação qualitativa complementar à escala numérica de incômodo, capaz de captar mudanças de percepção que a métrica numérica isolada não revela.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão do ruído ambiental em parques eólicos deve ser tratada como um tema multifatorial, envolvendo aspectos técnicos, sociais e ambientais, de forma conjunta e integrada e nunca isoladamente.

Sob delineamento controlado do tipo antes e depois, a residência mitigada que apresentava incômodo elevado reduziu o incômodo geral de 10 para 3 e o incômodo noturno de 10 para 0, com a avaliação do ambiente sonoro passando de desagradável para agradável, enquanto a segunda residência mitigada já se encontrava no valor mínimo da escala em ambas as campanhas. As duas residências de controle, não mitigadas, mantiveram o incômodo entre 6 e 8 nas duas campanhas, com persistência de incômodo noturno máximo e de perturbação do sono no ponto de maior exposição e de maior sensibilidade individual.

A avaliação qualitativa da percepção mostrou-se essencial. Na residência mitigada que já partia do piso da escala numérica, a frequência de percepção do ruído evoluiu de sempre para não percebe, evidenciando um ganho que o incômodo numérico não revelava, o que recomenda combinar medidas numéricas e qualitativas em populações rurais.

A estabilidade do grupo de controle e a coerência entre a redução do incômodo noturno e o ganho de isolamento de 16 dB medido para a mesma residência tornam a intervenção a explicação plausível para a melhora observada. Os achados são consistentes com o caráter multifatorial do incômodo e com o papel central da sensibilidade individual, e sugerem que a aplicação de tecnologias de mitigação de ruído em residências pode reduzir a percepção de incômodo e seus efeitos sobre as pessoas e a qualidade de vida, sendo uma ferramenta importante na gestão do ruído ambiental, entretanto deve ser aplicada em localidades onde os níveis de pressão

sonora permitem essa aplicação, como demonstrado no capítulo de Caracterização do ruído e modelagem acústica.

REFERÊNCIAS

ALAMIR, M. A.; HANSEN, K. L.; ZAJAMŠEK, B.; CATCHESIDE, P. Subjective responses to wind farm noise: a review of laboratory listening test methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 114, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109317.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR ISO 15666: acústica – avaliação do incômodo causado por ruído por meio de pesquisas sociais e socioacústicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BOTELHO, A.; AREZES, P.; BERNARDO, C.; DIAS, H.; COSTA PINTO, L. M. Effect of wind farm noise on local residents' decision to adopt mitigation measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 14, n. 7, 2017. DOI: 10.3390/ijerph14070753.

CHAVES, L. O.; BRANNSTROM, C.; SILVA, E. V. Energia eólica e a criação de conflitos: ocupação dos espaços de lazer em uma comunidade no Nordeste do Brasil. *Sociedade e Território*, Natal, v. 29, n. 2, p. 49–69, 2017.

DESHMUKH, S.; BHATTACHARYA, S.; JAIN, A.; PAUL, A. R. Wind turbine noise and its mitigation techniques: a review. *Energy Procedia*, v. 160, p. 633–640, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.215.

FIELDS, J. M. Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 4, p. 2245–2260, 1998. DOI: 10.1121/1.423770.

GUSKI, R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, v. 1, n. 4, p. 45–56, 1999.

GUSKI, R.; FELSCHER-SUHR, U.; HAGEN, R. The concept of noise annoyance: how international experts see it. *Journal of Sound and Vibration*, v. 223, n. 4, p. 513–527, 1999.

HANSEN, K. L.; HANSEN, C. H.; ZAJAMŠEK, B. Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences. *Building and Environment*, v. 94, p. 764–772, 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.017.

KUWANO, S.; YANO, T.; KAGEYAMA, T.; SUEOKA, S.; TACHIBANA, H. Social survey on community response to wind turbine noise in Japan. *Noise Control Engineering Journal*, v. 62, n. 6, p. 503–520, 2014.

MANOHARE, M.; GUERRERO, S. G.; O'HORA, D.; KING, E. Noise annoyance mapping for wind turbines: a psychoacoustic approach incorporating noise sensitivity. *Applied Acoustics*, v. 248, 2026. DOI: 10.1016/j.apacoust.2026.111280.

MÜLLER, F. J. Y.; LESCHINGER, V.; HÜBNER, G.; POHL, J. Understanding subjective and situational factors of wind turbine noise annoyance. *Energy Policy*, v. 173, 2023. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113361.

PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA, M.; DUDAREWICZ, A.; ZABOROWSKI, K.; ZAMOJSKA-DANISZEWSKA, M.; WASZKOWSKA, M. Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: a pilot study. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, v. 27, n. 3, p. 364–388, 2014. DOI: 10.2478/s13382-014-0252-1.

PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA, M.; ZABOROWSKI, K.; DUDAREWICZ, A.; ZAMOJSKA-DANISZEWSKA, M.; WASZKOWSKA, M. Response to noise emitted by wind

farms in people living in nearby areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 8, 2018. DOI: 10.3390/ijerph15081575.

PEDERSEN, E.; PERSSON WAYE, K. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 6, p. 3460–3470, 2004. DOI: 10.1121/1.1815091.

SANTANA, M. G.; SILVA, L. P. Conflitos socioambientais e energia eólica no Nordeste brasileiro. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.

CAPÍTULO 8

GUIA PARA A GESTÃO INTEGRADA DO RUÍDO AMBIENTAL EM COMPLEXOS EÓLICOS

RESUMO

A expansão da energia eólica no Brasil, que alcançou 33,7 GW de potência instalada em 2024, com forte concentração na região Nordeste, intensificou a interface entre os empreendimentos e as comunidades do entorno e tornou o ruído ambiental um dos temas socioambientais mais sensíveis do setor (ABEEÓLICA, 2024; GWEC, 2025). No país, a gestão do ruído em complexos eólicos tem se apoiado predominantemente na verificação pontual de conformidade com limites normativos, abordagem frágil diante do caráter multifatorial do tema e das particularidades do semiárido. Este trabalho consolida e propõe um guia técnico para a gestão integrada do ruído ambiental, organizado como metodologia socioambiental destinada a toda a sociedade civil, especialmente a empreendedores, profissionais, gestores e órgãos ambientais. O guia articula três dimensões de fatores condicionantes, i) a fonte sonora, ii) o ambiente ecológico e iii) o ser humano, em uma análise integrada que alimenta um ciclo de gestão adaptativa, composto por cinco eixos: caracterização e diagnóstico acústico; análise integrada e zoneamento; plano de ação e priorização; implementação das medidas de mitigação; e monitoramento com avaliação perceptiva. Cada eixo é instrumentalizado por ferramentas validadas no estudo de caso de um complexo de 107 aerogeradores no semiárido de Pernambuco, entre as quais a modelagem acústica calibrada por medições *in situ*, com assertividade de 97,02%; o zoneamento acústico variável, que reduziu em 48,1% as indicações de realocação em relação ao critério de raio fixo; a avaliação de som de baixa frequência; a caracterização da paisagem sonora e da cobertura vegetal; e a mitigação de ruído nos receptores residenciais, com ganhos de 16 dB e 19 dB, acompanhada de uma avaliação controlada da percepção de impacto pela ABNT NBR ISO 15666. O guia propõe, ainda, recomendações para o aprimoramento do arcabouço regulatório nacional.

Palavras-chave: Gestão do ruído; Ruído ambiental; Energia eólica; Zoneamento acústico; Governança socioambiental; Metodologia.

ABSTRACT

The expansion of wind energy in Brazil reached 33.7 GW of installed capacity in 2024, with a strong concentration in the Northeast region. This growth has intensified the interaction between wind energy developments and surrounding communities, making environmental noise one of the sector's most sensitive socio-environmental issues (ABEEÓLICA, 2024; GWEC, 2025). In Brazil, environmental noise management at wind farm complexes has been predominantly based on point-based compliance with regulatory noise limits, an approach that is insufficient to address the multifactorial nature of the issue and the specific environmental conditions of the semi-arid region. This study consolidates and proposes a technical guideline for integrated environmental noise management, structured as a socio-environmental methodology intended for civil society as a whole, particularly developers, environmental professionals, managers, and regulatory agencies. The guideline integrates three key dimensions of conditioning factors: (i) the noise source, (ii) the ecological environment, and (iii) the human dimension, within a comprehensive framework that supports an adaptive management cycle comprising five components: acoustic characterization and diagnosis; integrated analysis and zoning; action planning and prioritization; implementation of mitigation measures; and monitoring combined with perceptual assessment. Each component is supported by tools validated through a case study conducted at a wind farm complex comprising 107 wind turbines in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. These tools include acoustical modeling calibrated with in situ measurements, achieving 97.02% accuracy; variable acoustic zoning, which reduced relocation recommendations by 48.1% compared with the conventional fixed-radius criterion; low-frequency noise assessment; soundscape and vegetation cover characterization; and residential noise mitigation measures, achieving noise reductions of 16 dB and 19 dB, accompanied by a controlled assessment of community noise perception based on the Brazilian standard ABNT NBR ISO 15666. Finally, the guideline provides recommendations for improving Brazil's national regulatory framework for environmental noise management in wind energy developments.

Keywords: *Noise management; Environmental noise; Wind energy; Acoustic zoning; Socio-environmental governance; Methodology.*

1 INTRODUÇÃO

A expansão da energia eólica no Brasil, que alcançou 33,7 GW de potência instalada em 2024, com forte concentração na região Nordeste, intensificou a interface entre os empreendimentos e as comunidades rurais do entorno, tornando o ruído ambiental um dos temas socioambientais mais sensíveis do setor (ABEEÓLICA, 2024; GWEC, 2025). A resposta humana ao ruído de aerogeradores é multifatorial, dependendo não apenas do nível de pressão sonora, mas também das condições de propagação no território, das características construtivas das residências, da sensibilidade individual e de fatores psicossociais, uma vez que a simples conformidade com limites normativos não assegura a ausência da percepção de incômodo (GUSKI, 1999; PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; MANOHARE et al., 2026).

No Brasil, atualmente a avaliação do ruído eólico apoia-se predominantemente na ABNT NBR 10151:2019, norma de uso geral vinculada ao zoneamento urbano municipal, e em resoluções gerais do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), sendo, até o momento, inexistente norma específica para o setor eólico que contemple suas características acústicas próprias, defina métricas complementares ou estabeleça protocolos de monitoramento contínuo (ABNT, 2019; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Essa lacuna gera heterogeneidade interpretativa entre empreendimentos e órgãos licenciadores, amplia a insegurança técnica e jurídica e favorece a adoção de critérios simplificados, como distâncias mínimas fixas, que se mostram insuficientes diante da complexidade do tema e variabilidade da sensibilidade individual e das condições locais (MANOHARE et al., 2026; MÜLLER et al., 2023).

Diante desse cenário, este trabalho tem por objetivo consolidar um guia técnico para a gestão integrada do ruído ambiental em complexos eólicos, baseado em evidências, e estruturado como metodologia socioambiental adaptativa. O guia reúne, de forma articulada, ferramentas e resultados desenvolvidos e validados em estudo de caso conduzido em um complexo de 107 aerogeradores no semiárido de Pernambuco, traduzindo-os em um fluxo de gestão replicável, destinado a subsidiar empreendedores, consultorias técnicas e órgãos ambientais na caracterização, na

priorização, na mitigação e no monitoramento do ruído, bem como a oferecer subsídios para o aprimoramento do arcabouço regulatório nacional. A proposta não substitui as avaliações específicas de cada empreendimento, mas organiza-as em uma sequência lógica e replicável, fundamentada em evidências de campo, base científica e adaptada ao contexto brasileiro.

1.1 Principais contribuições

Este trabalho oferece, de forma articulada: (i) a estruturação do guia em cinco eixos integrados e retroalimentados, da caracterização acústica ao monitoramento sonoro, replicáveis em diferentes empreendimentos; (ii) a demonstração empírica de que a modelagem acústica calibrada em campo, com assertividade de 97,02%, pode substituir o critério de raio fixo, reduzindo em 48,1% as indicações de realocação; (iii) a validação da mitigação construtiva de fachada como alternativa eficaz à realocação, com ganhos de 16 dB e 19 dB; (iv) a incorporação da avaliação perceptiva controlada (ABNT NBR ISO 15666) e da sensibilidade individual ao processo de decisão técnica; e (v) recomendações objetivas para o aprimoramento do arcabouço regulatório nacional.

2 FUNDAMENTOS DA GESTÃO INTEGRADA DO RUÍDO AMBIENTAL

2.1 Da conformidade pontual à governança socioambiental

A gestão do ruído ambiental em complexos eólicos tem sido historicamente tratada como uma questão de conformidade pontual, isto é, como a verificação do atendimento a limites normativos em um conjunto restrito de pontos, na qual o atendimento a um limite de nível de pressão sonora seria suficiente para atestar a adequação ambiental do empreendimento. Os resultados aqui sintetizados evidenciam os limites dessa abordagem. No território estudado, o som residual médio foi de 40,98 dB(A) no período noturno, com 94,5% dos receptores acima do limite de referência noturno rural de 35 dB(A), de modo que a margem acústica disponível para a contribuição da fonte específica, no caso o som gerado pelos aerogeradores, é reduzida e a avaliação de conformidade depende criticamente da correta caracterização do som residual preexistente no ambiente. Ao mesmo tempo, a avaliação perceptiva revelou que residências situadas a distâncias equivalentes podem apresentar respostas de incômodo divergentes, em função da sensibilidade

individual e do modelo construtivo, o que reforça a insuficiência de critérios baseados exclusivamente em níveis médios ou em distâncias fixas (PEDERSEN; PERSSON WAYE, 2004; GUSKI, 1999; MANOHARE et al., 2026).

Por essa razão, o guia adota como princípio a transição da conformidade pontual para a governança socioambiental completa e robusta, entendida como a gestão contínua e integrada das múltiplas dimensões que condicionam o ruído e o incômodo. Essa perspectiva é consistente com o modelo conceitual, da psicoacústica proposta por Guski (1999), segundo o qual o incômodo emerge da interação entre a carga ambiental, as variáveis moderadoras de natureza individual e psicossocial e as variáveis mediadoras, e com a recomendação de que reduções em moderadores negativos, como o fortalecimento da confiança, gestão socioambiental adequada e o acesso à informação, podem ser tão eficazes quanto reduções equivalentes de ruído (GUSKI, 1999; BOTELHO et al., 2017).

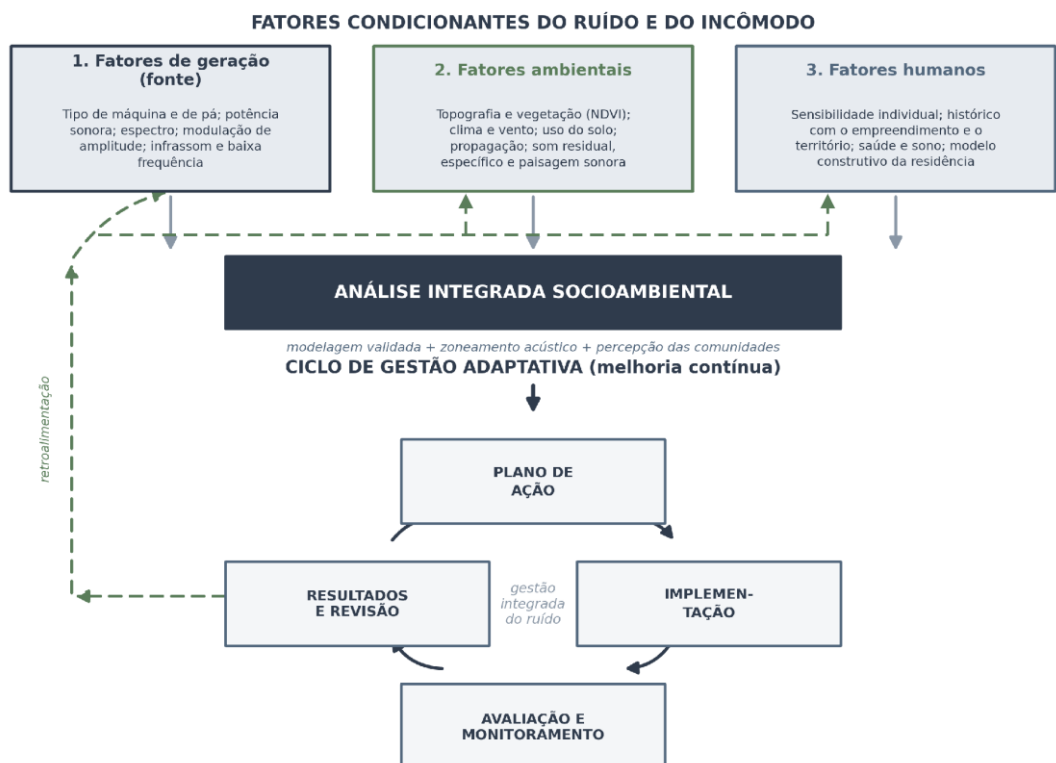
2.2 As três dimensões de fatores condicionantes

O guia organiza os condicionantes do ruído ambiental e de percepção de impacto em três dimensões, em consonância com a estrutura multifatorial consolidada na literatura em estudos realizados nesta pesquisa. A primeira dimensão, (i) a fonte sonora, reúne os fatores de geração na fonte, associados ao tipo de máquina e de pá, à potência sonora, ao espectro de emissão, à modulação de amplitude e às componentes de infrassom e baixa frequência. A segunda dimensão, (ii) o ambiente ecológico, abrange os fatores ambientais que condicionam a propagação do som entre a fonte e o receptor, incluindo a topografia, a cobertura vegetal, o clima e o vento, o uso do solo e a composição da paisagem sonora. A terceira dimensão, (iii) o ser humano, compreende os fatores humanos, relativos à sensibilidade individual, ao histórico de relacionamento com o empreendimento e o território, às condições de saúde e sono e ao modelo construtivo das residências (HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; GUSKI, 1999; MANOHARE et al., 2026).

Essas três dimensões convergem para uma análise integrada socioambiental, que combina a modelagem acústica validada, o zoneamento do território e a avaliação da percepção das comunidades, e que alimenta um ciclo de gestão adaptativa, operacionalizado em cinco eixos: caracterização e diagnóstico acústico; análise integrada e zoneamento; plano de ação e priorização; implementação das medidas

de mitigação; e monitoramento com avaliação perceptiva. A Figura 8.1 sintetiza esse modelo conceitual, que estrutura o guia técnico proposto neste trabalho.

Figura 8.1 – Modelo conceitual do guia técnico de gestão integrada do ruído ambiental em complexos eólicos, com retroalimentação do monitoramento às três dimensões condicionantes



Fonte: elaborado pelo autor (2026), com base na estrutura multifatorial de Guski (1999).

2.3 Base normativa e a lacuna regulatória brasileira

O guia apoia-se em um conjunto de referenciais normativos nacionais e internacionais, aplicados de forma complementar e sintetizados no Quadro 8.1.

Quadro 8.1 – Referenciais normativos nacionais e internacionais aplicados no guia técnico

Âmbito	Referência	Conteúdo / aplicação
Nacional	ABNT NBR 10151:2019	Procedimentos de medição e limites por uso do solo (sítios e fazendas: 40 dB(A) diurno; 35 dB(A) noturno)
Nacional	ABNT NBR 16313:2025	Padronização da terminologia acústica
Nacional	ABNT NBR 15575-4:2021	Níveis de desempenho de isolamento acústico de fachada
Nacional	ABNT NBR ISO 15666:2022	Avaliação socioacústica do incômodo
Nacional	Resolução CONAMA nº 462/2014; nº 01/1990	Licenciamento ambiental de empreendimentos eólicos; padrões de emissão de ruído
Internacional	ISO 9613	Modelagem da propagação sonora ao ar livre
Internacional	Série IEC 61400	Medição de ruído em turbinas eólicas
Internacional	DIN 45680:1997	Avaliação de ruído de baixa frequência (infrassom)
Subnacional	Instrução Normativa CPRH nº 09/2024 (PE)	Orientações complementares na ausência de marco federal específico

Fonte: elaborado pelo autor (2026), com base nos referenciais normativos citados.

A ausência de norma brasileira específica para o ruído eólico, em particular para o infrassom e a baixa frequência, exige a compatibilização dos referenciais internacionais com as boas práticas nacionais, lacuna que constitui um dos focos das recomendações deste trabalho (ISO, 1996; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017; DAVY; BURGEMEISTER; HILLMAN, 2020). Iniciativas subnacionais, como a Instrução Normativa CPRH nº 09/2024, no estado de Pernambuco, ilustram a busca por orientações complementares na ausência de um marco federal específico (CPRH, 2024).

3 ESTRUTURA DO GUIA TÉCNICO: METODOLOGIA DE GESTÃO INTEGRADA

O guia técnico é estruturado em cinco eixos sequenciais e retroalimentados, que traduzem o modelo conceitual da Figura 8.1 em um fluxo operacional de gestão. Os três primeiros eixos correspondem ao diagnóstico e à decisão, os dois últimos à ação

e ao controle, e o conjunto opera como um ciclo de melhoria contínua, no qual os resultados do monitoramento realimentam a caracterização e o planejamento. Cada eixo é descrito a seguir e instrumentalizado pelas ferramentas e pelos resultados validados no estudo de caso, cuja síntese é apresentada na seção 4.

3.1 Eixo 1: caracterização e diagnóstico acústico

O primeiro eixo integra dois momentos complementares de uma mesma etapa: a caracterização técnica do ruído, que reúne os dados de fonte e ambiente, e o diagnóstico acústico, que interpreta esses dados para identificar a condição de cada receptor. Recomenda-se que a modelagem da propagação sonora seja conduzida pela ISO 9613 e, de modo determinante, calibrada por medições de emissão realizadas no próprio empreendimento, uma vez que as potências sonoras declaradas pelo fabricante se mostraram insuficientes para representar as condições operacionais em campo. No estudo de caso, os ajustes necessários variaram de 4,0 dB a 7,1 dB, com acréscimo de 5,8 dB na faixa de maior permanência anual do vento, evidenciando que a dependência exclusiva de dados de catálogo subestima a emissão em campo (IANNACE; CIABURRO; TREMATERRA, 2019; HANSEN; DOOLAN; HANSEN, 2017).

A caracterização do ambiente sonoro exige a determinação do som residual, do som específico e da paisagem sonora, medidos com a fonte desligada (aerogerador) em raio adequado, pois esses parâmetros definem a margem acústica do território e a predominância efetiva da fonte. No caso estudado, a diferença aritmética entre o som total e o som residual (ΔL) decresceu de 11,84 dB na faixa de 100 a 200 m para 6,37 dB na faixa de 401 a 500 m, e para distâncias superiores a 250 m a diferença entre o nível de pressão sonora da fonte e do som residual foi inferior a 3 dB, indicando não predominância segundo a ABNT NBR 10151:2019 (ABNT, 2019). O eixo contempla, ainda, a análise de infrassom e baixa frequência pelo critério $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ da DIN 45680:1997 e a caracterização da cobertura vegetal por sensoriamento remoto satelital, fatores relevantes para a compreensão da propagação sonora no semiárido (SOUZA FILHO et al., 2026; ZAJAMŠEK et al., 2016; NGUYEN et al., 2022; AYLOR, 1972).

3.2 Eixo 2: análise integrada e zoneamento acústico

O segundo eixo converte o diagnóstico em um zoneamento acústico do território, validado por medições de campo e integrado à avaliação da percepção social. A validação é etapa indispensável: no estudo de caso, a comparação entre os níveis simulados e os medidos em 235 receptores resultou em índice de assertividade de 97,02% dentro da faixa de incerteza de ± 5 dB, com erro médio absoluto de 2,51 dB e viés de -0,69 dB, o que confere robustez ao modelo como ferramenta de decisão (EUROPEAN COMMISSION, 2007). A partir do modelo validado, o território é estratificado em zonas de gestão, segundo critérios técnicos que combinam o nível simulado, a incerteza da modelagem, referências normativas e o limiar de perceptibilidade auditiva.

A comparação entre o zoneamento variável e o critério de raio fixo, ilustrada na Figura 8.2, evidencia a superioridade técnica e social da abordagem. Enquanto o critério de raio fixo, como exemplo, de 500 m direcionaria a totalidade das 239 residências à realocação, o resultado do modelo acústico simulado e verificado com medições sonoras in situ indicou que 124 residências (51,9%) demandam avaliação individualizada e eventual realocação assistida, ao passo que indica que 115 residências (48,1%) poderiam permanecer no território mediante a implementação de medidas de mitigação acústicas. A adoção do modelo certificado reduziu, portanto, em 48,1% o número de indicações de realocação. Esse eixo deve incorporar, ainda, a sensibilidade individual e a percepção das comunidades, dado que a não predominância acústica não implica ausência de incômodo ou percepção de impacto (MANOHARE et al., 2026; GUSKI, 1999).

Figura 8.2 – Comparação entre o critério de raio fixo e o zoneamento acústico variável validado, com as implicações sociais de cada abordagem (n = 239 receptores)



Fonte: elaborado pelo autor (2026), a partir dos resultados do estudo de caso.

3.3 Eixo 3: plano de ação e priorização de medidas

O terceiro eixo traduz o zoneamento em um plano de ação, que prioriza as intervenções de acordo com a criticidade de cada receptor e com a viabilidade técnica e social das medidas. Para as residências da zona de permanência admissível, prioriza-se a mitigação construtiva, associada ao monitoramento periódico; para aquelas em que as medidas de mitigação não sejam tecnicamente suficientes para adequar a exposição, avalia-se a realocação assistida e consensual, tratada como medida de exceção, e não como regra geral. A priorização deve integrar a avaliação da sensibilidade individual e do modelo construtivo, uma vez que residências sem laje ou forro, com telhas artesanais, e com esquadrias sem atenuação sonora apresentam maior transmissão do ruído para o interior da habitação (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019).

O plano de ação deve ser construído de forma participativa, contemplando canais permanentes e transparentes de diálogo, registro de queixas, reclamações e comunicação social efetiva, dado que o incômodo é fortemente moderado pela confiança no empreendimento e pela percepção de equidade no processo decisório. A literatura e o contexto do semiárido nordestino indicam que a ausência de escuta ativa e de comunicação adequada aprofunda a desconfiança e amplifica a percepção negativa dos impactos, podendo escalar conflitos mesmo em situações de conformidade normativa (CHAVES; BRANNSTROM; SILVA, 2017; SANTANA; SILVA, 2021; MÜLLER et al., 2023).

3.4 Eixo 4: implementação das medidas de mitigação

O quarto eixo corresponde à implementação das medidas, organizadas segundo a hierarquia clássica de controle do ruído, que atua sobre a fonte, sobre a trajetória de propagação e sobre o receptor. Na fonte, destacam-se medidas operacionais, como manutenção adequada, e tecnológicas, como serrilhas de bordo de fuga, embora estas dependam de características de projeto do aerogerador e estudos específicos (BERTAGNOLIO; HERR; MADSEN, 2023). Na trajetória, a conservação e a restauração da vegetação nativa constituem estratégia de mitigação baseada na natureza, coerente com a associação significativa entre cobertura vegetal e atenuação observada no estudo, em que um incremento de 0,1 unidade no índice de vegetação associou-se à redução de cerca de 0,77 dB no nível específico, com efeito mais expressivo em distâncias intermediárias (SOUZA FILHO et al., 2026).

No receptor, a intervenção mais diretamente eficaz é o aprimoramento do isolamento acústico de fachada das residências. No estudo de caso, uma solução construtiva de baixa complexidade, composta por forro com chapas resistentes à umidade e mantas acústicas associadas a esquadrias, elevou a atenuação sonora da fachada, medida conforme a ABNT NBR ISO 16283-3:2021, de 6 dB para 25 dB e 22 dB em duas residências, ganhos de 19 dB e 16 dB respectivamente, conduzindo ambas a patamares superiores ao mínimo de 20 dB da Classe de Ruído I da ABNT NBR 15575-4:2021. A melhora dos indicadores objetivos foi acompanhada de redução do incômodo relatado, configurando alternativa tecnicamente eficaz e socialmente adequada à realocação, sobretudo em contextos nos quais a permanência das famílias no território é desejável (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DESHMUKH et al., 2019; BOTELHO et al., 2017).

3.5 Eixo 5: monitoramento, avaliação e melhoria contínua

O quinto eixo fecha o ciclo de gestão adaptativa, por meio do monitoramento acústico periódico e da reavaliação da percepção das comunidades, cujos resultados realimentam a caracterização e o planejamento. Recomenda-se que o monitoramento seja conduzido sob condições meteorológicas equivalentes às adotadas na modelagem, com registro das condições operacionais, e que a avaliação perceptiva utilize a ABNT NBR ISO 15666:2022, combinando a escala numérica de incômodo

com medidas qualitativas de frequência e período de percepção, que se mostraram mais sensíveis a mudanças em populações rurais (ABNT, 2022).

A efetividade desse eixo foi demonstrada pela avaliação controlada, antes e depois, conduzida no estudo de caso. A residência mitigada que inicialmente apresentava incômodo elevado, após a mitigação reduziu o incômodo geral de 10 para 3 e o noturno de 10 para 0, com a avaliação do ambiente sonoro evoluindo de desagradável para agradável, enquanto as residências de controle, não mitigadas, mantiveram o incômodo estável entre 6 e 8, com persistência de perturbação do sono no ponto de maior exposição e maior sensibilidade individual. A estabilidade do grupo de controle e a coerência entre a redução do incômodo noturno e o ganho de isolamento de 16 dB estão associadas à melhora observada após a mitigação do ruído (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018; MANOHARE et al., 2026).

4 SÍNTESE OPERACIONAL E RESULTADOS DE REFERÊNCIA

O Quadro 8.2 consolida o guia técnico em sua forma operacional, relacionando cada eixo à pergunta-chave que orienta a decisão, à ferramenta ou método recomendado, ao resultado de referência obtido no estudo de caso e ao referencial normativo aplicável. O Quadro 8.3 organiza as medidas de mitigação segundo a hierarquia de controle do ruído, indicando a evidência correspondente.

Quadro 8.2 – Síntese operacional do guia técnico de gestão integrada do ruído em complexos eólicos

Eixo	Pergunta-chave	Ferramenta / método
1. Caracterização e diagnóstico	Quanto a fonte emite e qual o ambiente sonoro preexistente?	Modelagem ISO 9613 calibrada in situ; som residual, específico e paisagem sonora; triagem de baixa frequência; NDVI
2. Análise integrada e zoneamento	Onde a fonte é predominante e quais áreas exigem ação?	Validação de campo; zoneamento acústico variável; integração da percepção e da sensibilidade
3. Plano de ação e priorização	Quais medidas, para quais residências e em que ordem?	Matriz de priorização por criticidade; comunicação social e escuta ativa

Eixo	Pergunta-chave	Ferramenta / método
4. Implementação	Como reduzir a exposição e o incômodo?	Hierarquia fonte, trajetória e receptor; vegetação; isolamento de fachada
5. Monitoramento e melhoria contínua	As medidas foram eficazes e o que reavaliar?	Monitoramento periódico; avaliação perceptiva controlada; retroalimentação do ciclo

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Quadro 8.3 – Hierarquia de controle do ruído e evidência correspondente

Nível de atuação	Medida	Evidência / referência
Fonte	Gestão operacional da manutenção; tecnologias de projeto de pá.	Emissão sonora superior à de catálogo (+5,8 dB na condição dominante); IANNACE; CIABURRO; TREMATERRA (2019)
Trajetoária de propagação	Conservação e restauração da vegetação nativa como mitigação baseada na natureza	Atenuação de -0,77 dB por 0,1 NDVI, mais expressiva entre 301 e 400 m; SOUZA FILHO et al., 2026; AYLOR (1972)
Receptor	Isolamento acústico de fachada: forro com manta de poliéster e esquadrias com vedação	Ganhos de 16 e 19 dB; alcance das Classes I e II (NBR 15575-4); HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK (2015)
Receptor (exceção)	Realocação assistida e consensual, quando a mitigação for tecnicamente insuficiente	Indicada para a Zona 1 (124 receptores); evita realocação desnecessária de 115 residências

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

5 RECOMENDAÇÕES PARA O SETOR E PARA OS ÓRGÃOS REGULADORES

O guia técnico subsidia um conjunto de recomendações destinadas a empreendedores, profissionais, consultorias e órgãos ambientais, organizadas no Quadro 8.4. As recomendações decorrem diretamente das evidências do estudo de caso e visam superar as limitações dos critérios atualmente predominantes, promovendo maior coerência técnica, previsibilidade regulatória e equilíbrio entre a expansão da energia eólica e a proteção das comunidades.

Quadro 8.4 – Recomendações para o setor e para os órgãos ambientais

Destinatário	Recomendação	Fundamento
Órgãos ambientais	Substituir critérios de distância fixa por zoneamento acústico baseado em	O raio fixo direcionaria 100% das residências à realocação; do ponto de

Destinatário	Recomendação	Fundamento
	modelagem validada por meio de medições sonoras em campo	vista conceitual, por desconsiderar as variações reais de propagação sonora no território, esse critério também pode deixar de captar áreas efetivamente impactadas situadas além do raio adotado, embora esse cenário não tenha sido observado no estudo de caso; o modelo variável reduz a primeira distorção em 48,1%
Órgãos ambientais	Estabelecer norma específica para o ruído eólico, incluindo métricas complementares	Ausência de norma nacional específica que considere os múltiplos fatores, e defina o modelo de caracterização do ruído como preditor do zoneamento acústico.
Empreendedores	Calibrar as potências sonoras por medições <i>in situ</i> e validar toda modelagem por campanhas de campo	Ajustes de +4,0 a +7,1 dB sobre os valores de catálogo; validação de 97,02%
Empreendedores	Adotar a mitigação construtiva de fachada como alternativa preferencial à realocação, quando viável e aplicável.	Ganhos de 16 e 19 dB com solução de baixa complexidade; redução do incômodo relatado
Empreendedores e órgãos	Incorporar a avaliação perceptiva controlada e a sensibilidade individual à gestão do ruído	Incômodo persistente em receptor de alta sensibilidade a 470 m; NBR ISO 15666; Manohare et al. (2026)
Empreendedores e órgãos	Instituir canais permanentes de comunicação, escuta ativa e registro de queixas ao longo de todo o ciclo de vida e uma gestão social adequada.	Conflitos no nordeste associados à comunicação inadequada, ausência de canal de diálogo, escuta ativa da comunidade e gestão socioambiental dos impactos; moderadores psicossociais do incômodo
Setor e pesquisa	Considerar a conservação e a restauração da vegetação nativa como medida complementar de mitigação	Associação significativa entre preservação da cobertura vegetal no entorno das residências e a atenuação do som específico; mitigação baseada na natureza no bioma Caatinga

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

6 LIMITAÇÕES E CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

O guia técnico proposto decorre de um estudo de caso conduzido em um complexo eólico do semiárido pernambucano, com aerogeradores de um modelo específico, de modo que a transposição de seus parâmetros quantitativos a outros contextos deve ser feita com cautela, observando-se as particularidades de cada território, máquina e comunidade. Cabe ressaltar, ainda, que a aplicação plena do guia, com a calibração por medições *in situ* com os aerogeradores em operação, é própria da fase de operação (Licença de Operação). Nas fases anteriores do licenciamento, de Licença Prévia e de Licença de Instalação, em que ainda não há emissão sonora a medir, o

guia pode ser utilizado como referencial preditivo, baseado em modelagem e em dados de empreendimentos análogos, a ser validado e ajustado após a entrada em operação.

Além disso, a aplicação do guia pressupõe, portanto, julgamento técnico qualificado em cada etapa, bem como a contínua atualização à luz da evolução normativa e do conhecimento científico sobre o ruído eólico (HANSEN; HANSEN; ZAJAMŠEK, 2015; DAVY; BURGEMEISTER; HILLMAN, 2020).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo consolidou um guia técnico para a gestão integrada do ruído ambiental em complexos eólicos, organizado como metodologia socioambiental que articula as três dimensões de fatores condicionantes, a fonte sonora, o ambiente ecológico e o ser humano, em um ciclo de gestão adaptativa. A proposta reúne, de forma sistematizada, ferramentas e resultados validados em campo, traduzindo-os em cinco eixos sequenciais e retroalimentados, da caracterização ao monitoramento.

O conjunto dos resultados sustenta a tese central de que a gestão do ruído eólico não deve basear-se exclusivamente em níveis sonoros ou em distâncias fixas, mas em uma abordagem integrada, fundamentada em evidências e adaptada ao contexto socioambiental local. A modelagem validada substituiu, com vantagem técnica e social, o critério de raio fixo; a mitigação construtiva mostrou-se alternativa eficaz à realocação; e a avaliação perceptiva controlada confirmou a efetividade das intervenções e o papel central da sensibilidade individual e do modelo construtivo. Espera-se que o guia técnico contribua para o aprimoramento das práticas de gestão socioambiental do setor e para a construção de um marco regulatório nacional específico, promovendo a convivência sustentável entre os empreendimentos eólicos e as comunidades do entorno, em especial no semiárido nordestino.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEÓLICA). *Boletim anual de geração eólica 2024*. São Paulo: ABEEólica, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 10151: acústica – medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – aplicação de uso geral*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 15575-4*: edificações habitacionais – desempenho – parte 4: sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 16313*: acústica – terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR ISO 15666*: acústica – avaliação do incômodo causado por ruído por meio de pesquisas sociais e socioacústicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR ISO 16283-3*: acústica – medição de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações – parte 3: isolamento de fachada a ruído aéreo. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AYLOR, D. Noise reduction by vegetation and ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 1B, p. 197–205, 1972.

BERTAGNOLIO, F.; HERR, M.; MADSEN, K. D. A roadmap for required technological advancements to further reduce onshore wind turbine noise impact on the environment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 12, n. 3, 2023.

BOTELHO, A.; AREZES, P.; BERNARDO, C.; DIAS, H.; COSTA PINTO, L. M. Effect of wind farm noise on local residents' decision to adopt mitigation measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 14, n. 7, 2017.

BRASIL. *Resolução CONAMA nº 01, de 8 de março de 1990*: dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política. Brasília: CONAMA, 1990.

BRASIL. *Resolução CONAMA nº 462, de 24 de julho de 2014*: estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre. Brasília: CONAMA, 2014.

CHAVES, L. O.; BRANNSTROM, C.; SILVA, E. V. Energia eólica e a criação de conflitos: ocupação dos espaços de lazer em uma comunidade no Nordeste do Brasil. *Sociedade e Território*, Natal, v. 29, n. 2, p. 49–69, 2017.

CPRH – AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. *Instrução Normativa CPRH nº 09/2024*. Recife: CPRH, 2024.

DAVY, J. L.; BURGEMEISTER, K.; HILLMAN, D. Wind turbine sound limits: current standards and where to from here? *Applied Acoustics*, v. 165, p. 107325, 2020.

DESHMUKH, S.; BHATTACHARYA, S.; JAIN, A.; PAUL, A. R. Wind turbine noise and its mitigation techniques: a review. *Energy Procedia*, v. 160, p. 633–640, 2019.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 45680*: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft. Berlin: Beuth Verlag, 1997.

EUROPEAN COMMISSION. *Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure*. Luxembourg: European Commission, 2007. (Working Group – Assessment of Exposure to Noise, WG-AEN).

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). *Global Wind Report 2025*. Brussels: GWEC, 2025.

GUSKI, R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, v. 1, n. 4, p. 45–56, 1999.

HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. *Wind farm noise: measurement, assessment and control*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

- HANSEN, K. L.; HANSEN, C. H.; ZAJAMŠEK, B. Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences. *Building and Environment*, v. 94, p. 764–772, 2015.
- IANNACE, G.; CIABURRO, G.; TREMATERRA, A. Wind turbine noise prediction using random forest regression. *Machines*, v. 7, n. 4, 2019.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 9613-2: acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors – part 2: general method of calculation*. Geneva: ISO, 1996.
- MANOHARE, M.; GUERRERO, S. G.; O'HORA, D.; KING, E. Noise annoyance mapping for wind turbines: a psychoacoustic approach incorporating noise sensitivity. *Applied Acoustics*, v. 248, 2026.
- MÜLLER, F. J. Y.; LESCHINGER, V.; HÜBNER, G.; POHL, J. Understanding subjective and situational factors of wind turbine noise annoyance. *Energy Policy*, v. 173, 2023.
- NGUYEN, P. D.; HANSEN, K. L.; LECHAT, B.; HANSEN, C.; CATCHESIDE, P.; ZAJAMŠEK, B. Audibility of wind farm infrasound and amplitude modulated tonal noise at long-range locations. *Applied Acoustics*, v. 201, p. 109106, 2022.
- PEDERSEN, E.; PERSSON WAYE, K. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 6, p. 3460–3470, 2004.
- SANTANA, M. G.; SILVA, L. P. *Conflitos socioambientais e energia eólica no Nordeste brasileiro*. 2021.
- SOUZA FILHO, J.; VECCI, M.A.; UEZU, A.; CELESTINO, L. Effect of vegetation cover on wind turbine noise propagation in the Caatinga biome, Brazil. In: INTER-NOISE 2026 – INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 2026, Adelaide. *Proceedings* [...]. Adelaide: Australian Acoustical Society, 2026.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Environmental noise guidelines for the European Region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.
- ZAJAMŠEK, B.; HANSEN, K. L.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, C. H. Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, v. 370, p. 176–190, 2016.

CAPÍTULO 9

INTEGRAÇÃO E CONCLUSÕES GERAIS

Este capítulo consolida a dissertação articulando, em uma síntese integrada, os resultados produzidos nas etapas anteriores. Diferentemente dos capítulos temáticos anteriores, concebidos como estudos independentes, o propósito aqui é integrar as evidências apresentadas em uma leitura de conjunto, demonstrar como as diferentes dimensões do ruído ambiental se conectam, avaliar o atendimento aos objetivos da pesquisa e explicitar suas contribuições, limitações e desdobramentos. O capítulo retoma o problema de pesquisa, integra os achados, sintetiza as contribuições e apresenta as considerações finais.

1 RETOMADA DO PROBLEMA E DOS OBJETIVOS

A expansão acelerada da energia eólica no Brasil, concentrada na região Nordeste e frequentemente próxima a comunidades rurais, colocou o ruído ambiental no centro das preocupações socioambientais do setor. O problema que motivou esta pesquisa pode ser formulado da seguinte maneira: os instrumentos atualmente empregados para avaliar e gerir o ruído de complexos eólicos no país, apoiados predominantemente na verificação pontual de limites concebidos para o meio urbano e em critérios simplificados de distância, são insuficientes para descrever e enfrentar a natureza multifatorial do incômodo no contexto do semiárido nordestino.

Diante desse problema, o objetivo geral da dissertação foi analisar, de forma integrada, o ruído ambiental em complexos eólicos no contexto brasileiro, considerando os aspectos físicos, técnicos e socioambientais, com ênfase na percepção e no incômodo, e visando à proposição e à avaliação de estratégias de caracterização, mitigação e gestão adaptadas ao semiárido nordestino. Esse objetivo desdobrou-se em oito objetivos específicos, que orientaram os capítulos temáticos e cujo atendimento é discutido na seção 3 deste capítulo. Cada um ilumina uma face do

mesmo fenômeno, e é a sua articulação que sustenta a contribuição central deste trabalho.

Os capítulos e seus respectivos objetivos foram apresentados na parte introdutória da dissertação (Apresentação). Nesta seção, retoma-se o problema de pesquisa para avaliar em que medida as perguntas que orientaram o trabalho puderam ser respondidas. Em síntese, a pesquisa respondeu: como caracterizar de forma confiável o ruído eólico no território (Capítulos 2 e 3); qual o papel da vegetação nativa na propagação sonora (Capítulo 4); se o infrassom e a baixa frequência configuram fator predominante de exposição (Capítulo 5); se a mitigação construtiva no receptor é alternativa eficaz à realocação (Capítulo 6); como os moradores percebem o ruído e respondem às intervenções (Capítulo 7); e como articular essas evidências em um instrumento de gestão replicável (Capítulo 8). O atendimento a cada objetivo específico é detalhado na seção 3 deste capítulo.

2 SÍNTESE INTEGRADA DOS RESULTADOS

Os resultados da dissertação podem ser organizados como uma cadeia que vai da geração do som à sua gestão, percorrendo a propagação no território, a recepção nas residências e a percepção pelos moradores. A Figura 9.1 representa essa cadeia integrada e associa cada elo aos capítulos que o investigaram, evidenciando que a fonte, o ambiente, a edificação e o ser humano constituem um sistema, e não fatores isolados.

INTEGRAÇÃO DAS DIMENSÕES DO RUÍDO E DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO



Figura 9.1 – Integração das dimensões do ruído ambiental e dos capítulos da dissertação

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Na origem da cadeia, a caracterização da fonte e a modelagem da propagação demonstraram que a previsão confiável do ruído eólico depende da calibração dos modelos por medições realizadas no próprio empreendimento. As potências sonoras de catálogo mostraram-se insuficientes, exigindo ajustes de 4,0 dB a 7,1 dB, com acréscimo de 5,8 dB na condição de vento de maior permanência anual. O modelo assim calibrado, fundamentado na ISO 9613-2, alcançou índice de assertividade de 97,02% na comparação com 235 receptores medidos, com erro médio absoluto de 2,51 dB, o que o qualificou como ferramenta de decisão. A caracterização também revelou que a diferença aritmética entre o som total e o som residual (ΔL) decresce de 11,84 dB, na faixa de 100 a 200 m, para 6,37 dB, na faixa de 401 a 500 m, deixando de ser predominante para distâncias superiores a 250 m, segundo o critério da ABNT NBR 10151:2019.

A propagação, contudo, não ocorre em um meio neutro. A caracterização do som residual evidenciou um ambiente sonoro de fundo elevado, com média de 41 dB(A) e a maioria dos receptores acima do limite noturno de referência para áreas rurais, o que reduz a margem acústica disponível e condiciona a percepção de contraste entre o ruído da fonte e o silêncio esperado do campo. A análise da cobertura vegetal, por sua vez, identificou uma associação significativa entre o índice de vegetação e a atenuação do som específico, da ordem de 0,77 dB para cada acréscimo de 0,1 unidade no índice, com efeito mais expressivo nas distâncias intermediárias. A vegetação nativa, assim, deixou de ser um elemento passivo da paisagem para se constituir em estratégia de mitigação baseada na natureza, particularmente relevante no bioma Caatinga.

Ainda no plano da fonte sonora e da propagação, a avaliação do conteúdo de baixa frequência e infrassom indicou que, nas condições investigadas, esses componentes não apresentaram predominância nem evidências de impacto acústico significativo nos receptores avaliados. Os valores observados permaneceram abaixo do critério de triagem adotado internacionalmente para indicar predominância de baixas frequências. Em conjunto, os resultados sugerem que, para a faixa de distâncias analisada, o ruído dos aerogeradores foi predominantemente determinado

pelas componentes audíveis, sem que as baixas frequências e o infrassom se configurassem como fatores predominantes de exposição.

No elo da recepção, a mitigação acústica residencial demonstrou que a edificação é um fator determinante da exposição efetiva. Uma solução construtiva de baixa complexidade, combinando forro com mantas de poliéster e esquadrias com vedação acústica, elevou a diferença padronizada de nível de fachada de 6 dB para 22 dB e 25 dB em duas residências, ganhos de 16 dB e 19 dB que as conduziram às Classes de Ruído I e II da ABNT NBR 15575-4:2025. A mitigação no receptor afirmou-se, portanto, como alternativa tecnicamente eficaz e socialmente menos onerosa do que a realocação.

No elo da percepção, a avaliação controlada do tipo antes e depois fechou a cadeia ao demonstrar a efetividade das intervenções sobre a experiência dos moradores. Na residência que partia de incômodo elevado, o incômodo geral reduziu-se de 10 para 3 e o incômodo noturno de 10 para 0, em coerência com o ganho de isolamento obtido, enquanto as residências de controle, não mitigadas, mantiveram o incômodo estável, com persistência de perturbação do sono no ponto de maior exposição e maior sensibilidade individual. A estabilidade do grupo de controle reforçou a atribuição da melhora à intervenção e evidenciou o papel da sensibilidade individual e do modelo construtivo como moderadores da resposta, confirmando a insuficiência de explicações baseadas apenas em níveis sonoros.

Esses achados convergem para o instrumento de gestão consolidado no capítulo anterior. O guia técnico de gestão integrada articula as ferramentas validadas, da modelagem calibrada ao ordenamento do território, da mitigação por vegetação e por isolamento de fachada à avaliação perceptiva, em um ciclo de gestão adaptativa. O Quadro 9.1 sintetiza, por capítulo, o achado principal e a sua contribuição para essa gestão integrada.

Quadro 9.1 – Síntese integrada dos resultados por capítulo

Capítulo	Achado principal	Contribuição para a gestão integrada
Cap. 2 – Caracterização e modelagem	Modelo ISO 9613-2 calibrado in situ; validação de 97,02% (n = 235; MAE de 2,51	Substitui a distância fixa por ordenamento baseado em

Capítulo	Achado principal	Contribuição para a gestão integrada
	dB); ordenamento que reduz em 48,1% as indicações de realocação	evidências (Zona 1 = 124; Zona 2 = 115)
Cap. 3 – Som residual e paisagem sonora	Som residual médio de 41 dB(A), com maioria dos receptores acima do limite noturno rural	Define a margem acústica do território e o contraste percebido entre fonte e fundo
Cap. 4 – Vegetação e propagação	Atenuação de cerca de 0,77 dB por 0,1 de índice de vegetação, mais expressiva entre 301 e 400 m	Conservação e restauração da vegetação como mitigação baseada na natureza
Cap. 5 – Infrassom e baixa frequência	Diferença média de 13,5 dB entre os níveis ponderados em C e em A, abaixo do limite de 20 dB em todos os receptores	Qualifica tecnicamente a queixa de baixa frequência, com as devidas ressalvas de aplicação
Cap. 6 – Mitigação residencial	Ganhos de isolamento de fachada de 16 e 19 dB, atingindo as Classes I e II da NBR 15575-4	Mitigação no receptor como alternativa eficaz à realocação
Cap. 7 – Percepção e incômodo	Incômodo de 10 para 3 e noturno de 10 para 0 na residência mitigada; controle estável	Comprova a efetividade da intervenção e o papel da sensibilidade e do modelo construtivo
Cap. 8 – Guia técnico	Metodologia de gestão integrada em cinco eixos, com ciclo de melhoria contínua	Consolida as ferramentas validadas em um instrumento operacional replicável.

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

3 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O conjunto dos capítulos permitiu atender aos oito objetivos específicos definidos na introdução da dissertação. O Quadro 9.2 relaciona cada objetivo à forma como foi atendido e aos capítulos correspondentes, evidenciando a coerência entre o planejamento e a execução da pesquisa.

Quadro 9.2 – Atendimento aos objetivos específicos da pesquisa

Objetivo específico	Como foi atendido	Capítulos
a) Caracterizar o ruído residual, específico e total no entorno do complexo	Medições e modelagem do som residual, específico e total, com caracterização da paisagem sonora	2 e 3
b) Avaliar fatores físicos, operacionais e ambientais que influenciam o ruído	Análise da emissão da fonte, das condições de vento, da distância e da cobertura vegetal	2, 3 e 4
c) Investigar a percepção de incômodo das comunidades	Levantamento socio acústico pela ABNT NBR ISO 15666, em delineamento controlado antes e depois	7
d) Analisar variáveis individuais, psicoacústicas, psicossociais e construtivas	Triagem de baixa frequência e análise da sensibilidade individual e do modelo construtivo como moderadores	5 e 7
e) Comparar abordagens técnicas e normativas nacionais e internacionais	Cotejo entre normas brasileiras e referenciais internacionais ao longo da caracterização e do guia	2, 5 e 8
f) Implementar e avaliar estratégias de mitigação	Avaliação da vegetação como mitigação na trajetória e do isolamento de fachada no receptor	4 e 6
g) Propor um guia técnico-operacional de gestão	Consolidação das ferramentas validadas em metodologia de gestão integrada em cinco eixos	8
h) Fornecer subsídios para a gestão socioambiental e regulatória	Recomendações para o setor e para os órgãos ambientais e síntese integradora final	8 e 9

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

4 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

As contribuições desta dissertação podem ser organizadas em quatro planos complementares, que decorrem diretamente da articulação dos resultados.

4.1 Contribuição científica

No plano científico, esta pesquisa amplia a base de evidências técnicas sobre o ruído ambiental em complexos eólicos ao investigar um contexto ainda pouco explorado na literatura, o semiárido nordestino brasileiro. Os resultados reforçam o

caráter multifatorial do tema, ao demonstrar que residências localizadas a distâncias semelhantes dos aerogeradores podem apresentar respostas perceptivas distintas, influenciadas pela sensibilidade individual e pelas características construtivas das edificações. Esses achados fortalecem e contextualizam, para a realidade brasileira, o modelo conceitual segundo o qual o incômodo resulta da interação entre a exposição acústica e fatores moderadores de natureza física, ambiental e humana. Adicionalmente, a associação significativa entre a cobertura vegetal nativa e a atenuação do nível de pressão sonora específico, quantificada por meio da integração de medições acústicas de campo e sensoriamento remoto, representa uma contribuição original da pesquisa e amplia as possibilidades de incorporação de soluções baseadas na natureza à gestão do ruído ambiental em empreendimentos eólicos.

4.2 Contribuição metodológica

No plano metodológico, a principal contribuição desta pesquisa reside na integração das dimensões acústica, ecológica, construtiva e perceptiva, possibilitando uma compreensão mais abrangente da exposição ao ruído e da resposta das comunidades do que aquela baseada exclusivamente em indicadores acústicos. A calibração da modelagem por meio de medições de campo, sua validação em larga escala e a adoção de um delineamento do tipo antes e depois com grupo de comparação conferiram robustez às inferências produzidas, embora compatíveis com a natureza predominantemente descritiva do estudo. Em conjunto, esses procedimentos configuram um protocolo metodológico consistente, com potencial de replicação em diferentes contextos de pesquisa e de aplicação na gestão ambiental de empreendimentos eólicos.

4.3 Contribuição aplicada

No plano aplicado, os resultados evidenciaram a viabilidade técnica e social de uma abordagem baseada na avaliação técnica e individualizada da exposição ao ruído, em complemento aos critérios tradicionalmente adotados. O ordenamento acústico fundamentado em modelagem validada permitiu distinguir as residências que demandam intervenções específicas daquelas em que medidas de mitigação socioambientais são suficientes para compatibilizar a permanência dos moradores com a operação dos empreendimentos.

4.4 Contribuição regulatória

No plano regulatório e institucional, este trabalho oferece subsídios técnicos para o aperfeiçoamento das práticas de avaliação e gestão do ruído ambiental em complexos eólicos, ao evidenciar as limitações da adoção exclusiva de critérios baseados em distâncias fixas e ao apresentar, por meio do guia técnico, uma metodologia estruturada para caracterização, planejamento, mitigação e monitoramento. As recomendações dirigidas aos órgãos ambientais, como a incorporação de critérios físicos, ecológicos, climáticos e sociais na definição das áreas de influência e a adoção de estratégias de monitoramento, constituem contribuições que podem subsidiar o aprimoramento dos processos de licenciamento ambiental, das boas práticas setoriais e de futuras discussões técnicas e normativas relacionadas à gestão do ruído ambiental em empreendimentos eólicos.

5 LIMITAÇÕES GERAIS DO ESTUDO

Os resultados devem ser interpretados à luz das limitações do estudo. A pesquisa apoia-se em um único complexo eólico, com aerogeradores de um modelo específico, no semiárido pernambucano, de modo que a generalização de seus parâmetros quantitativos a outros contextos requer cautela. A avaliação da mitigação e da percepção fundamentou-se em um número reduzido de residências, o que restringe as inferências ao plano descritivo e recomenda a ampliação da base empírica. Algumas análises apoiaram-se em referenciais concebidos para outros contextos, como limites de baixa frequência definidos para ambientes internos e normas de desempenho voltadas a edificações novas, cuja utilização cumpriu função de referência e de triagem, sem pretensão de comparação normativa direta.

Além disso, a abordagem perceptiva, embora fortalecida pelo grupo de comparação, não permite isolar plenamente todos os fatores psicossociais envolvidos, e a caracterização do infrassom, conduzida a partir de medições externas, foi tratada de forma exploratória. Essas limitações não comprometem as conclusões centrais, mas delimitam o seu alcance e indicam a direção dos aprimoramentos futuros.

6 RECOMENDAÇÕES E PESQUISAS FUTURAS

A partir das limitações e das lacunas identificadas, recomenda-se, para pesquisas futuras, a ampliação da amostra de complexos eólicos, modelos de

aerogeradores e biomas, de modo a avaliar a aplicabilidade dos resultados em diferentes contextos e consolidar relações dose–resposta mais representativas das condições brasileiras. Recomenda-se, ainda, o acompanhamento longitudinal da percepção das comunidades, de forma a compreender os resultados ao longo do tempo.

No campo aplicado, recomenda-se o aprimoramento das relações dose–resposta para o contexto nacional, a avaliação de métricas complementares ao nível de pressão sonora contínuo equivalente, capazes de representar de forma mais abrangente as características acústicas dos aerogeradores, e a aplicação do guia técnico em diferentes empreendimentos e realidades operacionais, visando avaliar sua robustez, adaptabilidade e potencial de replicação. O avanço dessas linhas de investigação contribuirá para o fortalecimento da base científica e técnica disponível, subsidiando a evolução das boas práticas de gestão, o aperfeiçoamento dos processos de avaliação ambiental e a tomada de decisão por empreendedores, consultores e órgãos ambientais, favorecendo uma gestão cada vez mais sustentável e atual do ruído ambiental associado à geração eólica no Brasil.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação foi investigado o ruído ambiental em complexos eólicos no semiárido nordestino por meio de uma abordagem integrada, contemplando a caracterização da fonte sonora, a propagação acústica, a influência da vegetação nativa, a exposição nas residências, a percepção dos moradores e as dimensões socioambientais relacionadas à gestão do ruído. Os resultados demonstraram que nenhuma dessas dimensões, considerada isoladamente, é suficiente para explicar a complexidade do fenômeno. A compreensão do ruído ambiental em empreendimentos eólicos requer uma abordagem sistêmica, na qual fatores físicos, ambientais, territoriais e sociais interagem para determinar tanto a exposição acústica quanto a forma como ela é percebida pelas comunidades.

O conjunto dos resultados sustenta a tese central de que a gestão do ruído eólico não deve se basear exclusivamente em níveis sonoros ou em distâncias fixas, mas em uma abordagem integrada, baseada em evidências e adaptada ao contexto socioambiental local.

Em conjunto, os resultados demonstraram que a modelagem acústica validada oferece uma abordagem mais precisa, tecnicamente consistente e socialmente mais adequada do que a adoção de raios fixos para definição das áreas de influência sonora. A vegetação nativa e o isolamento acústico das fachadas mostraram-se estratégias complementares e eficazes para a mitigação da exposição ao ruído. A avaliação perceptiva antes e após as intervenções confirmou a efetividade dessas medidas, evidenciando também a importância da sensibilidade individual e das características construtivas das residências na percepção do incômodo. Finalmente, o guia técnico sintetiza e operacionaliza esse conhecimento, transformando as evidências produzidas pela pesquisa em uma ferramenta aplicável à gestão integrada do ruído ambiental em complexos eólicos.

Espera-se que esta dissertação contribua para o avanço do conhecimento sobre o ruído eólico no Brasil, para o aprimoramento das práticas de gestão socioambiental do setor e para a construção de um marco regulatório específico, promovendo a convivência sustentável entre a expansão da energia eólica e o bem-estar das comunidades do semiárido nordestino.

A energia eólica é parte essencial da transição e da segurança energética do Brasil. Reconhecer os desafios socioambientais do setor e buscar soluções técnicas e sociais adequadas à gestão e à mitigação dos impactos dos complexos eólicos foi o que motivou este trabalho e conduziu aos resultados aqui apresentados.

Por fim, para fins de transparência, declara-se que o autor mantém vínculo profissional com empresa do setor de energia eólica. Esse vínculo não influenciou o delineamento do estudo, a coleta, o tratamento e a análise dos dados, a interpretação dos resultados nem as conclusões apresentadas. A pesquisa foi conduzida com base em procedimentos normatizados (ABNT, ISO e DIN) e desenvolvida sob acompanhamento acadêmico contínuo da Escola Superior de Conservação Ambiental e Sustentabilidade (ESCAS/IPÊ) e da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por meio do comitê de orientação, tendo seus resultados submetidos à avaliação de banca examinadora.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 10151: acústica – medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – aplicação de uso geral*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 15575-4: edificações habitacionais – desempenho – parte 4: sistemas de vedações verticais internas e externas*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR ISO 15666: acústica – avaliação do incômodo causado por ruído por meio de pesquisas sociais e socioacústicas*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

AYLOR, D. Noise reduction by vegetation and ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 1B, p. 197–205, 1972.

BERTAGNOLIO, F.; HERR, M.; MADSEN, K. D. A roadmap for required technological advancements to further reduce onshore wind turbine noise impact on the environment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 12, n. 3, 2023.

BOTELHO, A.; AREZES, P.; BERNARDO, C.; DIAS, H.; COSTA PINTO, L. M. Effect of wind farm noise on local residents' decision to adopt mitigation measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 14, n. 7, 2017.

GUSKI, R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, v. 1, n. 4, p. 45–56, 1999.

HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. *Wind farm noise: measurement, assessment and control*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 9613-2: acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors – part 2: general method of calculation*. Geneva: ISO, 1996.

MANOHARE, M.; GUERRERO, S. G.; O'HORA, D.; KING, E. Noise annoyance mapping for wind turbines: a psychoacoustic approach incorporating noise sensitivity. *Applied Acoustics*, v. 248, 2026.

MÜLLER, F. J. Y.; LESCHINGER, V.; HÜBNER, G.; POHL, J. Understanding subjective and situational factors of wind turbine noise annoyance. *Energy Policy*, v. 173, 2023.

PEDERSEN, E.; PERSSON WAYE, K. Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 6, p. 3460–3470, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Environmental noise guidelines for the European Region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.

GLOSSÁRIO

Infrassom	Ruído inaudível abaixo de 20 Hz
Som Específico	Ruído gerado pelo parque eólico
Som Residual	Ruído ambiental existente sem a operação dos aerogeradores
Som Total	Combinação entre ruído residual e específico