

Eduardo Pereira da Luz

Simulação do ruído de aerogeradores em parques eólicos

Brasil
29 de junho de 2018

Eduardo Pereira da Luz

Simulação do ruído de aerogeradores em parques eólicos

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Civil.

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Graduação em Engenharia Civil
Orientador: Erasmo Felipe Vergara Miranda

Brasil
29 de junho de 2018

Eduardo Pereira da Luz

Simulação do ruído de aerogeradores em parques eólicos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 29 de junho de 2018:



Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Lamberts
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Marcelo Mohr
Eletrosul Centrais Elétricas S.A.

*Este trabalho é dedicado àqueles que, com ou
sem talento, lecionam por amor.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Edson e Lucinéia, por todo o amor, compreensão e apoio incondicional em todos esses anos. Se hoje aqui estou, foi por formarem as bases que permitiram que eu pudesse crescer e amadurecer, emocional, social e intelectualmente.

À Bruna, fundamental nessa jornada, por todos esses anos de apoio e compreensão, por estar lá, precisando ou não, podendo ou não, e que nenhum desencontro foi capaz de separar, e que da essência me sinto completamente refém.

Aos amigos, que fizeram essa árdua jornada infinitamente mais prazerosa. À Mel e ao Augusto, pelos momentos vividos e a viver; ao Igor e Aragon, pela parceria de sempre; à Sofia, Bruno e Márcio, fundamentais na reta final do curso; bem como a todos os outros colegas e companheiros, que de alguma forma fizeram meus dias mais leves.

Ao orientador Erasmo Vergara, pelo apoio e por ser sempre solícito, presente e por ter confiado a mim tão importante trabalho.

À todo o corpo técnico da Eletrosul Centrais Elétricas, em especial ao engenheiro Marcelo Mohr, supervisor de estágio, sempre solícito para explicar os objetivos dos serviços e as burocracias brasileiras, e cuja atuação ética foi imprescindível para a desconstrução da visão negativa em relação ao serviço público brasileiro.

Ao professor Raymundo Baptista, por ter sido essencial na formação moral e científica, cujos encontros, apesar de curtos, tiveram grande influência no meu conhecer Ciência.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por ser uma instituição de excelência e por aqueles que, direta ou indiretamente, são responsáveis pela manutenção da mesma.

À CAPES, por ter proporcionado um intercâmbio à Alemanha, através do programa Ciências sem Fronteiras. Todo dinheiro gasto em educação tende a voltar em quádruplo, e iniciativas como essas são sempre um passo na direção correta.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão dessa jornada.

*"Nullius addictus iurare in verba magistri, — quo me cumque rapit tempestas, deferor
hospes."*

— Quintus Horatius Flaccus

Resumo

A energia eólica é conhecida como uma energia limpa e renovável, mas também possui aspectos negativos. Um dos impactos ambientais, que é inerente ao funcionamento de um parque eólico, é o ruído produzido pelos aerogeradores. Dependendo da posição das turbinas eólicas e de outros fatores meteorológicos, o ruído pode gerar incômodo na população residente nos parques e arredores. Em prol de garantir o conforto acústico dos residentes, utilizam-se métodos de predição dos níveis de pressão sonora para verificar se os limites estão sendo respeitados, assim como para implementar projetos de parques eólicos visando atender exigências de órgãos ambientais. Neste estudo, foi aplicado o método de cálculo da norma ISO 9613-2 para análise da propagação do ruído ao ar livre para representar o ruído de aerogeradores num parque eólico da região sul do Brasil. Inicialmente, implementou-se um modelo mediante um código desenvolvido com o programa MatLab, que foi validado com os resultados dos métodos Harmonoise e da equação da onda. Através do algoritmo, validaram-se os resultados do *software* de simulação computacional WindPRO. No modelo de propagação do ruído ao ar livre, foi assumida uma altura de um aerogerador de 80 m, níveis de potência sonora em bandas de frequências de oitava (63 a 8.000 Hz) com valor global de 108 dB(A), alturas do receptor de 1,5 m e 4 m, distâncias entre o aerogerador e o receptor (exterior de residência) entre 0,5 km e 1,5 km e um terreno plano com características de solo duro e macio. Posteriormente, foi modelado acusticamente um parque, a partir de dados de um projeto real com múltiplos aerogeradores, pelo método da ISO 9613-2, com auxílio do programa WindPRO. Nessa simulação, 75% das residências estavam expostas a valores de ruído superiores aos recomendados pela norma NBR 10151. Foram avaliados, ainda, os níveis de pressão sonora no receptor considerando a variação de distâncias fonte-receptor e de superposição dos aerogeradores. Foram observadas variações de até 10,5 dB(A) para os níveis de pressão sonora no receptor, com velocidades do vento variando entre 3 m/s e 8 m/s, bem como o fato que aerogeradores a mais de 1.000 m pouco influenciam no ruído total. Por fim, medições *in loco* foram feitas, e os resultados preliminares apontaram que o modelo, em termos de engenharia, é satisfatório.

Palavras-chaves: simulação, níveis sonoros, aerogeradores, parque eólico.

Abstract

Wind energy is well known for being a renewable and clean energy, but it also presents negative aspects. One of the environmental impacts is the noise produced by wind turbines, which is something inherent to its operation. Depending on the position of the wind turbines and other meteorological aspects, the noise can create discomfort for the population living near the wind farms and surroundings. In order to guarantee the acoustical comfort of the residents, sound pressure level prediction methods are used to verify if the limits are being respected, and also to implement wind farms designs which seek to meet the requirements of environmental agencies. In this study, the calculation method of ISO 9613-2 was applied to the analysis of noise propagation through open air to represent the noise of wind turbines in a wind farm in the southern region of Brazil. Initially, a model was implemented using a code developed with MatLab software, which was validated with the results of the Harmonoise method and the wave equation. Via the code, the results obtained by the software WindPRO were validated. In the model of noise propagation through open air, it was assumed a 80 m high wind turbine, sound pressure level in octave band frequencies (63 a 8000 Hz) with a global value of 108 dB(A), receptor heights varying from 1.5 m to 4 m, distances between wind turbine and receptor (outside of residence) between 0.5 km and 1.5 km, and a plain terrain with hard and soft characteristics. Afterwards, a wind farm was acoustically modeled from existing data from a real project with many wind turbines, by the ISO 9613-2 methods, assisted by WindPRO software. In this simulation, 75% of the residences were exposed to noise values higher than the ones recommended by the Standard NBR 10151. Sound pressure levels on the receptor were evaluated, considering the varying font-receptor distances and the overlaid wind turbines. Variations up to 10.5 dB(A) were observed for the sound pressure levels on the receptor, with wind velocities going from 3 m/s to 8m/s. It was also noted that wind turbines further than 1000 m have a very small impact on the total noise. At last, field evaluations of the sound pressure level were made, and the early results showed that the model, in an engineering sense, is satisfactory.

Key-words: simulation, sound levels, wind turbines, wind farms.

Lista de Figuras

Figura 1 – Velocidades calculadas para diferentes gradientes de vento.	28
Figura 2 – Esboço do dispositivo descrito por Heron de Alexandria no seu <i>Pneumatica</i> , possivelmente no primeiro século d.c. (a) Um rotor que movimenta um disco com quatro cavilhas, repetidamente levantando um pistão em uma bomba pneumática. (b) O mesmo dispositivo, mas construído com um moinho d'água. (c) Desenho de Heron do mastro.	29
Figura 3 – Moinho vertical.	30
Figura 4 – Moinho construído por Charles Francis Brush.	31
Figura 5 – Crescimento cumulativo de energia eólica instalada desde 2001.	31
Figura 6 – À esquerda: instalação de usinas no ano de 2017. À direita: os 10 países com maior potência instalada de energia eólica em 2017.	32
Figura 7 – Dispositivos que usam a força de arraste.	34
Figura 8 – Desenho técnico dos sistemas de um aerogerador, responsáveis pela conversão de energia cinética em energia elétrica.	34
Figura 9 – Turbina eólica com eixo horizontal.	35
Figura 10 – Fluxo de potência eólica no Brasil.	37
Figura 11 – Direções predominantes do vento no Brasil.	38
Figura 12 – Fluxo de potência eólica na região Sul.	39
Figura 13 – Os 10 maiores produtores de energia eólica em megawatts (MW) de janeiro a julho de 2017.	41
Figura 14 – Contribuição de cada componente para o ruído total de um aerogerador.	42
Figura 15 – Contribuição de pressão sonora dos componentes para uma turbina de 75 kW.	43
Figura 16 – Pressão sonora típica de uma turbina eólica, incluindo caixa de engrenagens.	43
Figura 17 – Fluxo típico perto da turbina de um aerogerador.	44
Figura 18 – Passagem do fluxo de ar e formação de <i>wakes</i> nos aerogeradores.	47
Figura 19 – Ruído por influxo de turbulência, baixa e alta frequência.	49
Figura 20 – Ruído de bordo de fuga.	50
Figura 21 – Ruído por desprendimento de vórtices na camada limite no regime laminar.	51
Figura 22 – Ruído da ponta.	51
Figura 23 – Ruído de separação / ruído de fluxo estolado.	52
Figura 24 – Ruído por bordo de fuga rombudo.	52
Figura 25 – Ruído devido às imperfeições na superfície.	53
Figura 26 – Propagação esférica.	58
Figura 27 – Influência do gradiente de velocidade do vento V_W e do gradiente de temperatura $\frac{dT}{dz}$ na propagação de ruído.	62
Figura 28 – Reflexão do solo na propagação das ondas.	63

Figura 29 – Efeito de screening: (a) visão em perspectiva e (b) plano de projeção perpendicular à barreira. A soma dos ângulos ($\gamma + \Theta$) é igual ao ângulo de refração da onda.	65
Figura 30 – Efeito da barreira na difração das ondas para diferentes frequências.	66
Figura 31 – Regiões distintas que determinam a atenuação do solo.	70
Figura 32 – Método de cálculo para o cálculo da altura média.	72
Figura 33 – Dimensão horizontal da barreira acústica normal à direção da linha de propagação.	73
Figura 34 – Dimensão horizontal da barreira acústica normal à direção da linha de propagação.	75
Figura 35 – <i>Prompts</i> de comando do algoritmo.	75
Figura 36 – Dados de saída do algoritmo.	76
Figura 37 – Mapa de ruído com os aerogeradores (estrutura triangular em vermelho) e as residências (círculos vazados em rosa).	78
Figura 38 – Esboço da posição dos aerogeradores no parque eólico em relação às residências.	94
Figura 39 – Valores dos níveis de pressão sonora no exterior das residências obtidos da simulação com WindPRO.	97
Figura 40 – Casa típica da região, rodeada por árvores.	97
Figura 41 – Mapa de ruído do parque eólico.	98
Figura 42 – Nível de pressão sonora, nas residências, para diferentes velocidades do vento.	99
Figura 43 – Localização da residência 5 no parque eólico.	101
Figura 44 – Localização da residência 17 no parque eólico.	101
Figura 45 – Simulação de uma casa e aerogeradores (AE) a 400 m de distância.	103
Figura 46 – Simulações realizadas para o estudo.	105
Figura 47 – Estação de monitoramento de ruído e estação meteorológica. a) Estação meteorológica. b) Aerogerador. c) Caixa de armazenamento. d) Microfone.	108
Figura 48 – Equipamentos de medição de ruído. a) Sonômetro. b) Unidade externa DMK01. O microfone fica dentro da carcaça de aço, aproximadamente na altura indicada. c) Estação meteorológica.	108
Figura 49 – Posição do ponto de medição.	109
Figura 50 – Posição do ponto de medição durante o período 15 a 22 de maio de 2018.	110
Figura 51 – Média diurna e noturna dos níveis de pressão sonora por bandas centrais de frequência, em 1/3 de oitavas.	114

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Potência instalada das regiões do Brasil.	38
Tabela 2 – Número de usinas por estado.	40
Tabela 3 – Valores da simulação do NPS para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.	84
Tabela 4 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo misto e sem obstáculos.	85
Tabela 5 – Diferença na atenuação entre solo acusticamente duro e solo misto para 500 m de distância entre a fonte e o receptor.	85
Tabela 6 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.	86
Tabela 7 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo misto e sem obstáculos.	86
Tabela 8 – Diferença na atenuação entre solo acusticamente duro e solo misto para 1.500 m de distância entre a fonte e o receptor com 1,5 m de altura.	87
Tabela 9 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 4,0 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.	88
Tabela 10 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 4,0 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo misto e sem obstáculos.	88
Tabela 11 – Diferença na atenuação entre solo acusticamente duro e solo misto para 1.500 m de distância entre a fonte e o receptor com 4,0 de altura.	89
Tabela 12 – Diferença de atenuação para altura de receptor 1,5 m ou 4,0 m.	89
Tabela 13 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.	91
Tabela 14 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo misto e sem obstáculos.	91
Tabela 15 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.	92
Tabela 16 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo misto e sem obstáculos.	92

Tabela 17 – Incremento do NPS por faixa de velocidade do vento, para todas as residências do parque eólico.	100
Tabela 18 – Incremento do NPS total com o aumento do número de aerogeradores a 400 m.	103
Tabela 19 – Incremento do NPS total com o aumento do número de aerogeradores a 700 m.	103
Tabela 20 – Incremento do NPS total com o aumento do número de aerogeradores a 1.000 m.	104
Tabela 21 – Incremento do NPS com o aumento do número de aerogeradores, em relação a quatro aerogeradores a 400 m.	106
Tabela 22 – Incremento do NPS com o aumento do número de aerogeradores, em relação a quatro aerogeradores a 700 m.	106
Tabela 23 – Incremento do ruído com o aumento do número de aerogeradores, em relação a um aerogerador a 400 m.	106
Tabela 24 – Comparação entre os valores dos NPS da simulação e das medições.	109
Tabela 25 – Índices estatísticos das medições de ruído para o período diurno, entre 7:00 e 19:00.	111
Tabela 26 – Índices estatísticos das medições de ruído para o período noturno, entre 19:00 e 7:00.	111
Tabela 27 – Valores de $L_{Ad,10min}$ e V_{vest} , em ordem crescente, para o período diurno.	112
Tabela 28 – Valores de $L_{An,10min}$ e V_{vest} , em ordem crescente, para o período noturno.	113

Lista de quadros

Quadro 1 – Valor global de recursos renováveis.	27
Quadro 2 – Mecanismos de ruído aerodinâmico em turbinas eólicas.	45
Quadro 3 – Valores típicos de ruído para diferentes fontes.	54
Quadro 4 – Distância entre as torres eólicas e as residências humanas.	56
Quadro 5 – Atenuação sonora total da atmosfera para uma umidade relativa de 70% e temperatura de 10 °C.	60
Quadro 6 – Resistividade ao fluxo de ar σ para vários tipos de superfícies.	64
Quadro 7 – Coeficiente de atenuação atmosférica.	69
Quadro 8 – Expressões utilizadas para o cálculo da atenuação do solo em bandas de oitavas.	71
Quadro 9 – Ponderação em A.	76
Quadro 10 – Caracterização de som tonal.	80
Quadro 11 – Limites de níveis de pressão sonora em função dos tipos de áreas habitadas e do período	81
Quadro 12 – Valores de pressão sonora por banda de oitava em uma turbina eólica típica.	84
Quadro 13 – Parâmetros utilizados nas simulações de validação.	90
Quadro 14 – Coeficientes de absorção do ar, por frequência.	91
Quadro 15 – Parâmetros utilizados nas simulações de validação.	95
Quadro 16 – Valores dos coeficientes alfa utilizados na absorção atmosférica.	96
Quadro 17 – Níveis de potência acústica (NWS) na fonte.	99
Quadro 18 – Distância e orientação azimutal dos aerogeradores para a residência 5.	100
Quadro 19 – Distância e orientação azimutal dos aerogeradores para a residência 17.	102

Lista de Siglas

AE	Aerogerador
NPS	Nível de pressão sonora
NWS	Nível de potência acústica
RL_{Aeq}	é o limite de nível de pressão sonora
$L_{Aeq,10min}$	é o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A, obtido por integração no tempo de 10 min
$L_{Ad,10min}$	é o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A, obtido por integração no tempo de 10 min, no espectro global, para o período diurno
$L_{An,10min}$	é o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A, obtido por integração no tempo de 10 min, no espectro global, para o período noturno;
$L_{90,10min}$	é o nível excedido durante 90% do tempo, obtido por integração no tempo de 10 min
$L_{50,10min}$	é o nível excedido durante 50% do tempo, obtido por integração no tempo de 10 min
$L_{10,10min}$	é o nível excedido durante 10% do tempo, obtido por integração no tempo de 10 min
V_{vest}	é a velocidade do vento média, medida na estação meteorológica

Sumário

Lista de Figuras	13
Lista de Tabelas	15
1 Introdução	23
1.1 Objetivo geral	24
1.1.1 Objetivos específicos	25
1.2 Justificativa	25
1.3 Organização Textual	26
2 Revisão Bibliográfica	27
2.1 Energia Eólica	27
2.2 Histórico e evolução da energia eólica	28
2.3 Funcionamento de um parque eólico	33
2.3.1 Aerogeradores	33
2.3.2 Infraestrutura de suporte associada	36
2.4 Energia eólica no Brasil	36
2.5 O ruído de turbinas eólicas	39
2.5.1 Ruído mecânico	41
2.5.2 Ruído aerodinâmico	44
2.5.2.1 Ruído de baixa frequência	46
2.5.2.2 Ruído por influxo de turbulência	48
2.5.2.3 Ruído devido ao aerofólio	48
2.6 Efeitos do ruído de aerogeradores em parques eólicos	53
2.7 Modelo de propagação do som ao ar livre	57
2.7.1 Modelo do ruído de turbinas eólicas em parques eólicos	58
2.8 Fatores de atenuação na propagação do ruído em parques eólicos	59
2.8.1 Divergência geométrica	59
2.8.2 Absorção atmosférica	59
2.8.3 Condições meteorológicas	60
2.8.4 Efeitos do solo	63
2.8.5 Barreiras acústicas	64
2.8.6 Efeitos miscelâneos	66
3 Metodologia	67
3.1 Norma ISO 9613	67
3.1.1 Descrição do método de cálculo	67
3.1.2 Cálculo dos fatores de atenuação sonora	68
3.1.3 Condições meteorológicas C_{met}	72
3.1.4 Limitações da ISO 9613-2	73
3.2 Descrição do algoritmo desenvolvido baseado na ISO 9613-2	74
3.3 Descrição básica do programa WindPRO	75

3.3.1	Módulo DECIBEL	76
3.3.2	Implementação do método ISO 9613-2 General	78
3.3.3	Simulações	80
3.3.4	Resultado final	82
4	Resultados	83
4.1	Validação do algoritmo desenvolvido	83
4.2	Validação de resultados do WindPRO	88
4.3	Modelagem acústica de um parque eólico segundo o WindPRO	92
4.3.1	Parâmetros de entrada	93
4.3.2	Níveis de pressão sonora no exterior das residências	96
4.3.3	Mapa de ruído	96
4.4	Influência da velocidade do vento no NPS total	98
4.5	Incremento do NPS pelo aumento do número de aerogeradores	102
4.6	Medições	107
5	Considerações Finais	115
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	116
	Referências Bibliográficas	119
	Apêndices	125

Capítulo 1

Introdução

A energia eólica é uma das energias menos prejudiciais ao meio ambiente, sendo virtualmente inesgotável, limpa, distribuída igualmente por todo o globo terrestre, sem produção de gases do efeito estufa e sem utilização de água. Devido a pouca necessidade de área, em relação a outros empreendimentos de energia, parques eólicos são tipicamente instalados em terra, em regiões com regime de vento favorável, sendo uma fonte relativamente barata de obtenção de energia, competitiva financeiramente com as usinas termoeletricas alimentadas por carvão ou petróleo (THE GUARDIAN, 2018).

No Brasil, a Resolução da Comissão Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 462 de 2014, estabeleceu critérios e procedimentos do licenciamento de parques eólicos instalados em terra, contribuindo como base legal para que investidores do setor de energia elétrica possam participar em empreendimentos no Brasil. Assim, os empreendimentos eólicos destinados ao fornecimento de energia devem considerar os impactos ambientais que podem ser provocados por parques eólicos.

Hoje em dia, o Brasil conta com 12,7 GW de energia eólica instalada, porém já possui mais de 5 GW de energia em construção ou contratada, o que significa que, até 2023, o país vai contar com mais de 18 GW, sem considerar os próximos leilões. Com esses valores, irá se produzir mais energia eólica do que Itaipu, que produz cerca de 14 GW (ABEEÓLICA, 2018).

Por ser praticamente¹ livre da emissão de gases do efeito estufa, a geração de energia eólica é tida como benéfica, não provocando chuvas ácidas e não gerando poluição radioativa, uma vez que não há a geração de nenhum subproduto poluente. Além disso, a energia eólica também apresenta vantagens em relação a outras fontes renováveis. Evita-se, em relação a empreendimentos hidrelétricos, as desapropriações e o remanejamentos de pessoas, bem como a inundação de vastas áreas; em relação a utilização da biomassa, a desflorestação, além da dificuldade no armazenamento e transporte dos produtos; e em relação a energia solar, a impossibilidade de gerar energia à noite.

Adicionalmente, é notável o desenvolvimento socio-econômico que esses empreendimentos trazem, tornando-se verdadeiros pólos geradores de emprego, visto que projeto, fabricação e a manutenção desses parques demandam mão-de-obra especializada. Um outro fator, de grande importância social, é que fazendas eólicas normalmente são implantadas em áreas rurais,

¹ Há emissão de gases do efeito estufa na fabricação dos componentes e equipamentos.

afastadas dos grandes centros urbanos, contribuindo, assim, para o desenvolvimento dessas áreas (CUSTÓDIO, 2013).

Entretanto, ainda há alguns desafios inerentes a energia eólica. Um dos mais óbvios, e possivelmente insolúvel, é a característica intermitente dos ventos. Apesar de, em grandes escalas temporais, observar-se certa constância nos ventos, em escalas curtas de tempo é nítida certa variabilidade. Isso, hoje, reserva à energia eólica uma posição de energia complementar, uma vez que não há garantia de geração contínua de energia. Além disso, um outro grande problema dos aerogeradores é o ruído em residências próximas.

O problema do ruído em aerogeradores é bem documentado na literatura, de forma que as primeiras reclamações datam da mesma época que os primeiros parques eólicos foram instalados (CHAPMAN & CRICHTON, 2017). Vários estudos registraram problemas de distúrbios de sono, náuseas, vômitos, dores de cabeça, zumbidos, tonturas, taquicardias, irritabilidade e problemas de concentração e memória após a instalação de parques eólicos nas regiões. Esses efeitos parecem ser oriundos das baixas frequências² do ruído no ouvido interno. Com o intuito de diminuir essas ocorrências, agências internacionais, como a UK Noise Association, começaram a recomendar distâncias mínimas das casas até os aerogeradores, que, muitas vezes, são de ordem puramente empírica (FILHO & AZEVEDO, 2013).

No Brasil, não há normativa específica que aborde o problema do ruído em parques eólicos. Por isso, ocorre a aplicação dos limites de pressão sonora trazidos pela NBR 10151. Todavia, essa norma não leva em consideração a dinamicidade do ruído produzido pelos aerogeradores, que é influenciado pelo vento. Apesar do processo de atualização da norma, até a última versão³, a mesma mantém seu caráter geral, trazendo valores fixos que devem ser respeitados por empreendimentos que gerem ruído.

É importante salientar que a exigência por um estudo mais profundo dos ruídos desses parques pelos órgãos ambientais, como requisito para conseguir uma licença de operação, é recente, e, por isso, posterior ao esforço de modernização da norma. Também por isso, são escassos, tanto a literatura nacional sobre o tema, quanto legislação específica que trate desse problema. O presente trabalho tem como objetivo, além da realização de um estudo específico, expandir a literatura nacional sobre o tema, visto a popularidade da energia eólica nos últimos anos e a necessidade de lidar com os impactos que ela gera na população residente próxima a esses iniciativas.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por finalidade simular o ruído gerado pelo funcionamento de um parque eólico em uma zona rural e, com os dados da simulação, comparar-se-á com os limites exigidos pela NBR 10151. Além disso, compreender mais profundamente a relação entre o ruído e o vento.

² Frequências até 200 Hz.

³ Apesar desse processo ter iniciado em 2012, já em junho de 2018 e a norma ainda não apresenta uma versão final.

1.1.1 Objetivos específicos

Para alcançar os objetivos pretendidos, será necessário:

- Elaborar um algoritmo baseado na normativa ISO 9613-2, que será validado com valores da literatura;
- Validar um *software* comercial com os valores do algoritmo desenvolvido a partir do método da ISO 9613-2;
- Modelar acusticamente um parque eólico, a partir de um projeto real de parque eólico na região sul do Brasil;
- Identificar a influência da velocidade do vento no nível de pressão sonora (NPS) que atinge o exterior de residências habitacionais em parques eólicos;
- Identificar a relação entre o incremento no ruído gerado por aerogeradores a distâncias diferentes;
- Avaliar se, mesmo trazendo valores globais, a norma NBR 10151 é adequada para avaliar o incômodo gerado aos residentes dos arredores do parque implantado.

1.2 Justificativa

O avanço da tecnologia permitiu uma maior capacidade computacional, que, por conseguinte, possibilitou o uso da simulação computacional nos mais diversos problemas de engenharia. A simulação é uma ferramenta interessante porque tem o intuito de prever problemas. No caso de um parque eólico, a simulação pode ser utilizada para a modelagem acústica do parque, prevendo os níveis de pressão sonora aos quais os residentes estarão sujeitos. Isso é benéfico em vários níveis, garantindo que haverá o atendimento das exigências dos órgãos ambientais e diminuindo gastos futuros com possíveis tratamentos acústicos para as residências.

A simulação computacional torna-se fundamental, no âmbito dos parques eólicos, quando consideramos que funcionarão, em conjunto, uma grande quantidade de aerogeradores. Tanto a quantidade de aerogeradores que irá influir no ruído de uma residência, quanto a distância que estarão de cada residência é variável, fazendo com que as possibilidades de configuração de um parque eólico sejam virtualmente infinitas. Aliado a todo o processo de sobreposição do ruído, vê-se que qualquer alternativa que tenha como objetivo tratar acusticamente esses empreendimentos precisa, necessariamente, de ajuda computacional.

Há uma infinidade de *softwares* de simulação no mercado, que implementam os mais variados modelos. Há modelos mais gerais, como a ISO 9613-2, e modelos mais restritivos, que foram construídos para simular situações específicas, sendo, assim, mais precisos, como o NORD2000. No presente trabalho, busca-se modelar acusticamente um parque com o modelo trazido pela normativa ISO 9613-2, de 1996. O modelo, apesar de bastante simples, é confiável, como será demonstrado adiante.

1.3 Organização Textual

No Capítulo 2, aborda-se a revisão bibliográfica, que traz os conceitos mais importantes para o trabalho, como o enquadramento da energia eólica no Brasil, a origem do ruído dos aerogeradores e o modelo de propagação do som ao ar livre.

No Capítulo 3, têm-se a metodologia que será utilizada no trabalho, destrinchando o modelo descrito na norma ISO 9613-2, o algoritmo que foi implementado e as principais configurações utilizadas no *software* comercial que foi utilizado.

O Capítulo 4 traz os resultados do trabalho, mostrando todas as simulações, gráficos e tabelas, bem como as discussões referentes aos estudos efetuados. Além disso, esse capítulo também é dedicado às medições em campo do ruído de aerogeradores. Esses dados foram adicionados ao trabalho de modo a enriquecer a discussão e servir como base de comparação dos valores apresentados pelo *software* comercial.

Concluindo o trabalho, o Capítulo 5 traz as considerações finais, apresentando as últimas considerações sobre as simulações e a aplicabilidade da norma NBR 10151 para a avaliação do ruído de parques eólicos. Além disso, apresenta-se uma série de possíveis estudos futuros, tanto no âmbito das simulações quanto no das medições ou entrevistas, que expandam o conhecimento sobre o assunto e auxiliem na correta avaliação do incômodo gerado pela presença de fazendas eólicas próximas a residências.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Energia Eólica

A energia eólica é fruto da passagem do vento através de turbinas eólicas, que gera energia elétrica de forma mecânica. Entretanto, nem toda a energia do vento é possível de ser extraída e transformada em energia elétrica, uma vez que boa parte é dissipada devido a turbulência e fricção com a superfície terrestre. Logo, é importante que diferenciemos entre a energia cinética do vento e o limite de extração dessa energia, ou seja, a quantidade máxima que poderá ser utilizada na conversão em energia elétrica.

Segundo Nelson (2009), de toda a energia solar incidente na Terra, em torno de 2% é convertida em energia do vento, sendo que, desse total, em torno de 35% é dissipada a 1 km da superfície terrestre. O restante está, portanto, disponível para ser convertido em energia elétrica.

Mesmo assumindo um cenário onde apenas 10% da energia de vento é passível de extração, como feito por Gustavson (1978), ainda assim haveria disponível em torno de $1.3 * 10^{14}$ W, suficiente para abastecer o consumo mundial vinte vezes. O Quadro 1 apresenta alguns valores de energias renováveis, de modo a comparar as mesmas.

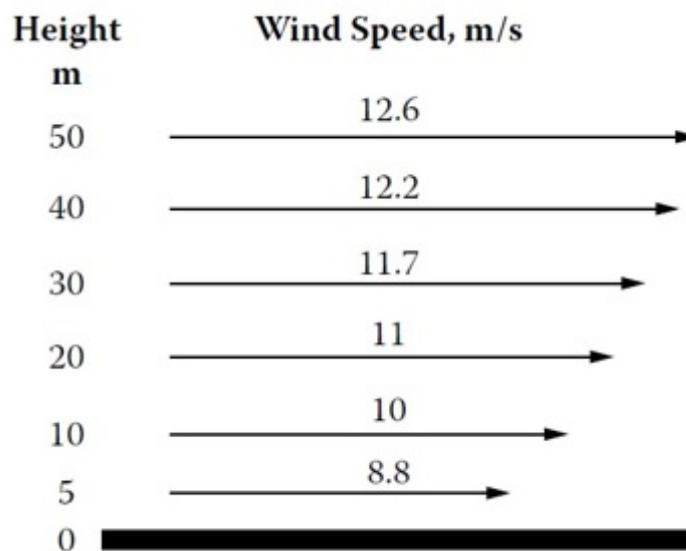
Quadro 1 – Valor global de recursos renováveis.

Tipo	Total	Extraível	
	Energia, W	Energia, W	Energia, quads/ano
Solar	$1,8 * 10^{17}$	-	-
Eólica	$3,6 * 10^{15}$	$1,3 * 10^{14}$	3.900
Hidráulica	$9,0 * 10^{12}$	$2,9 * 10^{12}$	86
Geotérmica	$2,7 * 10^{13}$	$1,3 * 10^{11}$	4
Maremotriz	$3,0 * 10^{12}$	$6,0 * 10^{11}$	1,9

Fonte: Renewable Energy and the Environment (NELSON, 2009).

Um outro fator que deve ser levado em conta é o gradiente do vento (normalmente conhecido como *wind shear*). O gradiente corresponde a mudança de velocidade e direção do vento em relação a uma dada distância, podendo se dividir em gradiente horizontal (*horizontal*

Figura 1 – Velocidades calculadas para diferentes gradientes de vento.



Fonte: Renewable Energy and the Environment (NELSON, 2009).

shear) ou em gradiente vertical (*vertical shear*), ambos fatores importantes para o cálculo de produção de energia de uma turbina eólica (NELSON, 2009).

O gradiente vertical é particularmente importante, pois as velocidades de vento são medidas normalmente em chão ou, como padronizado, a uma altura de 10 m. Porém, as turbinas eólicas normalmente possuem aproximadamente 100 m de altura, de maneira que o vento incidente é consideravelmente maior. A equação que rege o gradiente vertical é

$$v = v_0 * \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (2.1)$$

onde v é a velocidade calculada, v_0 é a velocidade medida, H é a altura desejada e H_0 a altura em que a velocidade do vento foi medida. Para exemplificar, tomando $\alpha = 1/7^1$ e uma velocidade medida de 10 m/s a uma altura de 10 m, podemos encontrar os valores apresentados na Figura 1 (NELSON, 2009).

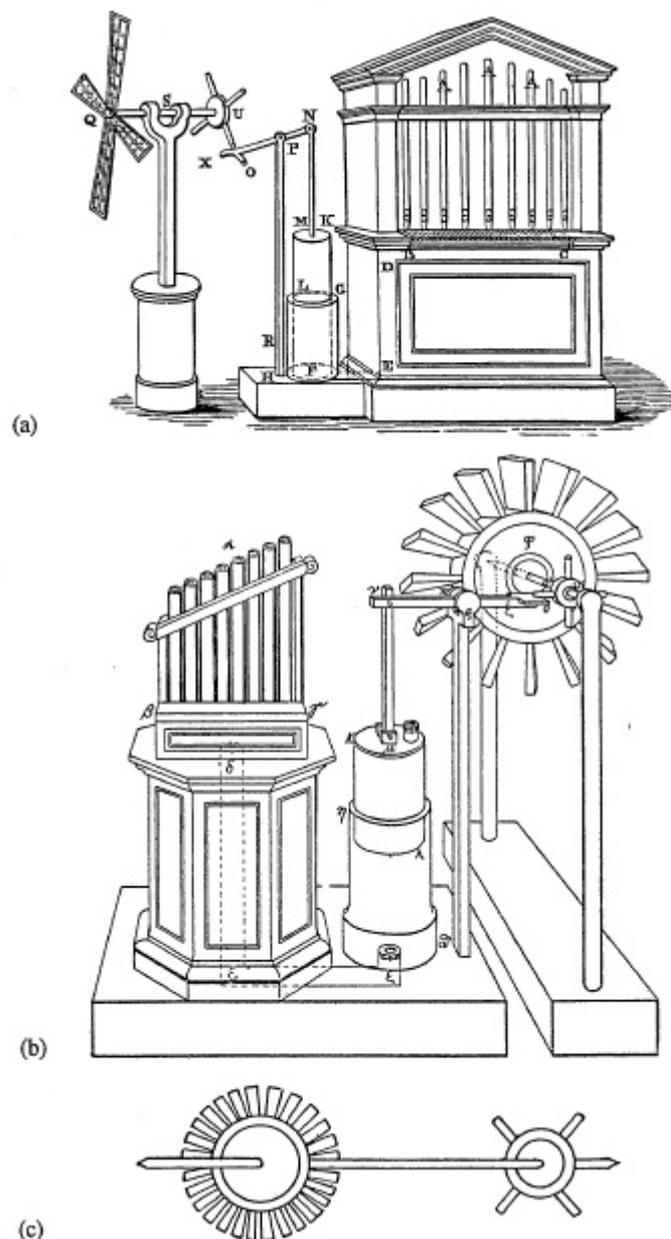
2.2 Histórico e evolução da energia eólica

O vento é usado pela humanidade desde a antiguidade. Foram os egípcios que, em 5000 a.C., construíram os primeiros barcos de navegação movidos a vento. Segundo Sheperd (1990), manuscritos antigos apontam que os primeiros protótipos de moinhos de vento vêm do leste: Índia, Tibet ou Pérsia. Todavia, grande parte desses manuscritos, ainda hoje, encontram certa resistência de estudiosos, já que a maioria recebeu alterações com o passar dos anos.

O documento mais antigo, que descreve de maneira satisfatória a primeira máquina movida a vento, é atribuído a Heron de Alexandria, que descreveu e ilustrou um compêndio de máquinas

¹ Valor condizente com uma atmosfera estável.

Figura 2 – Esboço do dispositivo descrito por Heron de Alexandria no seu *Pneumatica*, possivelmente no primeiro século d.c. (a) Um rotor que movimenta um disco com quatro cavilhas, repetidamente levantando um pistão em uma bomba pneumática. (b) O mesmo dispositivo, mas construído com um moinho d'água. (c) Desenho de Heron do mastro.



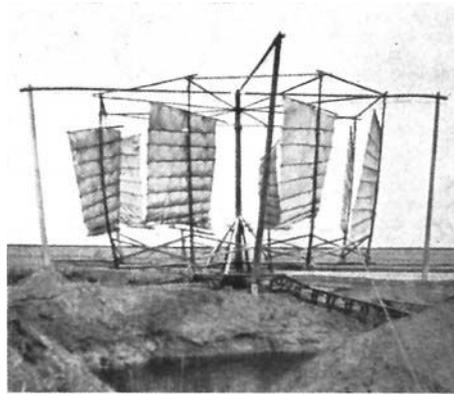
Fonte: Historical Development of the Windmill, 1990.

da antiguidade, denominado *Pneumatica*. Apesar de ser rejeitado por parte dos historiadores, outra parte aceita o trabalho de Heron, mas caracteriza-o como um brinquedo, sem função própria de trabalho, ilustrado na Figura 2. (SHEPERD, 1990).

A primeira evidência aceita para a existência de moinhos de vento vem da Pérsia Antiga, precisamente no século X, na região do Sistão². Esses moinhos verticais eram utilizados tanto para

² Conhecida pelos ventos que podem chegar a 45 m/s.

Figura 3 – Moinho vertical.



Fonte: Historical Development of the Windmill, 1990.

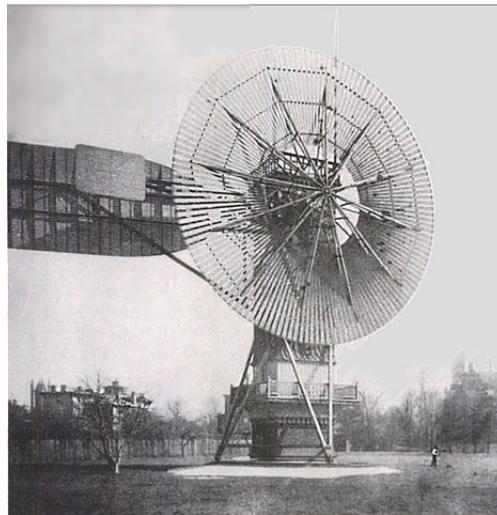
bombear água que seria usada nas plantações quanto para moer grãos. A Figura 3 apresenta o moinho vertical. Evidências sugerem eles se popularizaram por volta do século XII, se espalhando para as terras chinesas. Entretanto, o mistério real surge do fato que essa tecnologia persa não chegou às terras da região noroeste da Europa, que, a partir do século XII, desenvolvia um novo tipo, denominado moinho horizontal.

O moinho da região noroeste da Europa era consideravelmente mais eficiente que o vertical. Apesar de não haver consenso sobre quem construiu o primeiro moinho, eles se espalharam pela França, Alemanha, Países Baixos, Ibéria e Reino Unido no século XIII. Eles se tornaram especialmente importantes nos Países Baixos, sendo utilizados para o processo de drenagem da terra, que fica abaixo do nível do mar. Esse formato de moinho perdurou por 800 anos, naturalmente evoluindo para as turbinas eólicas atuais (SHEPERD, 1990).

Foi em 1887 que James Blyth, engenheiro eletricista de Glasgow, Escócia, inventou a primeira turbina eólica do mundo. Sendo assim, sua casa passou a ser a primeira casa do mundo a ser abastecida com eletricidade através da energia eólica. Um ano depois, em 1888, Charles Francis Brush, engenheiro americano, projetou um moinho de vento maior e mais forte, mostrado na Figura 4 (STAUT, 2011). Esse moinho foi, depois, aprimorado pelo engenheiro dinamarquês La Cour, que realizou uma série de experimentos com modelos de turbinas eólicos em túneis de vento.

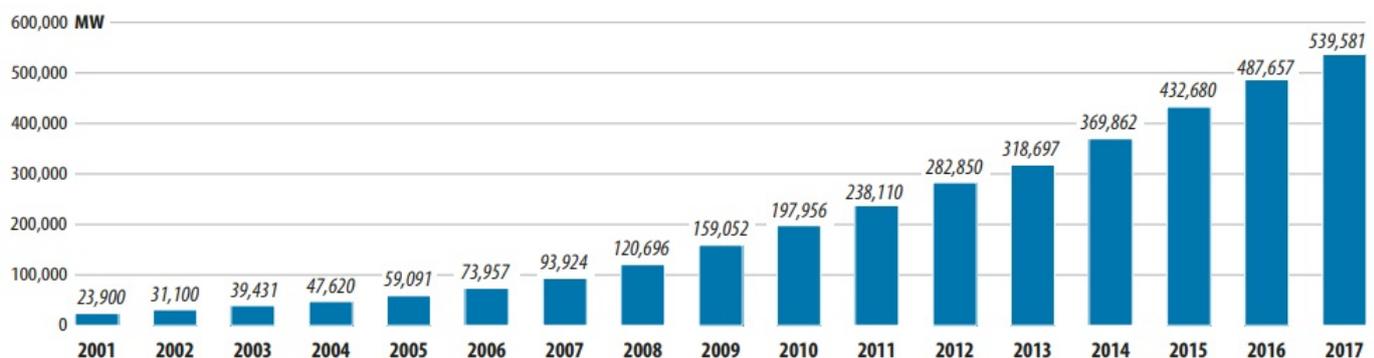
Ainda assim, a tecnologia de turbinas eólicas ficou relativamente estagnada até a década de 80, onde a crise do petróleo incentivou a criação das primeiras fazendas eólicas. Todavia, as fazendas instaladas ainda eram pouco eficientes, onerosas, e requeriam muita manutenção. Isso esfriou novamente a utilização da tecnologia (EL-SHARKAWI, 2016). Foi na década de 90, entretanto, que países como os Estados Unidos, Alemanha e Dinamarca lançaram programas governamentais de incentivo ao desenvolvimento da tecnologia eólica. Esses programas fizeram irromper uma série de empresas no ramo, estimulando a competitividade. Com o avanço tecnológico, a tecnologia dos aerogeradores foi refinada, permitindo a produção em larga escala, melhorando a capacidade de geração das turbinas e reduzindo substancialmente o custo do quilowatt instalado. Essas mudanças possibilitaram à energia eólica, através dos parques eólicos,

Figura 4 – Moinho construído por Charles Francis Brush.



Fonte: Revista Pesquisa FAPESP, 2007.

Figura 5 – Crescimento cumulativo de energia eólica instalada desde 2001.

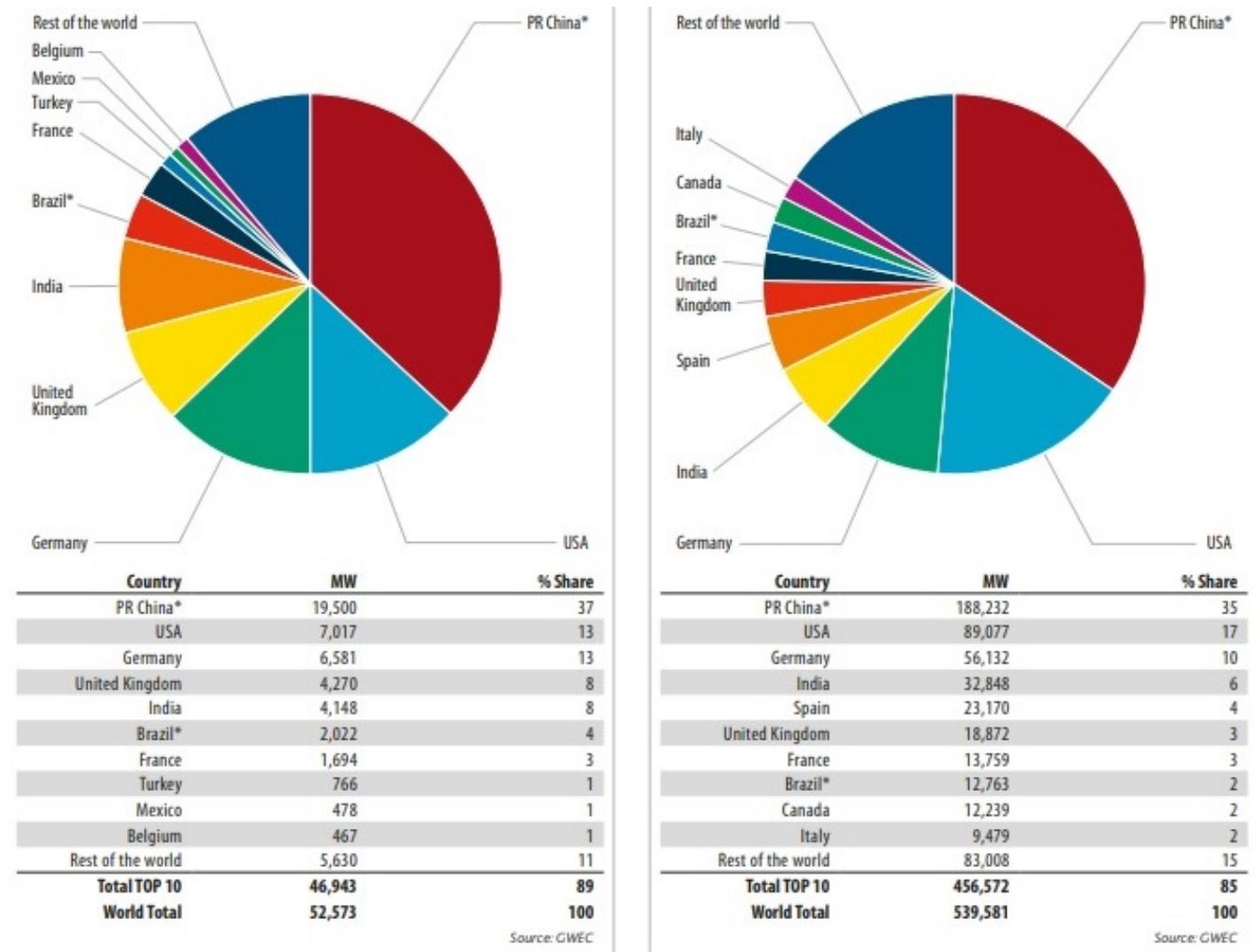


Fonte: Fonte: GWEC, 2018.

tornar-se uma energia renovável competitiva com as outras fontes de energia, estabelecendo a mesma no cenário mundial (CUSTÓDIO, 2013).

Atualmente o mercado das turbinas eólicas é dominado por poucas empresas, notadamente a Siemens-Gamesa (Alemanha/Espanha), General Electric (EUA), Vestas (Dinamarca) e Enercon (Alemanha), que produzem praticamente todas as peças dos aerogeradores. Esse mercado é concentrado, uma vez que barreiras tecnológicas e financeiras dificultam que novos concorrentes entrem no ramo. Os investimentos e incentivos governamentais continuam a estimular o crescimento, culminando, em âmbito mundial, com US\$ 112,5 bilhões investidos em 2016, tornando essa uma das indústrias com maior crescimento no mundo (GWEC, 2018). A Figura 5 permite acompanhar o crescimento da utilização de energia eólica no mundo desde 2001 e a Figura 6 apresenta os novos empreendimentos eólicos inaugurados em 2017, bem como os 10 países com as maiores potências instalada acumuladas em 2017.

Figura 6 – À esquerda: instalação de usinas no ano de 2017. À direita: os 10 países com maior potência instalada de energia eólica em 2017.



* Provisional Number

** The stats include a decommissioning of 648 MW

Fonte: Fonte: GWEC, 2018.

2.3 Funcionamento de um parque eólico

É possível separar um parque eólico de duas formas: o conjunto de aerogeradores e a infraestrutura de suporte associada, que pode ser dividida em subestação elevadora, instalações elétricas e estradas de acesso aos aerogeradores.

2.3.1 Aerogeradores

Segundo Nelson (2009), aerogeradores são classificados conforme a interação das pás com o vento, podendo ser de arraste (*drag*) ou de sustentação (*lift*), ou, ainda, uma combinação das duas formas, e conforme a orientação do eixo do rotor em relação ao chão, podendo ser uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV) ou uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH).

Ainda segundo Nelson (2009), em relação aos dispositivos de arraste, pode-se citar anemômetros, remos e veleiros. Nesses dispositivos, o vento empurra contra a pá ou vela. A velocidade máxima possível, porém, é a própria velocidade do vento, fazendo com que esses dispositivos sejam relativamente ineficientes. Além disso, os dispositivos normalmente são mais complexos para construir, necessitando de uma quantidade maior de peças. Em razão disso, não há turbinas eólicas comerciais que produzam eletricidade a partir da força de arraste do vento. A Figura 7 apresenta o funcionamento desses dispositivos.

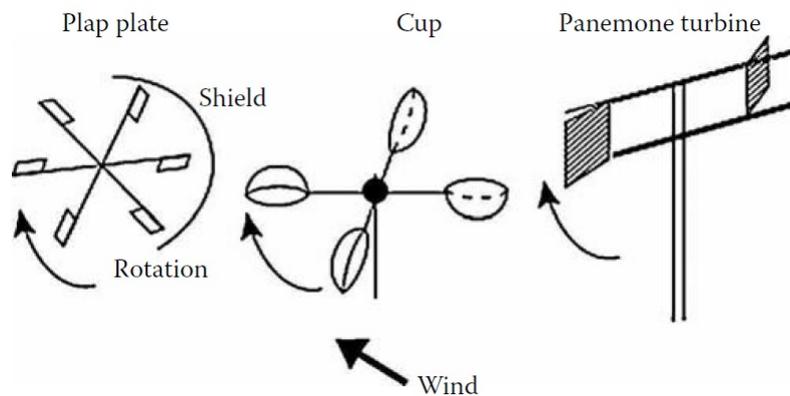
Já dispositivos que utilizam a força de sustentação, por outro lado, apresentam uma série de vantagens. Eles usam comumente aerofólios parecidos com as asas dos aviões, e podem alcançar velocidades superiores a velocidade do vento, além de serem mais eficientes em termos aerodinâmicos e na quantidade de peças necessárias para sua construção.

Uma forma de entender a superioridade dos dispositivos de sustentação é a taxa de velocidade da ponta, ou *tip speed ratio*, que relaciona a velocidade na ponta da pá com a velocidade do vento. No caso dos aerogeradores por sustentação, essa relação chega a 7, ao passo que nos aerogeradores por arrasto, essa relação chega apenas a 0,3. Dessa maneira, uma pá rodando de maneira rápida pode extrair tanta energia do vento quanto seis pás rodando de maneira lenta, sendo um sistema muito mais econômico. Contudo, por razões estruturais, os aerogeradores modernos de sustentação utilizam de duas a três pás, comumente (NELSON, 2009).

Os aerogeradores são normalmente compostos por uma série de dispositivos, como pás, nacele, multiplicador de velocidade, acoplamento elástico, sensores de vento, rotor, gerador elétrico, sistema de freio a disco, torre de sustentação, controle de giro, sistema de controle e sistema de freio aerodinâmico, como descrito por El-Sharkawi (2016). A Figura 8 apresenta esses componentes.

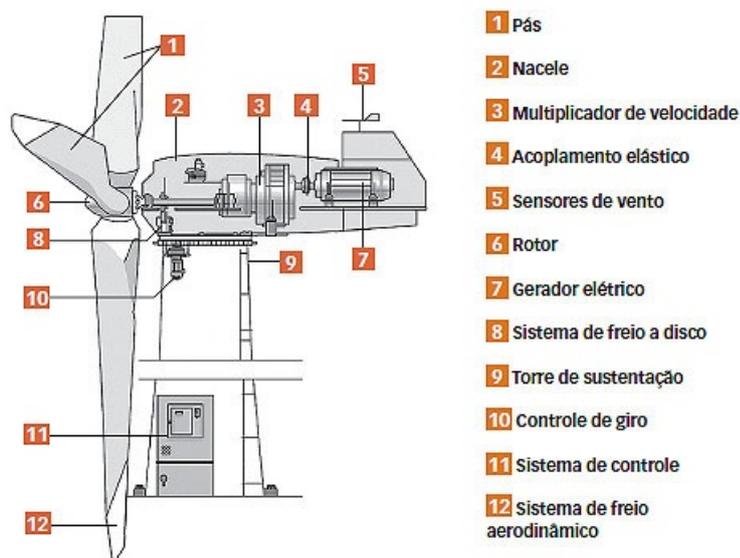
Segundo El-Sharkawi (2016), a torre de sustentação é alta, com o intuito de atingir velocidades maiores e constantes de vento. Algumas torres podem chegar até a 250 m. A torre deve ser capaz de resistir a pesados esforços de cisalhamento e flexão, de modo que o aço é habitualmente utilizado como revestimento e concreto armado para a fundação. Além disso, dentro das torres, há escadas que dão acesso à nacele acima, bem como todo o material de segurança necessário.

Figura 7 – Dispositivos que usam a força de arraste.



Fonte: Renewable Energy and the Environment (NELSON, 2009).

Figura 8 – Desenho técnico dos sistemas de um aerogerador, responsáveis pela conversão de energia cinética em energia elétrica.



Fonte: Infra Estrutura Pini.

As pás são responsáveis pela “captura” da energia cinética do vento. Elas são normalmente feitas de poliéster reforçado com fibra de vidro ou epóxi de madeira, podendo possuir entre 5 e 100 m de comprimento. Uma forma de fortalecer a estrutura é deixando-a una, não havendo, então, junções, que normalmente são pontos de fraqueza na estrutura. Todavia, estudos recentes apontam que é possível seccionar as pás, o que permitiria a instalação de pás muito maiores que as atuais (EL-SHARKAWI, 2016).

A nacele abriga todos os componentes necessários à geração da energia elétrica, bem como todos os aparelhos auxiliares, como controladores, gerador, multiplicador de velocidades, etc.

O controle de giro serve para rotacionar a nacele, de modo que as pás estejam viradas na

Figura 9 – Turbina eólica com eixo horizontal.



Fonte: Turbines Info.

direção de maior aproveitamento da energia do vento (*upwind*, ou “vento contrário”).

O multiplicador de velocidades (*gearbox* ou “caixa de engrenagens”) conecta as pás, que giram a uma velocidade baixa, ao gerador, transformando a baixa rotação das pás em alta rotação para a produção de energia.

O gerador converte a energia mecânica proveniente da alta rotação do multiplicador de velocidades em energia elétrica.

O anemômetro, necessário para encontrar a direção do vento, fica acoplado à nacele. Em turbinas modernas, a adequação da direção da nacele em relação ao vento é feita eletronicamente, a partir de um sinal recebido do anemômetro.

O sistema de freio a disco impede que as pás girem quando as condições meteorológicas não forem apropriadas.

Além desses sistemas, há uma série de componentes eletrônicos que integram a nacele e auxiliam na geração de energia.

As turbinas eólicas com eixo horizontal (TEEHs) são as mais utilizadas hoje em dia. A Figura 9 exibe esse tipo de turbina.

As principais vantagens da turbina eólica de eixo horizontal são a altura, uma vez que podem acessar velocidades maiores de vento em lugares mais altos, e a alta eficiência, já que as pás recebem energia constante do vento e a velocidade das pás, que se mantêm relativamente constante. Como desvantagens, pode-se citar a onerosidade da fundação e dos materiais da torre, as dificuldades na construção e manutenção dos pesados equipamentos da nacele e a necessidade de girar a nacele para sempre extrair o vento mais favorável (EL-SHARKAWI, 2016).

2.3.2 Infraestrutura de suporte associada

Conforme Staut (2011), a infraestrutura associada diz respeito às linhas de transmissão. Ela é feita por rede elétrica subterrânea. Os eletrodutos levam a energia dos aerogeradores até uma subestação elevadora, que situa-se no interior do parque. Nessa subestação, ocorre a normalização da tensão, que a elevará até a tensão de transporte, para então ser transmitida para a rede externa.

É necessário evidenciar que a energia eólica não pode ser armazenada. Isso acontece porque o vento não pode ser “estocado” ou “represado”, ou seja, submete-se o sistema de geração ao movimento do ar, que possui variações diárias incontrolláveis. Nesse cenário, pode-se produzir mais energia do que a demanda momentânea, desperdiçando o excedente. Isso é uma desvantagem em relação a geração de energia hidrelétrica, por exemplo, uma vez que a água pode ser represada. Todavia, tecnologias recentes tentam resolver esse problema criando formas de armazenar indiretamente a energia eólica, de forma mecânica ou elétrica, por meio de motores ou baterias (STAUT, 2011).

2.4 Energia eólica no Brasil

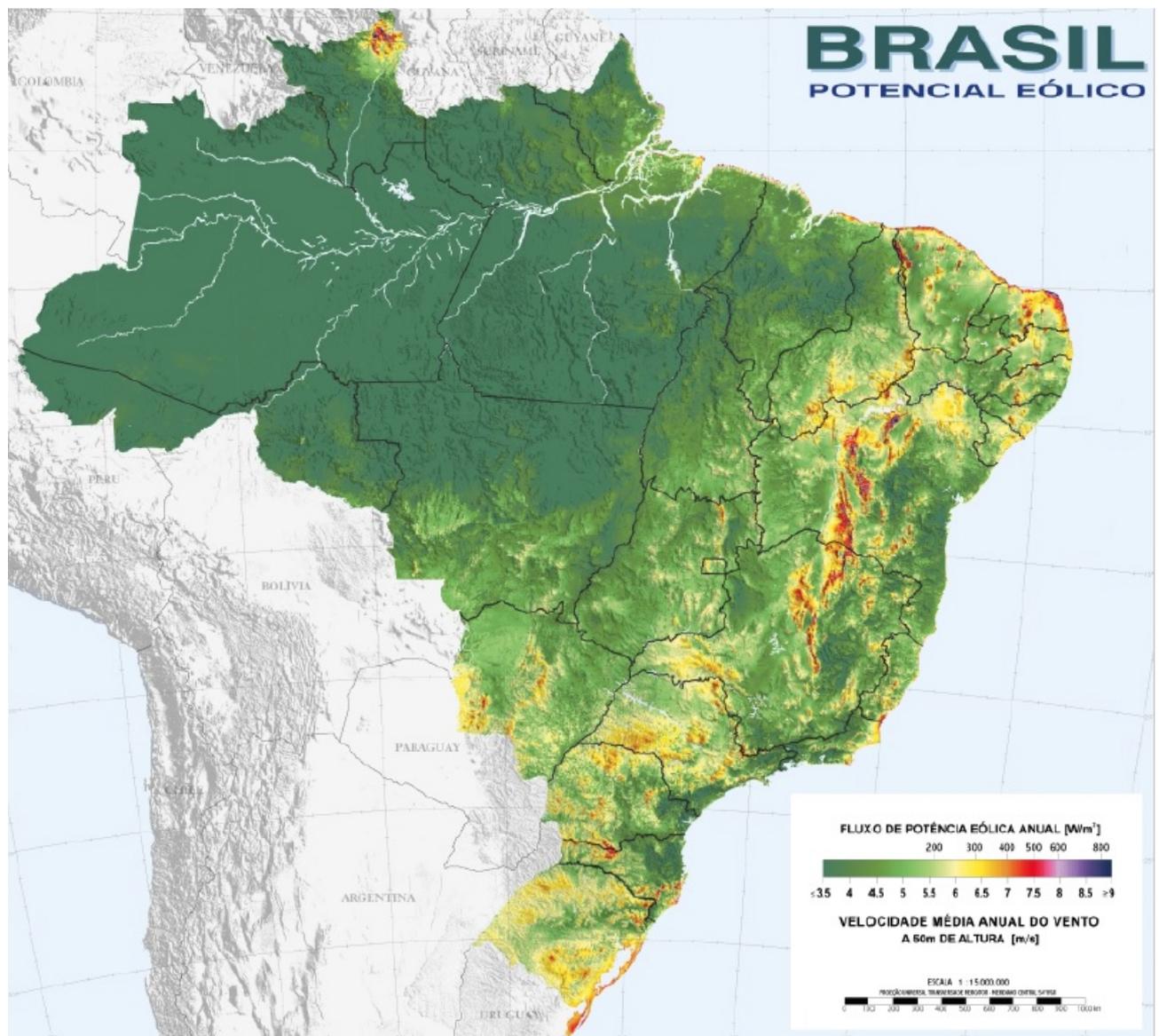
Assim como a maioria dos países do mundo, o Brasil também começou a considerar a energia eólica como forma de produção de energia a partir da década de 70, com a crise do petróleo. Os primeiros estudos surgiram com o IEA/CTA (Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro de Tecnologia Aeroespacial), que testou protótipos de turbinas eólicas em São José dos Campos/SP. Apesar dos testes se mostrarem insatisfatórios devido à falta de qualidade dos materiais, os estudos serviram para impulsionar o interesse da energia eólica no país, culminando com o marco inicial da geração de energia pelo vento, em 1981 (PINTO, 2012).

Em 2001, obteve-se, através de um estudo nacional, um documento denominado “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”. Um conceito interessante que o Atlas trouxe são os mapas do potencial eólico do país. Eles foram confeccionados por região, mostrando o potencial contido no Brasil, sobretudo no Nordeste. Um ponto interessante é o estudo da sazonalidade, que apontou como varia o regime dos ventos conforme as estações do ano, bem como a relação da mesma com o clima de cada região, imprescindível ao considerar um país de dimensões continentais. Para isso, foram criados mapas de temperatura, precipitação e o de vento propriamente dito. A Figura 10 apresenta o fluxo de potência eólica no Brasil e a Figura 11 apresenta as direções predominantes do vento (ATLAS, 2001). A Figura 12 apresenta o potencial eólico da região Sul.

A maior parte das usinas eólicas se encontram no Nordeste, que possui o maior potencial eólico do país, com destaque para o Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia. Essa predominância na região, além das condições favoráveis, advém da imprevisibilidade do fenômeno da estiagem, que pode fazer com que a geração por hidrelétricas e PCHs diminua consideravelmente. Isso aconteceu em 2017, onde, em outubro, incríveis 52,6% de toda a geração da região foi feita por aerogeradores. Em épocas de “safra”, ou seja, quando a constância e a velocidade dos ventos é maior, essa porcentagem pode chegar a 64% de toda a demanda.

No tocante à capacidade instalada, houve um aumento de 935,4 MW em 2010 para 12.352

Figura 10 – Fluxo de potência eólica no Brasil.



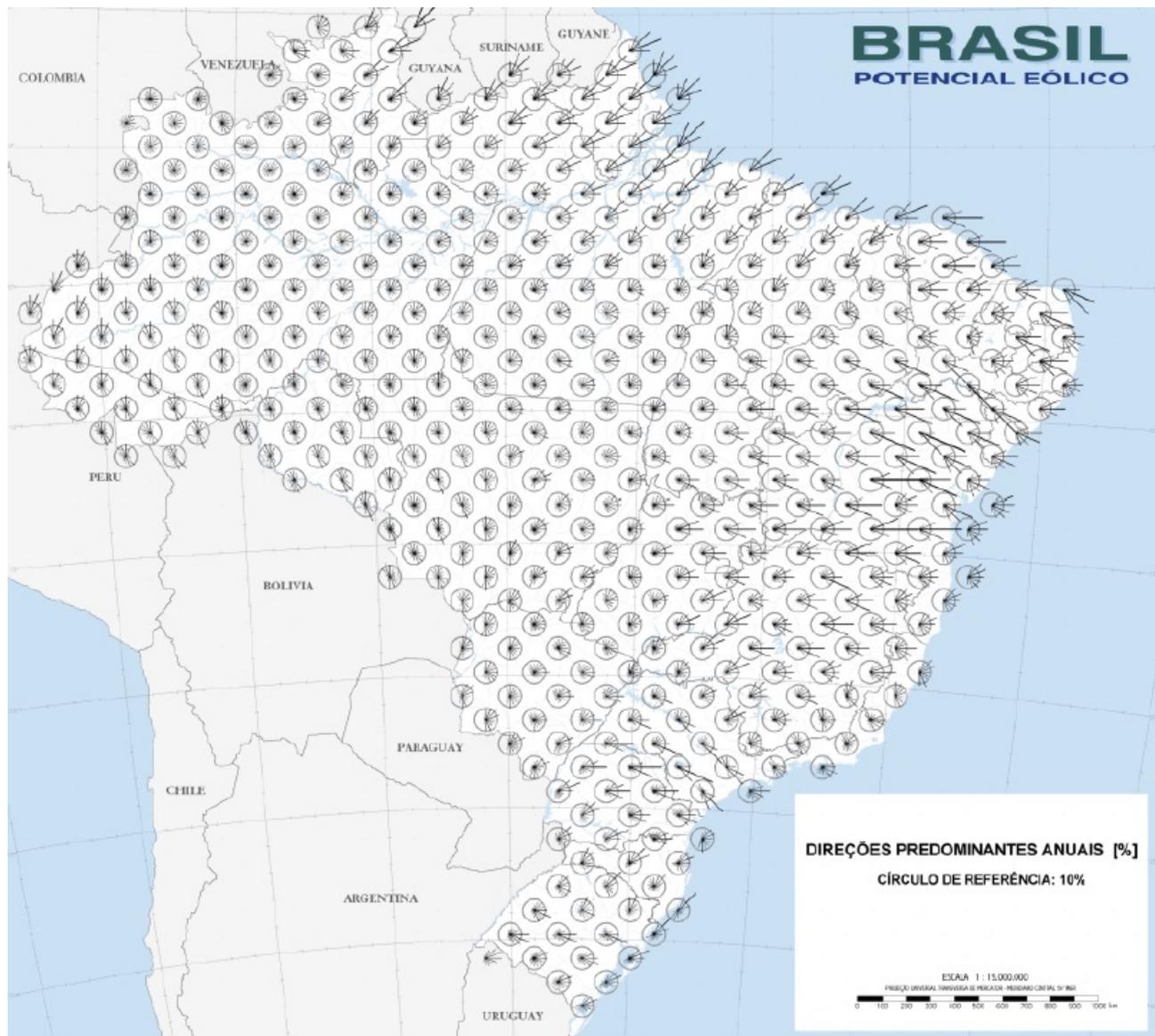
Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

MW em 2017, com um total de 502 usinas, e a previsão de aumento para 17.452 MW em 2020, considerando o que já foi contratado em leilões. Isso representa um aumento de 1.772% em uma década. É projetado, então, mais R\$30 bilhões em investimentos até 2020. A Tabela 1 apresenta a potência instalada de todas as regiões do Brasil, retirada do site da ANEEL (2017).

Já em relação ao número de usinas por estado, a maior parte das usinas se localiza no Nordeste, com um total de 401 usinas. O Sul comporta 98 usinas, sendo que dessas, 81 se encontram no Rio Grande do Sul. A Tabela 2 apresenta a divisão de usinas por estado.

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Eólica (CCEE, 2017), houve um aumento de 55% da produção de energia eólica no ano de 2016 em relação ao ano de 2015. Isso é equivalente a 33,15 terawatts/hora (TWh). Ao comparar o primeiro semestre de 2016 com o primeiro semestre de 2017, há um aumento de 25,3% na geração, o que demonstra a força do

Figura 11 – Direções predominantes do vento no Brasil.



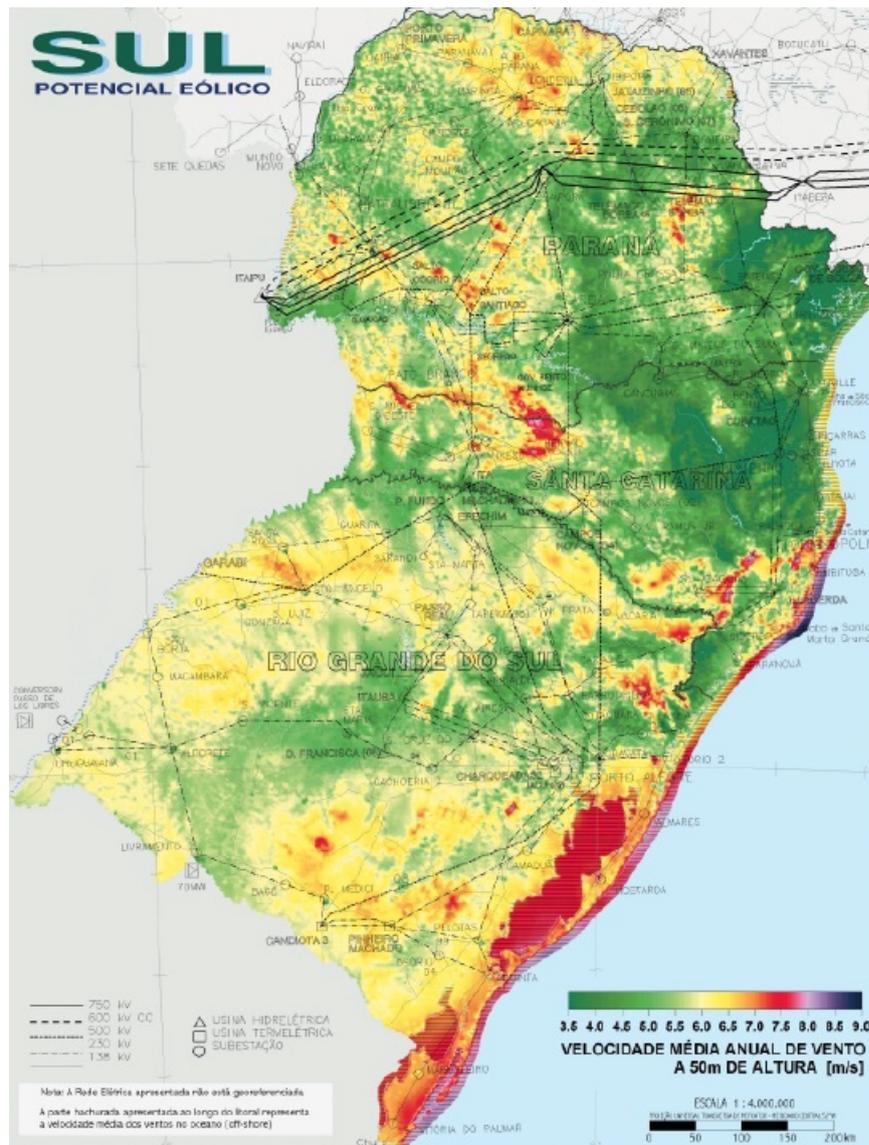
Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

Tabela 1 – Potência instalada das regiões do Brasil.

Região	Potência instalada (kW)	%
Nordeste	10.193.220,63	82,52
Sul	2.130.966	17,25
Sudeste	28.052,24	0,23
Norte	0	0
Centro-oeste	0	0
Total	12.352.238,86	100

Elaborado pelo autor. Fonte: ANEEL, 2017.

Figura 12 – Fluxo de potência eólica na região Sul.



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

setor, em franco crescimento.

Em 2017, as usinas produziram um total de 3.794 MW médios. Desses, 1.227 MW (32,34%) foram gerados pelo Rio Grande do Norte, 819 MW (21,59%) pela Bahia, 565,5 MW (14,9%) pelo Rio Grande do Sul, único estado com fora do Nordeste que busca ativamente a energia eólica, e 494 MW (13,02%) pelo Ceará, como mostra a Figura 13 (CORREIO BRAZILIENSE, 2017).

2.5 O ruído de turbinas eólicas

Uma turbina eólica em operação pode gerar quatro diferentes tipos de ruído: tonal, de banda larga, baixa frequência e impulsivo.

Consoante Tonin (2012), o ruído tonal é definido como ruído em frequências discretas. Esse

Tabela 2 – Número de usinas por estado.

Estado	Número de usinas	Porcentagem
Nordeste	401	79,88%
Rio Grande de Norte	131	26,1%
Bahia	92	18,33%
Ceará	66	13,15%
Piauí	52	10,36%
Pernambuco	35	6,97%
Paraíba	15	2,99%
Maranhão	9	1,79%
Sergipe	1	0,2%
Alagoas	0	0%
Sul	98	19,52%
Rio Grande do Sul	81	16,14%
Santa Catarina	16	3,19%
Paraná	1	0,2%
Sudeste	3	0,6%
São Paulo	1	0,2%
Rio de Janeiro	1	0,2%
Minas Gerais	1	0,2%
Espírito Santo	0	0%
Total	502	100%

Elaborado pelo autor. Fonte: ANEEL, 2017.

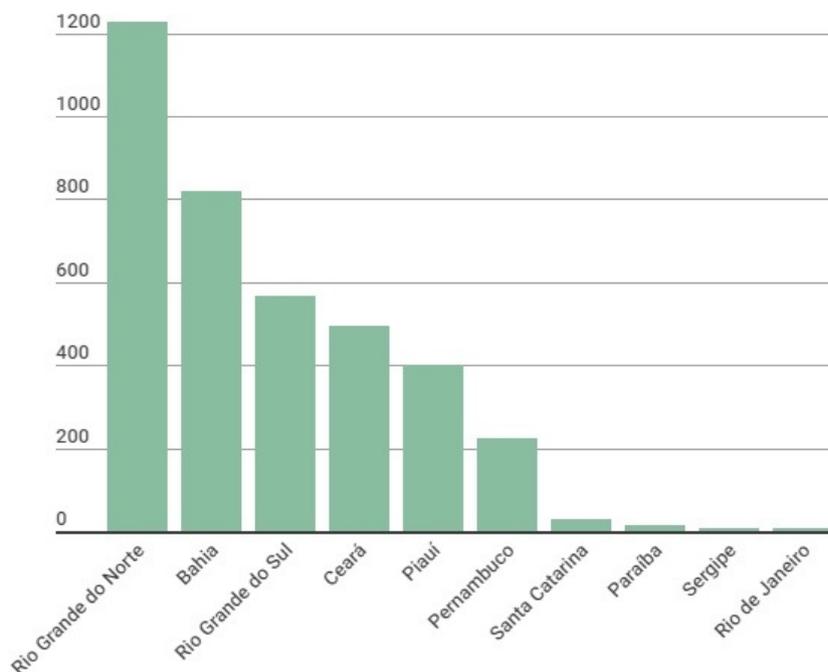
ruído tem como principal causa componentes mecânicos da turbina, oriundo das engrenagens, instabilidades não aerodinâmicas interagindo com a superfície das pás do rotor, fluxos instáveis em furos ou fendas, dentre outros.

O ruído de banda larga é caracterizado por uma distribuição contínua de pressão sonora, e ocorre para frequências maiores do que 100 Hz. A origem desse tipo de ruído é a interação entre a turbulência atmosférica e as pás da turbina eólica.

O ruído de baixas frequências, entretanto, contempla frequências na faixa de 20 a 100 Hz e é mais proeminente em turbinas “a favor do vento” (*downwind turbines*), ou seja, quando o vento vem por trás do rotor. Ele é consequência do encontro entre deficiências no fluxo e as pás da turbina. Há a possibilidade, ainda, da existência de infrassons, caracterizados como sons abaixo dos 20 Hz. Não há, todavia, consenso sobre as fontes que geram o infrassom (TONIN, 2012).

O ruído impulsivo é descrito por impulsos acústicos curtos ou sons de batida que variam em amplitude com o tempo. Assim como o ruído de baixas frequências, ele também se sucede em turbinas a favor do vento, decorrendo da interação entre as pás e o fluxo de ar deformado. Contudo, ele já foi observado em turbinas modernas contra o vento. Apesar dos indícios, ainda há

Figura 13 – Os 10 maiores produtores de energia eólica em megawatts (MW) de janeiro a julho de 2017.



Fonte: Revista Exame, 2017.

certa disputa na literatura sobre o mecanismo preciso de produção do ruído impulsivo (TONIN, 2012).

É possível classificar dois tipos diferentes de ruído: mecânico e aerodinâmico. Pode-se citar, como fontes primárias do ruído mecânico, o gerador e a caixa de engrenagens. O ruído mecânico, ao ser gerado, é transmitido pela estrutura da turbina, para então ser irradiado pela superfície do mesmo. O ruído aerodinâmico, todavia, é causado pelas interações entre fluxos de ar turbulentos e as pás do rotor, sendo, então, irradiado. (ROGERS & MANWELL, 2002).

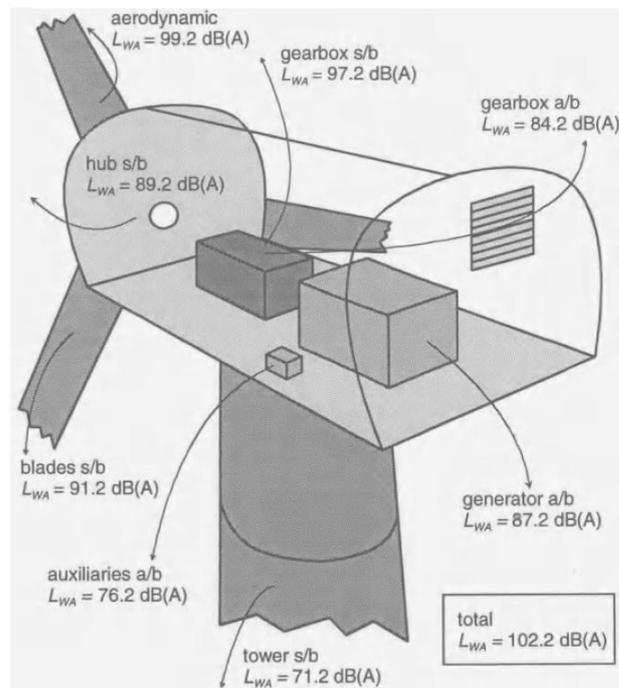
Ruídos mecânicos são normalmente mais fáceis de resolver, de modo que a engenharia estrutural tem relativo sucesso com métodos já bem estabelecidos pela literatura. Do contrário, ruídos aerodinâmicos continuam a ser um problema. Isso é exacerbado pelo fato que turbinas maiores geram maior ruído aerodinâmico, ao passo que o ruído mecânico não varia com o tamanho da mesma (WAGNER *et al.*, 1996).

2.5.1 Ruído mecânico

O ruído mecânico se origina do movimento relativo entre os componentes mecânicos e a resposta dinâmica entre eles, sendo inerentemente tonal. Muitos dos elementos mecânicos da turbina podem causar ruído, com destaque para a caixa de engrenagens, gerador elétrico, refrigeradores (*coolers*), dentre outros componentes auxiliares, em virtude, principalmente, do atrito entre rolamentos e engrenagens que compõem os mesmos.

A transmissão do ruído mecânico para o ambiente acontece de duas maneiras: pelo ar

Figura 14 – Contribuição de cada componente para o ruído total de um aerogerador.



a/b = air-borne, ou ruído propagado pelo ar.

s/b = superficial-borne, ou ruído propagado pela estrutura.

Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

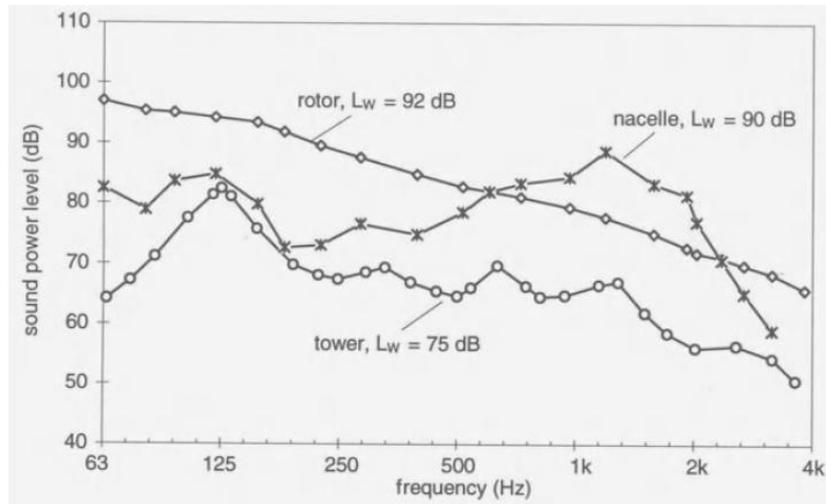
ou pela estrutura. A propagação pelo ar acontece quando o ruído é propagado diretamente do componente mecânico que o originou. Já na propagação pela estrutura, a propagação do componente mecânico acontece pela estrutura da turbina, podendo ser irradiado pelas pás, nacelle ou torre. A Figura 14 exemplifica a contribuição típica de cada componente para o ruído total (WAGNER *et al.*, 1996).

Em conformidade com Maia (2010), algumas técnicas e tecnologias foram implantadas de forma a diminuir o ruído mecânico. Como exemplos, têm-se a melhora na insonorização da gôndola e sistemas de amortecimento de vibrações e cargas. Além disso, houve a substituição dos sistemas de refrigeração a ar, como *coolers*, por sistemas de refrigeração a óleo, eliminando completamente a fonte de ruído.

Porém, aerogeradores menores usualmente não contam com tecnologias específicas de controle de ruído, de modo que é necessário considerar o ruído mecânico, bem como seu comportamento tonal (MAIA, 2010).

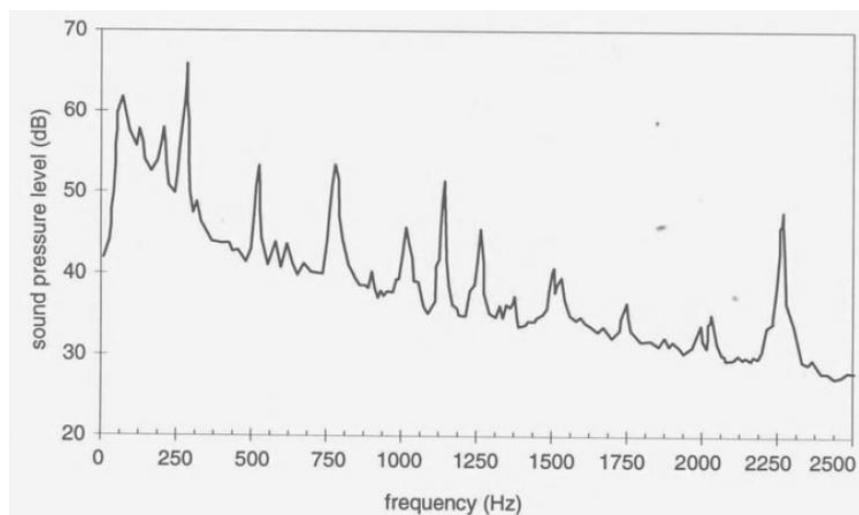
Um exemplo da contribuição espectral de cada componente é apresentado na Figura 15. Na Figura 16 é apresentado o espectro total, com as contribuições somadas.

Figura 15 – Contribuição de pressão sonora dos componentes para uma turbina de 75 kW.



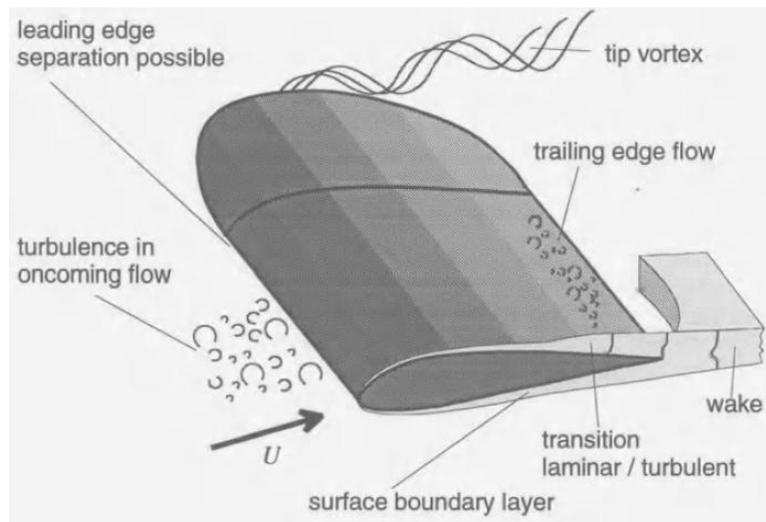
Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

Figura 16 – Pressão sonora típica de uma turbina eólica, incluindo caixa de engrenagens.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

Figura 17 – Fluxo típico perto da turbina de um aerogerador.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

2.5.2 Ruído aerodinâmico

Fluxos e processos complexos do ar ocorrem perto das turbinas, gerando o ruído aerodinâmico. O ambiente típico ao redor de uma turbina é mostrado na Figura 17.

É possível observar alguns fenômenos, notadamente: o vento é dotado de turbulência, que irá interagir com as pás (*turbulence in oncoming flow*). Na camada-limite, há a possibilidade do fluxo de ar atingir o número de Reynolds em que se inicia a transição laminar/turbulento (*laminar/turbulent transition*). No canto superior da pá, o fluxo pode ser acelerado, criando uma zona de sucção. Mais adiante, o fluxo será desacelerado.

Juntando esses fenômenos, é possível que ocorra o descolamento do fluxo das pás (*leading edge separation*). Dessa forma, a sucção na superfície acima e a pressão na superfície abaixo formam, juntas, o *wake*, que é associado à vorticidade da pá. Por fim, em uma pá de tamanho finito, as pressões de ambas as superfícies tendem a se compensar, fazendo com que surja um fluxo cruzado na ponta da pá, que criará vórtices (*tip vortex*) (WAGNER *et al.*, 1996). O Quadro 2 resume os principais mecanismos que produzem ruído aerodinâmico em turbinas eólicas.

Quadro 2 – Mecanismos de ruído aerodinâmico em turbinas eólicas.

Tipo de Ruído	Indicação	Mecanismo	Principal característica
Ruído de baixa frequência	Ruído devido à rugosidade constante / ruído devido a carregamento constante.	Rotação das pás / rotação em superfícies submetidas a forças de sustentação.	Frequência é relacionada a frequência de passagem da pá (BPF), pouco importante nas velocidades normais de rotação.
	Ruído devido ao carregamento variável.	Passagem de pá através da torre com presença de déficit de velocidade/ <i>wake</i> .	Frequência é relacionada a BPF, sendo pequena no caso de turbina contra o vento / possivelmente considerável em parques eólicos.
Ruído por influxo de turbulência	Ruído por influxo de turbulência.	Interação entre as pás com turbulência atmosférica.	Contribui para o ruído de banda larga, porém não foi totalmente quantificado.
Ruído devido ao aerofólio	Ruído do bordo de fuga.	Interação entre a turbulência da camada-limite com o bordo de fuga da pá.	Ruído de banda larga; principal fonte de barulho de alta-frequência (750 - 2k Hz).

Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

Quadro 2 – (continuação)

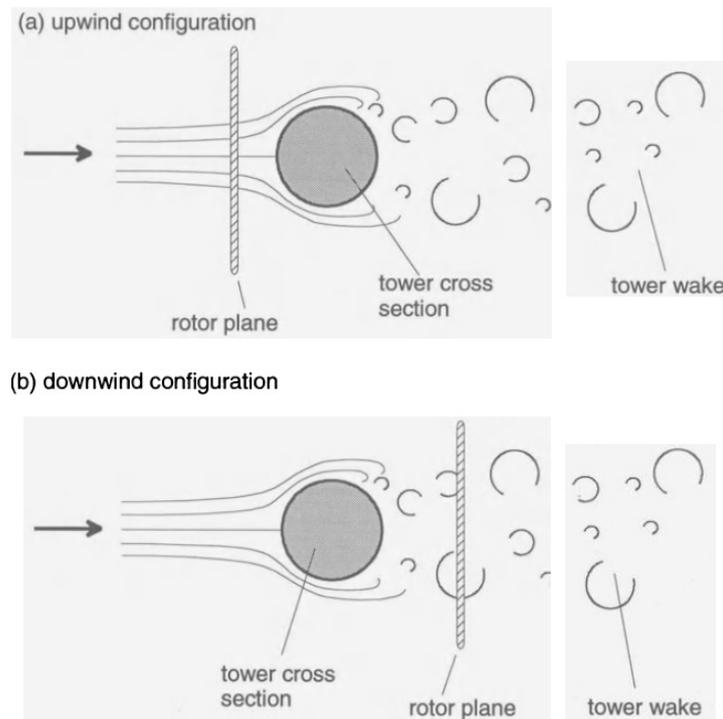
Tipo de Ruído	Indicação	Mecanismo	Principal característica
	Ruído da ponta.	Interação entre a turbulência e a ponta da pá.	Ruído de banda larga.
Ruído devido ao aerofólio (continuação)	Ruído de superação / ruído de fluxo estolado.	Interação do "excesso" de turbulência e a superfície da pá.	Ruído de banda larga.
	Ruído da camada-limite no escoamento liminar.	Interação das instabilidades não-lineares da camada-limite com a pá.	Tonal, pode ser evitado com otimização topológica.
	Ruído de bordo de fuga rombudo.	Desprendimento de vórtices em bordos de fuga rombudos.	Tonal, pode ser evitado com otimização topológica.
	Ruído do fluxo passando por buracos, fendas e intrusões.	Fluxos de cisalhamento instável através de buracos e fendas, desprendimento de vórtices.	Tonal, pode ser evitado com otimização topológica.

Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

O terceiro grupo (ruído devido ao aerofólio) está relacionado a interação entre os escoamentos, laminares ou turbulentos, em associação com a superfície das pás. Geralmente gera ruído de banda larga, podendo causar, também, ruído tonal, no caso de separação laminar de bolhas, bordos de saída rombudos ou fluxo através de buracos ou fendas.

2.5.2.1 Ruído de baixa frequência

O ruído de baixa frequência está intimamente relacionado à presença da torre. As torres, tipicamente, possuem seção transversal, o que se configura como uma barreira ao fluxo do ar,

Figura 18 – Passagem do fluxo de ar e formação de *wakes* nos aerogeradores.

Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

modificando-o. *Upstream*, ou torre acima, o vento é desacelerado. Já *downstream*, ou torre abaixo, o fluxo é separado, dependendo das condições do escoamento e das propriedades da superfície, podendo levar a formação de *wakes*, aumentando a turbulência e reduzindo a velocidade média de escoamento. A Figura 18 traz o caso a favor do vento (*downwind*) e contra o vento (*upwind*) (WAGNER *et al.*, 1996).

De acordo com Zhu (2004), o ruído produzido pela passagem desse fluxo de vento é diretamente relacionado à frequência de passagem das pás, que varia entre 1-20 Hz, dependendo do número de pás, da velocidade de rotação, dentre outros. É importante notar que isso gera um ruído de frequências discreto, uma vez que ele produz picos no espectro. Por ser relacionado à frequência das pás, o ruído gerado será de baixa frequência. Não obstante, o nível de pressão sonora pode ser alto, principalmente no caso das turbinas a favor do vento (*downwind*).

Por fim, é interessante notar que as frequências baixas desse tipo de ruído podem entrar em ressonância com a frequência de alguns órgãos internos, que comumente possuem frequência inferior a 16 Hz. Esse fenômeno pode gerar certo desconforto. Além disso, esse ruído também pode entrar em ressonância com janelas, paredes ou pisos, produzindo vibrações (ZHU, 2004).

Segundo Wagner *et al.*, (1996), como soluções para esse tipo de problema, pode-se destacar o aumento da distância entre a torre e o rotor, bem como a utilização de turbinas contra o vento (*upwind*).

2.5.2.2 Ruído por influxo de turbulência

O encontro entre as pás e a turbulência natural atmosférica é responsável por ruído de banda larga, onde as frequências dominantes estão no intervalo de 250 a 1.000 Hz (WAGNER *et al.*, 1996). Esse ruído depende diretamente das características e propriedades da turbulência.

Como em qualquer escoamento de fluido, haverá o surgimento de uma camada-limite nas imediações de uma superfície limitadora. Nessa camada, há a diminuição da velocidade do vento e a ocorrência de uma série de fenômenos relacionados aos efeitos difusivos e dissipadores de energia mecânica. Ademais, o momento é trocado através de tensões de cisalhamento viscosas e turbulentas. Ambos os efeitos se unem para formar o escoamento turbulento (WAGNER *et al.*, 1996).

A turbulência pode ser causada por efeitos aerodinâmicos ou termodinâmicos. Turbulência aerodinâmica ocorre diretamente na camada-limite, ou seja, de interações entre o escoamento e a superfície. Já a turbulência termodinâmica está relacionada ao empuxo do ar devido ao aquecimento pelo Sol. Esses efeitos, todavia, são negligenciáveis para escoamentos com velocidades maiores do que 10 m/s. Efeitos de gradiente do vento também devem ser considerados (DIJKSTRA, 2015).

Segundo Zhu (2004), há dois tipos de ruído por influxo de turbulência: de baixa e alta frequência. Esses regimes de turbulência são regidos pela velocidade do vento nas pás (U) e pela escala do distúrbio turbulento na atmosfera, ou seja, o tamanho da corrente de turbilhonamento (*eddy*, Λ) em relação à corda média aerodinâmica da pá (*blade chord*, C). A Figura 19 apresenta os dois casos possíveis.

Esse tipo de ruído não é, ainda, completamente compreendido. Acredita-se, porém, que ele seja o maior responsável pelo ruído aerodinâmico em frequências próximas a 1.000 Hz (DIJKSTRA, 2015).

Não há consenso sobre os principais fatores que afetam esse tipo de ruído, uma vez que nem todos os aspectos do mesmo são completamente compreendidos. Há indícios, contudo, que a estabilidade da atmosfera e a estrutura da turbulência são importantes fatores. No que tange à turbina em si, estudos apontam que o formato do aerofólio, principalmente do bordo de ataque, podem influenciar no ruído aerodinâmico, representando uma possibilidade de mitigá-lo. No entanto, não há resultados definitivos nesse campo (WAGNER *et al.*, 1996).

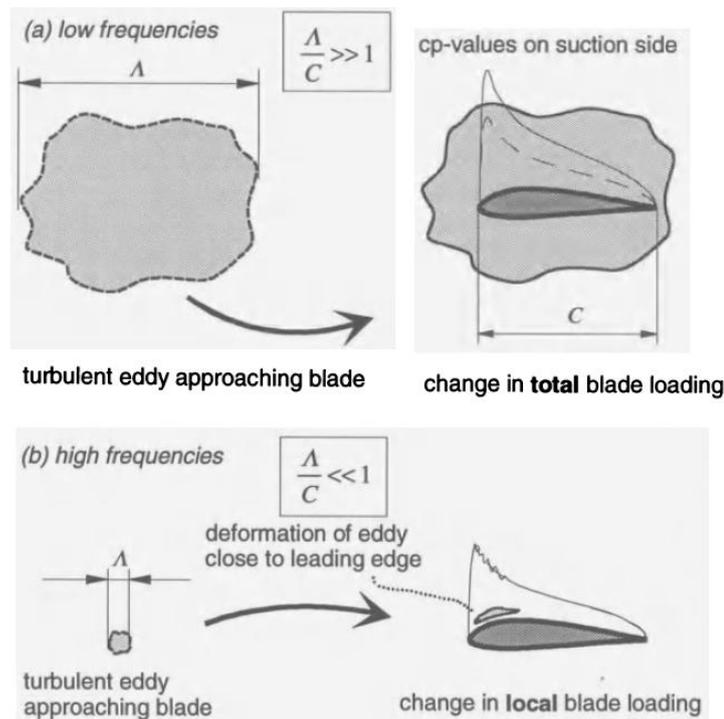
2.5.2.3 Ruído devido ao aerofólio

Ainda que o escoamento fosse perfeitamente constante e livre de turbulências, o ruído aerodinâmico sucederia em virtude da interação entre imperfeições na superfície das pás e correntes de turbilhonamento e também por instabilidades na camada-limite. Diferentes tipos de mecanismos serão descritos a seguir.

a. Ruído de bordo de fuga

De acordo com Wagner *et al.* (1996), o ruído de bordo de fuga provém da camada-limite que se forma na superfície da pá. A transição de escoamento laminar para turbulento ocorre

Figura 19 – Ruído por influxo de turbulência, baixa e alta frequência.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

em algum ponto entre o bordo de ataque e o bordo de fuga, dependendo do formato do perfil, ângulo de ataque, número de Reynolds, dentre outros fatores. Em relação à turbulência que se formará, importantes parâmetros são a energia cinética, a decomposição espectral, a velocidade de convecção do turbilhonamento, dentre outros. Esse fenômeno de turbulência criará um campo de pressão flutuante no bordo de fuga, produzindo ruído.

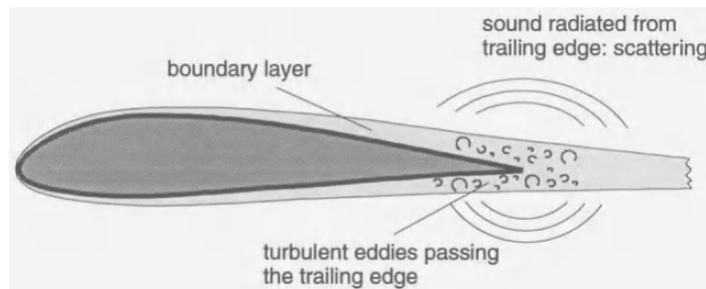
Entretanto, em baixas velocidades, o turbilhonamento é uma fonte ineficiente de ruído. Isso modifica quando há um canto afiado perto do turbilhonamento - formato comum do bordo de fuga das pás de turbinas eólicas - que servirá como um amplificador desse fenômeno. Esse é o principal mecanismo responsável pelo ruído de bordo de fuga. (WAGNER *et al.*, 1996). A Figura 20 apresenta esse mecanismo.

O ruído produzido é normalmente de banda larga, podendo compreender as frequências entre 160 e 1.500 Hz, dependendo do tipo de turbina e operação, com o pico de energia em torno de 465 Hz. O ruído de bordo de fuga vai dominar a região da alta frequência, quando o escoamento estiver amplamente conectado as pás do rotor (DOOLAN *et al.*, 2012).

Os principais fatores que influenciam o ruído do bordo de fuga são a velocidade de convecção do turbilhonamento e a estrutura da camada-limite perto do bordo de fuga, ou seja, a distribuição da energia cinética do turbilhonamento normal à superfície. O formato do bordo de fuga e as propriedades da superfície são importantes somente para frequências relativamente altas (DOOLAN *et al.*, 2012).

Ainda segundo Doolan *et al.* (2012), para a redução do ruído, a utilização de um bordo de fuga “serrado” é promissora, com resultados positivos advindos de testes em túneis de vento,

Figura 20 – Ruído de bordo de fuga.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

além de mudanças no formato e nas propriedades da superfície (como porosidade, por exemplo). Além dessas formas passivas de controle de ruído, uma forma ativa de redirecionamento das turbinas, de modo que nem todas sejam atingidas pelo vento na mesma direção (denominado dessincronização ativa de fase) pode reduzir esse tipo de ruído, visto que a sincronização de todos os aerogeradores serve como um amplificador do ruído.

b. Ruído por desprendimento de vórtices na camada-limite no regime laminar

Segundo Moreau *et al.* (2012), caso as pás do rotor operem com um número de Reynolds menor que 10^6 , regiões com escoamento laminar podem se estender até o bordo de fuga. Testes com número de Reynolds entre $0,7 \times 10^5$ - $2,7 \times 10^5$ apresentaram produção de ruído. Para esses valores de número de Reynolds, pode haver uma interação ressonante entre o ruído do bordo de fuga e a zona de transição laminar-turbulenta. Esse fenômeno gerará ruído, que será tonal.

Além disso, instabilidades na camada-limite podem ocorrer. Essas instabilidades podem gerar separação, bolhas de separação ou ondas, gerando ruído. A Figura 21 apresenta o mecanismo responsável pelo fenômeno.

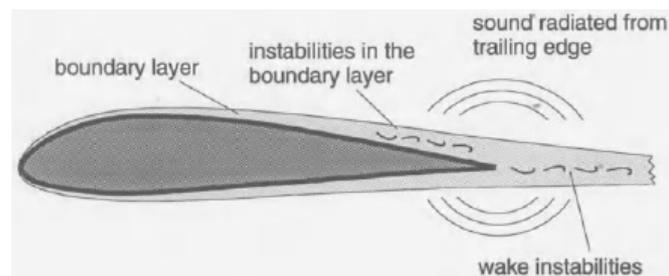
Todavia, devido a dependência com o número de Reynolds, ele é de fácil resolução, de modo que ele tem pouca importância na maioria das turbinas modernas. Turbinas de médio ou pequeno porte, porém, podem ainda apresentar esse tipo de ruído. Outras soluções possíveis são a utilização de um *turbulator*, que é um aparelho que transforma o fluxo laminar em turbulento ou o serramento do bordo de fuga (WAGNER *et al.*, 1996).

c. Ruído da ponta

A ponta é possivelmente a fonte mais proeminente de ruído das turbinas eólicas. A Figura 22 apresenta o mecanismo responsável por esse tipo de ruído.

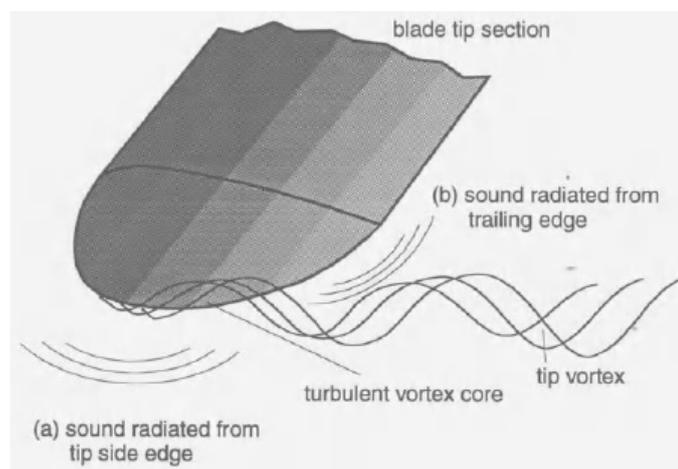
De acordo com Arakawa *et al.* (2005), na ponta, a diferença de pressão entre a zona de sucção e a zona de pressão resulta em um fluxo cruzado, que leva a formação de um vórtice, gerando o ruído. O mecanismo é similar ao mecanismo responsável pela criação do ruído de bordo de fuga. Além disso, pode ocorrer o fenômeno da separação, produzindo ruído extra, como mostra a Figura 22.

Figura 21 – Ruído por desprendimento de vórtices na camada limite no regime laminar.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

Figura 22 – Ruído da ponta.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

Segundo Wagner *et al.* (1996), o ruído produzido pelo vórtice da ponta é necessariamente do tipo de banda larga, e é influenciado principalmente pela velocidade de convecção do vórtice e tamanho do mesmo. Apesar desses fatores, ângulo de ataque, número de Reynolds e distribuição do carregamento na pá podem também influenciar. Há controvérsias sobre a importância do ruído da ponta, mas estudos sugerem esse ruído pode aumentar em 1-2 dB o ruído em certas frequências.

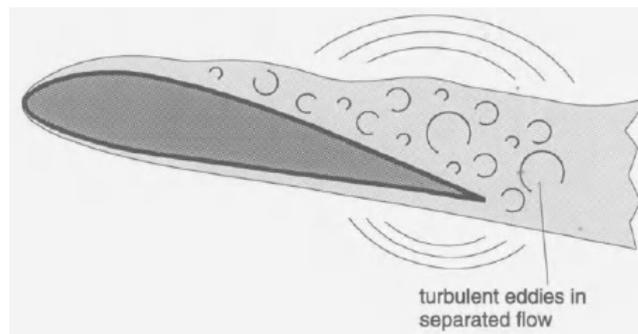
Uma forma de reduzir esse tipo de ruído é modificando o formato da ponta, de forma a reduzir a interação entre os vórtices (ARAWAKA *et al.*, 2005).

d. Ruído de separação / Ruído de fluxo estolado

Estol é um fenômeno que acontece quando o ângulo de ataque aumenta, fazendo uma separação total do fluxo extradorso do aerofólio. A Figura 23 apresenta esse tipo de ruído.

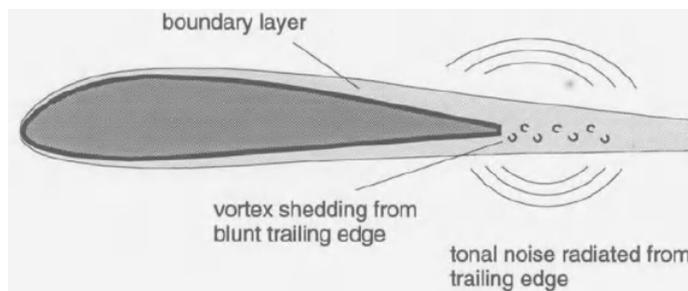
Estudos apontam que o ruído de fluxo estolado é significativo, e aumenta consideravelmente conforme maior for o ângulo de ataque da pá. Ele possui natureza de banda larga, e pode se

Figura 23 – Ruído de separação / ruído de fluxo estolado.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

Figura 24 – Ruído por bordo de fuga rombudo.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

tornar a maior fonte de ruído se o ângulo de ataque extrapolar limites pré-estabelecidos. A única forma de reduzi-lo é evitando condições de estol na pá (WAGNER *et al.*, 1996).

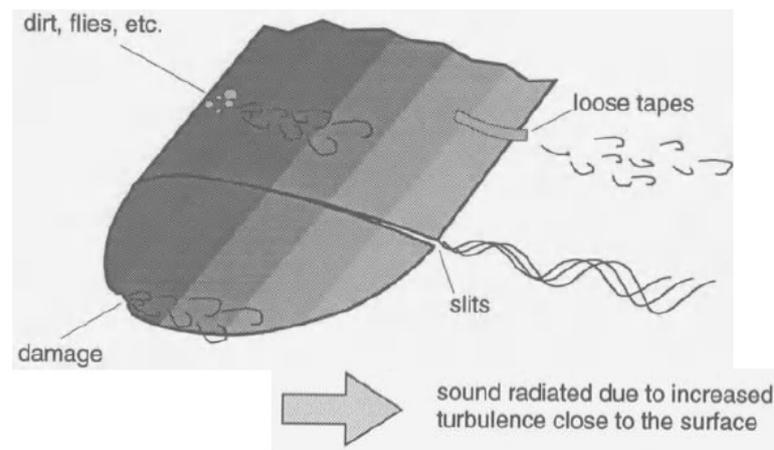
e. Ruído por bordo de fuga rombudo

Segundo Dijkstra (2015), o bordo de fuga rombudo acontece quando o canto do mesmo não é afiado, ou seja, há uma certa espessura atrelada ao mesmo. Nesse caso também há a possibilidade de desprendimento de vórtices na forma de *von Karman type vortex street*. Esse tipo de vórtice é característico da passagem de fluxo ao redor de corpos rombudos. É interessante notar que o ruído gerado terá característica tonal. A Figura 24 apresenta o ruído por bordo de fuga rombudo.

A frequência com que o ruído é emitido depende de uma série de fatores, como o formato do bordo de fuga, o número de Reynolds e o parâmetro de rombudez. Estudos mostram que quanto menor a espessura do bordo de fuga, maior a frequência com que o ruído será emitido (DIJKSTRA, 2015).

Em condições práticas, considerando as dificuldades técnicas de construção, um bordo de fuga típico terá entre 1-3 mm de espessura, mitigando muito dos efeitos desse tipo de ruído (WAGNER *et al.*, 1996).

Figura 25 – Ruído devido às imperfeições na superfície.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

f. Ruído devido às imperfeições na superfície

Imperfeições nas pás do rotor são inevitáveis, e podem surgir durante a manufatura, soerguimento, instalação ou operação. Alguns agentes passíveis de danificar as pás são chuvas de granizo, raios e pássaros. Além disso, pode haver acúmulo de sujeira devido a insetos ou poeira, que modificarão a rugosidade da superfície. Por fim, fitas mal aderidas ou fendas podem alterar o escoamento. A Figura 25 apresenta essas imperfeições em uma pá.

Com exceção dos raios, que podem ser resolvidos com a instalação de pára-raios nos parques eólicos, todas as outras razões são incontornáveis e/ou requerem manutenção constante. No caso das fendas e das fitas de aderência, uma inspeção rigorosa é requerida antes da instalação das turbinas (WAGNER *et al.*, 1996).

2.6 Efeitos do ruído de aerogeradores em parques eólicos

O ruído inerente a um parque eólico varia conforme uma série de fatores, como a posição das turbinas, o tipo de turbina, o relevo do terreno, a velocidade e a direção do vento, bem como o ruído de fundo³. É interessante notar que, apesar de haver um aumento do ruído emitido pelos aerogeradores com o aumento da velocidade do vento, também há o aumento do ruído de fundo. Os parques eólicos normalmente se encontram em regiões rurais, onde há predominância de árvores. As árvores, na presença do vento, chacoalham, produzindo ruído que pode ser maior que o produzido pelos aerogeradores (NOISE ASSOCIATION, 2006).

O ruído em parques eólicos pode ser avaliado a partir da medição dos níveis de pressão sonora com sonômetro, ponderados pela escala A e expressos em dB(A). Esse procedimento é necessário, pois a orelha humana é mais sensível a certas frequências (notadamente entre 2 kHz e

³ O ruído de fundo, também conhecido como ruído ambiente, é o ruído constante mínimo que dada região apresenta. Em zonas rurais, é comum que sejam fontes de ruído de fundo o vento, as árvores, os animais e as atividades humanas.

4 kHz) e consideravelmente menos sensível a frequências menores. Esse fenômeno é denominado nível de audibilidade ou sensação de volume. O Quadro 3 exibe valores típicos de ruído para diferentes fontes.

Quadro 3 – Valores típicos de ruído para diferentes fontes.

Fonte	Ruído em dB(A)
Limiar da dor	140
Avião a jato a 150 m	105
Furadeira pneumática	95
Caminhão a 50 km/h a 100 m	65
Escritório cheio	60
Carro a 65 km/h a 100 m	55
Parque eólico a 350 m	35-45
Ruído ambiente rural a noite	20-40
Quarto silencioso	20

Fonte: REGEN SW, 2012.

A acústica subjetiva também deve ser considerada nesse estudo. Ela é a ciência que estuda a correlação entre os estímulos sonoros e as sensações geradas em humanos, ou seja, se há percepção de incômodo com o som, caracterizando o ruído. O limiar para um “som” ser considerado “ruído” é único para cada indivíduo, fazendo com que esse seja um problema complexo de ser abordado.

Segundo Pedersen & Waye (2007), a interferência visual contribui para a percepção de incômodo do ruído, tal como a presença de sons intrusivos. Foi constatado no estudo desses autores, também, que o incômodo é maior na área rural do que urbana, principalmente se a turbina eólica se apresenta em terreno montanhoso ou em regiões altas, com menor percepção do ruído em terreno plano.

Um cenário interessante aconteceu em uma fazenda eólica na Carolina do Norte nos Estados Unidos. Reportou-se que as vibrações oriundas do ruído foram responsáveis pelo adoecimento de pessoas, o brandir de janelas e fizeram com que as vacas parassem de dar leite (OTTINGER, 1991).

Nissenbaum *et al.* (2012) fizeram entrevistas com uma série de moradores que residem próximo e longe de parques eólicos. As distâncias próximas variaram entre 375 e 1.400 m dos aerogeradores, e as residências longínquas entre 3,3 e 6,6 km. Os resultados apontam que sobretudo o sono é afetado pelo ruído dos aerogeradores, provocando sonolência diurna e de certa forma prejudicando a saúde mental dos indivíduos. Esse resultado é válido mesmo para as residências afastadas 1,4 km dos aerogeradores.

O ruído de baixa frequência (RBF), também denominado infrassom, abrange a região sonora correspondente às frequências menores que 200 Hz. Recentemente, alguns países europeus passaram a exigir a apresentação de um relatório específico, que prove a aceitabilidade dos níveis de ruído de infrassom, como requisito ao expediente da licença de implantação de um

parque eólico. Todavia, estudos recentes demonstram que turbinas modernas, quando colocadas contra o vento (configuração *upwind*), apresentam níveis de pressão sonora baixos, normalmente com valores menores que a percepção humana. Isso torna esse tipo de ruído relativamente negligenciável, quando considerado seu efeito na avaliação ambiental (FILHO & AZEVEDO, 2013).

No Brasil, as normas que regulam as emissões de ruído ambiental são a ABNT NBR 10151 e NBR 10152. Contudo, essas normas ainda não trazem valores adequados para o ruído em fazendas eólicas, aduzindo valores gerais de ruído. Atualizações recentes nas normas continuam a ignorar essa demanda (ABNT, 2017). No caso específico do infrassom, por exemplo, vibrações no corpo e no sistema auditivo humano podem ser prejudiciais à saúde, mesmo quando não audíveis. Quadros clínicos apresentam falta de sono, náuseas, dores de cabeça, tonturas, taquicardia, irritabilidade, dentre outros, como possíveis sintomas desse fenômeno. Quanto ao tempo de exposição, duas semanas normalmente são suficientes para o aparecimento da maioria desses sintomas (NOISE ASSOCIATION, 2006).

Devido a esses fatos, algumas agências internacionais buscaram, de maneira empírica, demarcar distâncias mínimas entre aerogeradores e residências, de forma a dirimir esses efeitos. Em uma audiência pública, a agência ambiental francesa, *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie* - ADEME, sugeriu um afastamento mínimo de 250 m. A *Noise Association*, com representantes na França e no Reino Unido, todavia, recomenda uma distância de 1,5 km. O Quadro 4 exibe os valores mínimos de distância entre aerogeradores e residências para vários países europeus. É importante salientar que a maioria dos valores são de ordem prática, uma vez que nem todos estão regulamentados.

Um problema recorrente na avaliação do impacto do ruído é a possibilidade de fatores externos influenciarem as pesquisas. Chapman & Crichton (2017) afirmam que somente os países anglo-saxões (notadamente Canadá, Reino Unido e Austrália) possuem quantidades significativas de reclamações, que ainda assim representam uma parcela muito pequena da população que reside próximo aos parques. Essa quantidade causa estranhamento quando comparada as reclamações advindas dos países europeus, que são em quantidade muito menor. Uma explicação possível para esse fenômeno é a de que grupos contrários à tecnologia eólica surgiram desde o século passado, sobretudo no Canadá e Austrália, e desde então vêm influenciando negativamente as pesquisas. Por isso, muitas das reclamações surgiram do chamado efeito nocebo, onde a percepção negativa de uma pessoa sobre um agente faz com que os efeitos desse agente sejam mais danosos do que deveriam ser (KNOPPER *et al.*, 2014).

Bakker *et al.* (2012) afirma, ainda, que tanto a percepção que o valor da propriedade pode ser diminuída devido a implantação de um parque próximo quanto a possibilidade de medidas legais, que recompensem financeiramente os moradores, são fatores que podem influenciar as pessoas a exagerar quando perguntadas sobre o nível de incômodo.

Segundo Knopper *et al.* (2014), outro efeito interessante é que residentes que se beneficiam financeiramente do parque, de modo direto ou indireto, registram uma quantidade de reclamações substancialmente inferior àqueles que não se beneficiam.

Por fim, outro fator é que a maior parte dos problemas relacionados às usinas eólicas,

como irritabilidade, náusea, dor de cabeça, mudanças no sono, dificuldade de concentração e ansiedade são, também, relacionados ao estresse, um problema muito mais comum na sociedade atual (KNOPPER *et al.*, 2014).

Quadro 4 – Distância entre as torres eólicas e as residências humanas.

País	Distância da torre para as residências
Bélgica	150 a 500 metros
República Tcheca	400 a 800 metros
Dinamarca	4 vezes a altura da torre
França	250 a 500 metros, conforme ADEME
Alemanha	- Região tranquila [35 dB(A)]: 1.000 a 1.5000 m; - Região média [40 dB(A)]: 600 a 1.000 m; - Região padrão [45 dB(A)]: 300 a 600 m.
Itália	Algumas regiões definiram distâncias, outras não. Calabria: 5 vezes a altura da torre; Basilicata: 2.000 metros; Campania: 10 vezes a altura da torre; Molise: 20 vezes a altura da torre.
Países Baixos	4 vezes a altura da torre
Irlanda do Norte	500 metros
Romênia	3 vezes a altura da torre, podendo ser menor conforme audiência pública.
Escócia	- Bankend Rig: cerca de 1.000 m; - Chapelton: 750 m; - Dungavel: 1.000 m; - Whitelee: cerca de 1.000 m; - Gathercauld Ceres: 572 m; - Auchtermuchty: 650 m.

Fonte: FILHO & AZEVEDO, 2013.

Quadro 4 – (continuação)

País	Distância da torre para as residências
Espanha	Nacional: legislação aplicada em função do nível do ruído. Regional: as políticas de energia eólica variam, conforme: - Valência: 1.000 m; - Andaluzia: 500 m.
Suécia	Aplicável legislação em função do nível do ruído [40 dB(A)]. Na prática, utiliza-se 500 m.
Reino Unido	Variável com a altura da torre. - Torre entre 25 e 50 m: 1.000 metros; - Torre entre 50 e 100 m: 1.500 metros; - Torre entre 100 e 150 m: 2.000 metros; - Acima de 150 m: 3.000 metros. A altura da torre é medida desde o solo até o final da ponta da pá do rotor, no ponto mais alto.
Suíça	Documento da <i>Suisse Eole</i> menciona 300 m de torre, mas cada Cantão trabalhará com política própria.

Fonte: FILHO & AZEVEDO, 2013.

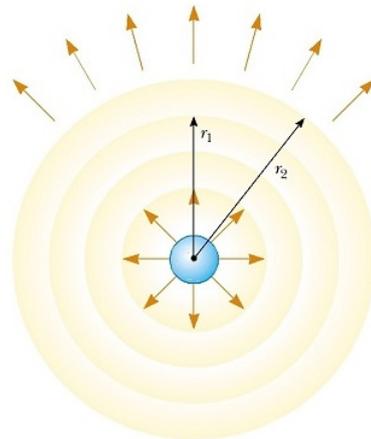
2.7 Modelo de propagação do som ao ar livre

A propagação do som ao ar livre se diferencia da propagação sonora tipicamente encontrada em indústrias, devido a efeitos de atenuação típicos. No caso das indústrias, mede-se o nível de potência acústica emitida pela fonte de ruído L_w . Todavia, quando falamos em propagação do som ao ar livre, deve-se considerar o nível de pressão sonora (NPS) no receptor, L_p , de modo que L_p é função da distância entre a fonte emissora e o receptor.

O modelo de irradiação de potência acústica, ao considerar uma onda de propagação esférica, prevê uma redução de 6 dB no nível de pressão sonora toda vez que a distância é dobrada, em relação à fonte sonora. Essa diminuição não considera as atenuações devido à absorção atmosférica, ao tipo de solo, à temperatura, às barreiras acústicas, dentre outros.

No caso das turbinas eólicas, uma singularidade é o fato do ruído ser emitido a alturas próximas a 100 metros. Nessas alturas, há uma maior importância da absorção atmosférica e uma menor importância das barreiras acústicas (fenômeno denominado *screening*). Além disso, a velocidade e a direção do vento tornam-se fatores fundamentais na análise do ruído. Dessa forma, estar a favor do vento (*downwind*) ou contra o vento (*upwind*) influencia no nível de potência sonora emitido pela turbina eólica e o correspondente nível de pressão sonora no receptor.

Figura 26 – Propagação esférica.



Fonte: Kshitij Education India, 2012.

O cálculo das atenuações é feito com base em equações empíricas, que surgiram a partir de uma extensa quantidade de dados medidos. Elas deverão ser todas somadas ao nível de potência acústica da fonte emissora, permitindo o cálculo do nível de pressão sonora no receptor.

A relevância do cálculo do nível de pressão sonora do ruído de turbinas eólicas se deve a possibilidade das autoridades e companhias de planejamento de parques eólicos estimarem o acréscimo aos níveis de pressão sonora que os residentes da localidade serão submetidos, escolherem o melhor tipo de turbina para a situação e simularem o efeito das condições atmosféricas da região na propagação do ruído (WAGNER *et al.*, 1996).

2.7.1 Modelo do ruído de turbinas eólicas em parques eólicos

O modelo de propagação do ruído de turbinas em parques eólicos que mais se assemelha a realidade é o modelo de propagação de onda esférica. Segundo a teoria acústica, esse é o tipo de propagação que uma fonte pontual produz em um meio isotrópico, como o ar. Em uma propagação esférica ideal, a área que a onda varrerá aumenta conforme a equação da esfera, ou seja, há uma diminuição da densidade de energia por um fator r^2 , fazendo com que a distância diminua consideravelmente o nível de pressão sonora no receptor (EASTON, 2010). A Figura 26 apresenta a propagação esférica.

A expressão que permite determinar o nível de pressão sonora, L_p , de uma onda esférica ideal, em função da potência sonora da fonte de ruído omnidirecional, L_w , e da distância r até o receptor, é dada por

$$L_p = L_w - 20 * \log(r) - 11 [dB] \quad (2.2)$$

em que o termo de 11 dB se origina de uma série de constantes relativas às propriedades do ar.

Um outro conceito importante da propagação sonora é a diretividade, relacionado à existência de uma direção primordial de propagação sonora, como acontece com megafones. No

caso da propagação das usinas eólicas, por ser sumariamente ao ar livre, ou seja, omnidirecional, considera-se que a diretividade é igual a 0 (LAMANCUSA, 2009).

2.8 Fatores de atenuação na propagação do ruído em parques eólicos

Na prática, todavia, a propagação do ruído de turbinas eólicas difere consideravelmente da propagação da onda esférica ideal, visto que uma série de fatores, denominados atenuações, influenciam na mesma, como a absorção do som pelo ar, a existência de fenômenos meteorológicos como turbulência e refração do ar, a existência de barreiras naturais, como montanhas ou florestas, a absorção pelo próprio solo, dentre outros.

Na literatura, os fatores de atenuação são somados ao nível de potência acústica da fonte sonora, resultando no nível de pressão sonora, segundo a equação

$$L_w = L_p + A \quad (2.3)$$

em que A representa o somatório das atenuações. Esse somatório pode considerar uma quantidade considerável de fenômenos, e os principais são descritos a seguir.

2.8.1 Divergência geométrica

A divergência geométrica é o fenômeno responsável pela distribuição da energia de emissão de uma onda sonora em superfícies cada vez maiores conforme avança a frente da onda (GAYO, 2006). Como discutido anteriormente, é esse efeito o responsável pela diminuição de 6 dB do nível de pressão sonora toda vez que a distância é dobrada, como mostrado a seguir

$$L_{p1} - L_{p2} = 20 * \log\left(\frac{1}{r_1}\right) + 20 * \log(r_2) = 20 * \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad [dB] \quad (2.4)$$

Fazendo $r_2 = 2 * r_1$, encontra-se que $(L_{p1} - L_{p2}) = 6$ dB. É interessante notar que a divergência geométrica é um conceito físico fundamental, inerente à propagação de ondas e sai diretamente da dedução da fórmula do nível de pressão sonora.

2.8.2 Absorção atmosférica

Segundo Lamancusa (2009), a absorção atmosférica é um fenômeno que ocorre em virtude de dois mecanismos principais: a absorção clássica, devido a viscosidade, convertendo energia sonora em energia térmica, através da fricção entre as moléculas do ar; e os processos de relaxação, que acontecem quando a energia sonora é absorvida pelas moléculas de ar, que irão vibrar e rotacionar. Essas moléculas podem, então, reemitir o som, criando “câmeras de eco”, que podem interferir com a propagação do mesmo.

A atenuação depende de uma série de fatores, como a frequência, a temperatura, a pressão atmosférica e a umidade. A absorção clássica e a relaxação rotacional são proporcionais ao quadrado da frequência. Já a relaxação vibracional depende das frequências de relaxação dos

gases constituintes da atmosfera (no caso da Terra, nitrogênio e oxigênio) e da umidade do ar (LAMANCUSA, 2009).

Em razão dos mecanismos discutidos, a atenuação depende da distância de propagação, sendo comum esse parâmetro ser medido como dB/m. O Quadro 5 traz valores de atenuação para a condição específica de umidade relativa de 70% e temperatura de 10 °C. É interessante constatar que o fenômeno é desprezível para frequências até 250 Hz.

Quadro 5 – Atenuação sonora total da atmosfera para uma umidade relativa de 70% e temperatura de 10 °C.

Banda central de frequência de 1/1 oitava, Hz	Atenuação sonora α_L, dB/m	Redução do NPS para 1 km de distância, dB
63	0,000	0
125	0,001	1
250	0,001	1
500	0,002	2
1.000	0,004	4
2.000	0,008	8
4.000	0,021	21
8.000	0,052	52

Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

2.8.3 Condições meteorológicas

Tanto a temperatura quanto o vento influenciam no nível de pressão sonora.

Segundo Wagner *et al.* (1996), a velocidade do som, c_0 , depende da temperatura e da umidade relativa do ar. No que tange à temperatura, principal fator, há um aumento na velocidade com o aumento da mesma, segundo a seguinte equação

$$c_0 = 331,3 + 0,606 * T [m/s] \quad (2.5)$$

onde T é a temperatura do ar seco, em graus Celsius.

Além disso, ao propagar, a velocidade do vento é somada a velocidade do som. A Figura 27 apresenta seis condições possíveis de propagação do som em relação à temperatura e à velocidade do vento. Para facilitar o entendimento e a representação do fenômeno da refração, a propagação sonora será mostrada em forma de raios sonoros.

Há dois fenômenos distintos que estão atuando ao mesmo tempo: o gradiente da velocidade do vento e o gradiente de temperatura. Nas três figuras superiores da Figura 27, a velocidade do vento é zero, ou seja, apenas o gradiente da temperatura influencia a propagação do som. A variação da temperatura com a altura é denominada gradiente adiabático. Nesse caso, três

possibilidades podem ocorrer: a temperatura diminui com a altura; a temperatura aumenta com a altura; a temperatura se mantém constante com a altura. Via de regra, nesse caso, a refração ocorrerá em direção a menor temperatura.

Segundo Lamancusa (2009), a diminuição da temperatura com a altura é o fenômeno chamado lapso superadiabático ou positivo. Precisamente, um lapso superadiabático ou positivo caracteriza-se por um gradiente maior que $-0,98 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Ele prevalece durante o período diurno, particularmente em dias ensolarados e no verão. Isso acontece porque a alta insolação nesses dias aquece rapidamente o solo, que irradiará calor ao ar nas suas adjacências, aquecendo-o. Essa diminuição faz com que a velocidade do som também diminua com a altura, curvando as linhas de som para cima em todas as direções.

O aumento da temperatura com a altura, por outro lado, é denominado lapso inverso ou negativo. O lapso inverso ou negativo, todavia, caracteriza-se por um gradiente menor que $-0,98 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Esse cenário é típico do período noturno, principalmente em noites desanuviadas e, no caso do inverno, até mesmo durante períodos diurnos. Isso acontece devido ao rápido resfriamento do ar próximo à superfície, que é absorvido pelo solo. Nesse cenário, os raios de som vão curvar para baixo em todas as direções.

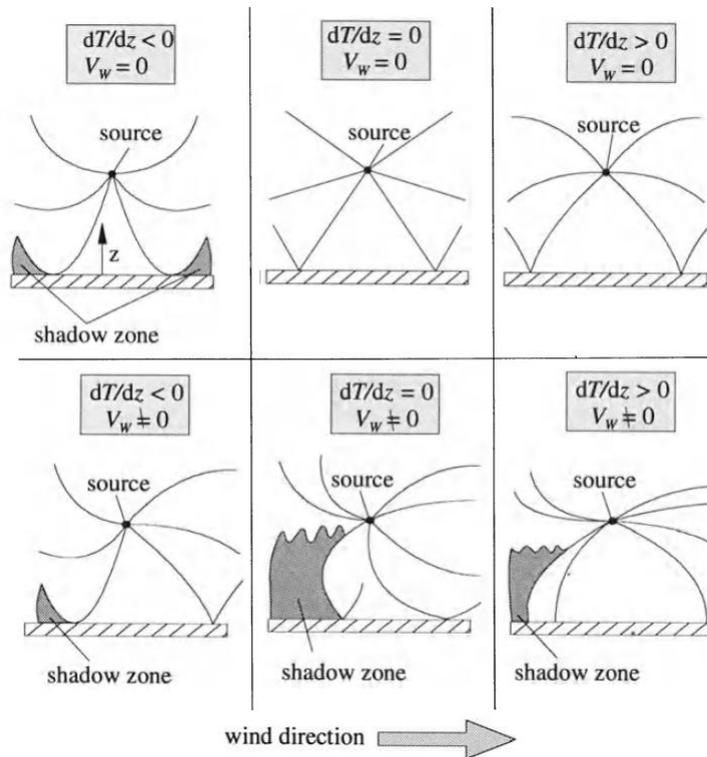
A constância da temperatura com a altura é possível, porém é um cenário com probabilidade de ocorrência bastante remota. Nesse caso, a temperatura não irá influenciar as linhas de som, que manterão sua trajetória de maneira retilínea. Há duas formas de atingir essa condição: através de uma atmosfera neutra ou estatisticamente estável ou de uma atmosfera isotérmica. A atmosfera neutra ou estatisticamente estável sucede-se quando a temperatura varia segundo a taxa adiabática seca ($-0,98 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$). Nesse caso, os efeitos da curvatura devido a temperatura são balanceados pela gravidade, de forma que, na soma total, não há curvatura. Uma atmosfera isotérmica, por outro lado, caracteriza-se por um meio sem refração, visto que a temperatura não varia. Esse cenário é extremamente improvável de acontecer (LAMANCUSA, 2009).

Já nas imagens inferiores da Figura 27, além do gradiente de temperatura, há vento oeste, soprando em direção ao leste. É importante lembrar do gradiente do vento, ou seja, a variação da velocidade do vento conforme a altura, hora do dia, condições atmosféricas e natureza das superfícies. Esse gradiente pode ser acentuado para alturas até 100 m. Nota-se que a refração sempre ocorre na direção da menor velocidade de propagação do som e que o raio de curvatura do caminho do som é inversamente proporcional ao gradiente de velocidade (LAMANCUSA, 2009).

O vento pode interagir de duas formas com os raios sonoros: pode se mover a favor ou contrário ao som. Quando o vento se move a favor da propagação, as linhas tendem a curvar para baixo. Esse fenômeno faz com que o som seja percebido ligeiramente mais alto do que deveria ser. No caso oposto, quando o vento se move contra a propagação, as linhas de som serão curvadas para cima. Isso fará com a percepção sonora seja ligeiramente mais baixa.

A soma desses efeitos pode criar uma zona denominada zona de sombra, onde, devido a refração dos raios de propagação, há uma súbita diminuição da pressão do som (WAGNER *et al.*, 1996). Curiosamente, o documentário *The Civil War* (1990), de Ken Burns, sobre a Guerra Civil Americana, exhibe uma série de batalhas onde zonas de sombra impediram ou atrapalharam

Figura 27 – Influência do gradiente de velocidade do vento V_W e do gradiente de temperatura $\frac{dT}{dz}$ na propagação de ruído.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

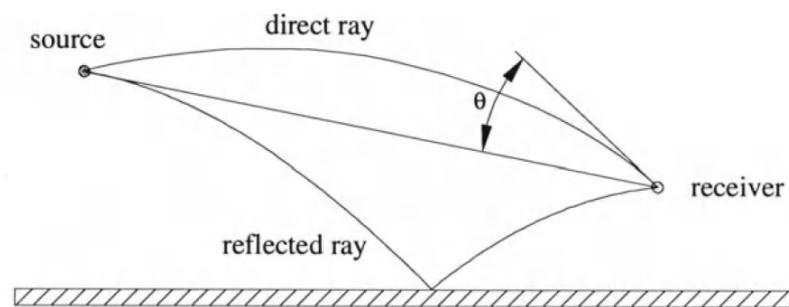
um dos lados do conflito, impedindo-os de ouvir os ruídos das batalhas.

Medidas precisas na refração das ondas sonoras são um problema complexo. Há a exigência de modelos onde a velocidade do som seja uma função, que varia com uma série de fatores, principalmente a altitude. Tomando o fato que a refração vai tanto atenuar quanto incrementar o som, dependendo da direção do vento, uma abordagem clássica para o problema é simular o nível de pressão sonora sem considerar os efeitos meteorológicos, assumindo que esse valor corresponderá a média do ruído, à longo prazo (LAMANCUSA, 2009).

Além disso, os efeitos do tempo podem modificar a atenuação do solo, que será discutida a seguir. Nesse contexto, há o fenômeno denominado *ground effect dip* (efeito de declive/inclinação do solo), que seria uma atenuação particularmente pronunciada nas faixa de 200-800 Hz. Quanto maior o *ground effect dip*, maior a influência dos efeitos meteorológicos. Para *dips* suficientemente pequenos, a influência será relativamente desprezível (WAGNER *et al.*, 1996).

Por fim, é importante entender o fenômeno da refração para realizar medições de níveis de pressão sonora, visto que, para uma mesma turbina, uma medição em um dia ensolarado contra o vento, será consideravelmente menor que uma medição a noite, a favor do vento, na mesma turbina.

Figura 28 – Reflexão do solo na propagação das ondas.



Fonte: Wind Turbine Noise (WAGNER *et al.*, 1996).

2.8.4 Efeitos do solo

A propagação do som acontecerá também sobre uma superfície. Segundo Lamancusa (2009), as propriedades dessa superfície são importantes, visto que influenciam o ruído. Superfícies suaves como a neve absorvem uma boa quantidade do som, atenuando-o. Contudo, água, gelo e concreto aproximam-se de uma superfície perfeitamente rígida, absorvendo pouco ou nenhum ruído e refletindo-o quase em sua totalidade. Por isso, deve-se estudar a particularidade de cada solo, de modo a conhecer as propriedades de absorção e reflexão acústica, que determina a impedância acústica da superfície. A Figura 28 apresenta o efeito de reflexão do solo na propagação das ondas.

A própria superfície do solo serve como meio de propagação das ondas, especialmente para o caso em que há baixos ângulos de incidência e baixas frequências. O mecanismo de transmissão é a transformação da energia acústica incidente em energia vibracional, que irá se propagar até dissipar ou ser irradiada novamente como som. Esse pode ser o método dominante de propagação de ondas de baixas frequências a longas distâncias. Interessantemente, esse efeito também é responsável pelo fenômeno chamado de *ground effect dip*, que gera uma atenuação considerável na faixa de 200-800 Hz, como comentado anteriormente. Para frequências acima de 800 Hz, uma atenuação menor pode ser observada (WAGNER *et al.*, 1996).

Uma analogia com a teoria eletromagnética pode ser útil para explicar o efeito da reflexão das ondas no solo. Tomando a geometria apresentada na Figura 28, há três ondas distintas: uma onda retilínea, ligando a fonte ao receptor; uma onda, acima, refratada por condições meteorológicas; e uma onda abaixo, refletida por uma superfície com impedância finita. A onda refletida possuirá ângulo igual ao ângulo incidente, porém fase e amplitude distintas da onda incidente, que serão relativos a impedância acústica da superfície. Essas três ondas, ao encontrar com o receptor, dependendo da fase e da amplitude, se somarão construtivamente, amplificando o ruído, ou destrutivamente, atenuando o ruído.

Apesar de existirem modelos complexos para simular com precisão o efeito do solo, medidas empíricas apontam que um modelo simples, usando apenas um único parâmetro, denominado resistividade ao fluxo de ar, é suficientemente preciso para descrever as propriedades de absorção

de uma superfície. Esse modelo é válido somente para superfícies com porosidade constante. O Quadro 6 traz valores de resistividade ao fluxo de ar para uma variedade de superfícies (LAMANCUSA, 2009).

Quadro 6 – Resistividade ao fluxo de ar σ para vários tipos de superfícies.

Superfície	Resistividade de fluxo, cgs rayls
Neve recém-caída	15-30
Sugar snow	25-50
Floresta de pinheiros ou tsugas	20-80
Gramma, pasto	150-300
Rodovia não pavimentada, com rochas de até $\Phi 10$ cm	300-800
Solo arenoso, compactado	800-2.500
Lacas de calcários espessas	1.500-4.000
Taipa de pilão	4.000-8.000
Poeira de pedreira, fina, extremamente compactada	5.000-20.000
Asfalto, água, gelo	> 20.000

Fonte: Noise Control (LAMANCUSA, 2009).

2.8.5 Barreiras acústicas

Screening é o nome dado ao efeito que as barreiras têm na interferência da propagação de ondas acústicas. Segundo Vér & Beranek (2006), a penetração do som nessas condições se dá por difração, como mostrado na Figura 29. A atenuação, assim, é relativa ao número de Fresnel, N , dado por

$$N = \frac{2 * z}{\lambda} \quad (2.6)$$

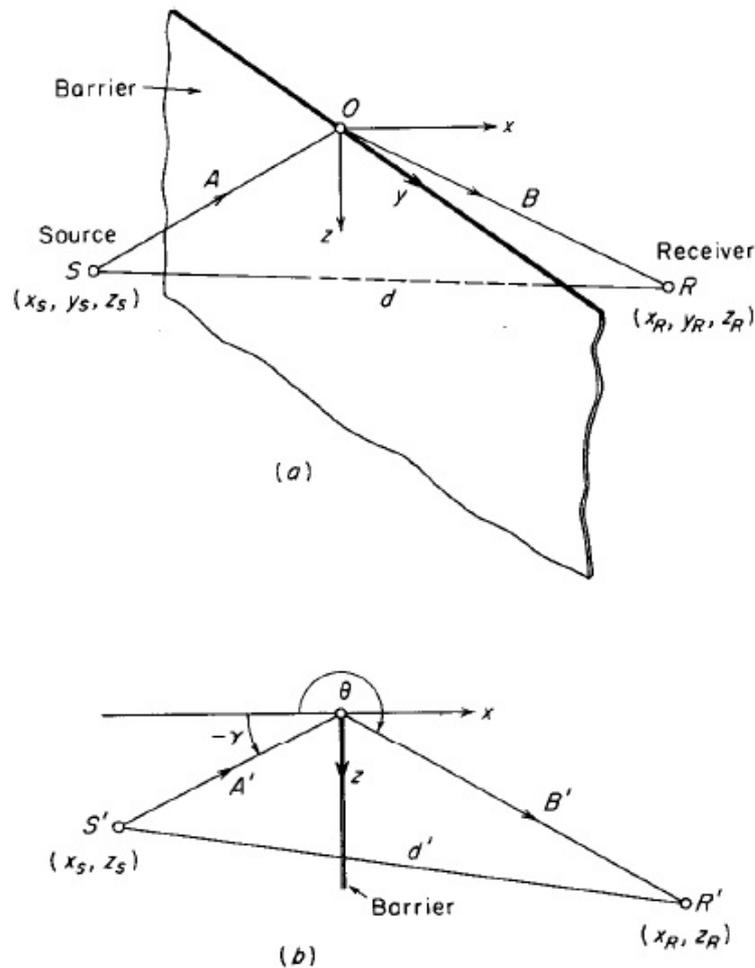
onde z é o incremento na distância em relação a reta que liga o emissor ao receptor (vide Figura 29)

$$z = A + B - d \quad (2.7)$$

e λ é o comprimento de onda. Além disso, mesmo para valores de z iguais a 0, há, no mínimo, uma atenuação de 5 dB. Para efeitos de engenharia, uma simplificação do problema pela teoria de difração ótica é recomendada.

Em conformidade com a teoria da propagação das ondas, uma onda que se propaga retilineamente não deveria, em hipótese, transpor barreiras. Todavia, segundo a teoria da difração, pontos nos cantos e no topo da barreira criarão fontes virtuais, que irão irradiar parte

Figura 29 – Efeito de screening: (a) visão em perspectiva e (b) plano de projeção perpendicular à barreira. A soma dos ângulos ($\gamma + \Theta$) é igual ao ângulo de refração da onda.



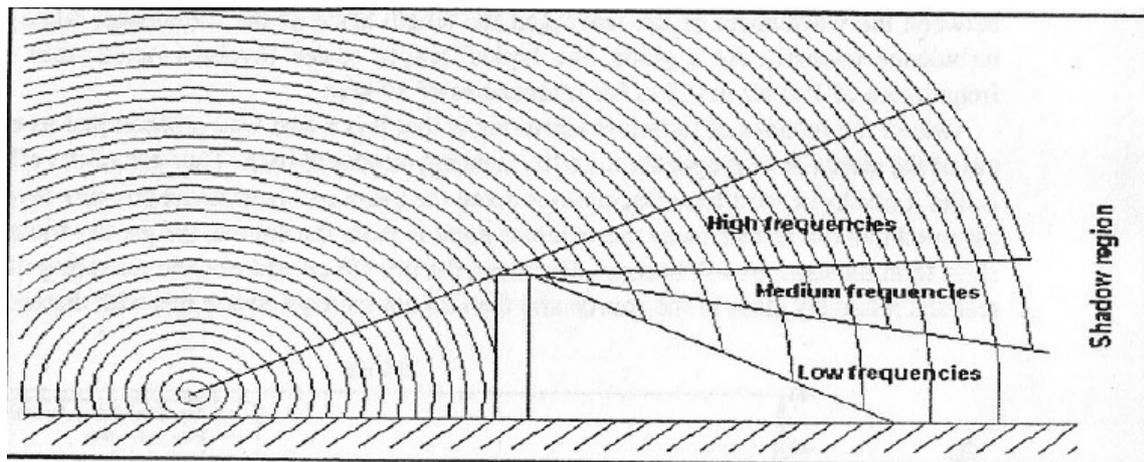
Fonte: Noise Control (LAMANCUSA, 2009).

da energia recebida, permitindo a propagação da energia sonora. Essa reemissão de ondas, todavia, varia conforme a frequência da onda. Frequências altas, onde os comprimentos de onda são menores ($\lambda = c/f$), irão penetrar a alturas maiores na zona de sombra que surge atrás de barreiras acústicas. Frequências baixas, por outro lado, irão penetrar mais fundo na zona de sombra, como mostra a Figura 30 (BOWDLER & LEVENTHALL, 2011).

Por isso, como características inerentes ao sistema, pode-se citar que barreiras são mais eficientes para atenuar frequências mais altas e devem ser tão altas quanto possível (aumentando o valor de z).

É importante salientar que o efeito de atenuação da barreira acústica é influenciado por efeito de solo e pelo clima. Como explicado anteriormente, no caso do solo refletir uma onda, poderá acontecer, no receptor, interações construtivas ou destrutivas. Uma barreira que bloqueie a onda refletida de propagar e impeça uma possível interação destrutiva de acontecer irá amplificar o ruído, ao invés de atenuá-lo. Já o vento, por dobrar os raios de propagação, pode até mesmo, dada condições favoráveis, anular completamente a atenuação das barreiras

Figura 30 – Efeito da barreira na difração das ondas para diferentes frequências.



Fonte: Wind Turbine Noise (BOWDLER & LEVENTHALL, 2011).

(VÉR & BERANEK, 2006).

Uma utilização interessante da atenuação da barreira acústica é em rodovias, onde barreiras são colocados nos dois lados para atenuar boa parte do ruído, sobretudo em zonas urbanas com grande população. Quando instaladas corretamente, os valores de atenuação podem chegar a 20 dB, correspondendo, aproximadamente, a uma atenuação de 5 dB na banda de 63 Hz e 30 dB na banda de 8 kHz. Todavia, como aerogeradores são normalmente instalados a alturas iguais ou superiores a 100 m, as barreiras acústicas possuem limitada eficácia na atenuação do ruído de fazendas eólicas, salvo acidentes geográficos, como montanhas ou morros. (BOWDLER & LEVENTHALL, 2011).

2.8.6 Efeitos miscelâneos

Alguns efeitos miscelâneos, que podem ser considerados no cálculo, são a atenuação por folhagem decorrente da presença de árvores, atenuação pela presença de sítios industriais e a atenuação pela presença de edificações.

A atenuação por folhagem só acontece quando houver uma grande quantidade de folhas, densas o suficiente para bloquear a visão do receptor da fonte emissora. Essa atenuação pode acontecer por folhagem perto da fonte, folhagem perto do receptor ou ambos os casos.

A atenuação por sítios industriais acontece devido ao espalhamentos das instalações e objetos típicos, como canos, válvulas, dentre outros. Devido as diversas configurações, é necessário uma medição para cada caso.

A atenuação pela presença de edificações acontecerá devido ao efeito de barreira acústica. Todavia, efeitos de reflexão entre as casas podem amplificar o som, fazendo com que esses efeitos possam se anular. Devido à complexidade das configurações, é recomendado que sejam feitas medições *in loco*.

Como esses efeitos são secundários e de difícil determinação, eles não serão considerados nesse trabalho, estando aqui apenas por razão de completude.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Norma ISO 9613

A norma ISO 9613, publicada em 1996, é uma norma internacional que apresenta um método padrão de cálculo para estimar o nível de pressão sonora que um receptor será submetido levando-se em consideração uma fonte emissora pontual. O resultado final do método prevê o nível de pressão sonora contínuo, ponderado em decibéis A, sob condições meteorológicas favoráveis de propagação do som.

Dentre as condições necessárias para a utilização do cálculo, destaca-se a suposição que a propagação é a favor do vento (*downwind*), o terreno possui porosidade moderada e há um lapso inverso, ou seja, a temperatura aumenta com a altura, típico de períodos noturnos.

No método aqui descrito, o algoritmo separa, calcula e atenua concomitantemente as frequências nominais centrais em bandas de oitava, notadamente nos seguintes valores: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz e 8.000 Hz, para uma fonte ou múltiplas fontes, estacionárias ou em movimento.

No que tange as atenuações, estão incluídas: divergência geométrica, absorção atmosférica, efeito do solo, barreira acústica por obstáculos e efeitos miscelâneos.

Além do uso para turbinas eólicas, é possível utilizar o mesmo método para calcular ruído do tráfego, ruído industrial, atividades de construção e de muitas outras fontes sonoras. Ele não contempla, porém, o som de aviões no ar, bem como o estrondo sonoro proveniente de mineração, atividades militares e operações similares.

Em razão da aplicação correta do método, uma série de parâmetros devem ser conhecidos em relação a geometria da fonte e do ambiente, as características da superfície e o nível de potência acústica da fonte em termos de bandas de oitava na direção de propagação estudada.

3.1.1 Descrição do método de cálculo

O nível de pressão sonora contínuo equivalente na condição a favor do vento em bandas de oitava na localização do receptor, L_{fT} , deve ser calculado para cada fonte emissora, nas oito bandas de oitavas com frequências nominais centrais entre 63 Hz até 8.000 Hz, como descrito

anteriormente, através da equação

$$L_{ft} = L_w + D_c - A \text{ [dB]} \quad (3.1)$$

sendo L_w o nível de potência sonora na banda de oitava, em decibéis, produzido pela fonte pontual; D_c o índice que diretividade, em decibéis, que, como dito anteriormente, é 0 dB para um fonte omnidirecional; A a atenuação da banda de oitava, em decibéis, que ocorre devido a uma série de fatores, entre a fonte emissora e o receptor, dado por

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (3.2)$$

onde: A_{div} = atenuação por divergência geométrica;

A_{atm} = atenuação por absorção atmosférica;

A_{gr} = atenuação devido ao tipo de solo;

A_{bar} = atenuação devido às barreiras;

A_{misc} = atenuação devido a fatores miscelâneos.

Esse valor, todavia, corresponde ao nível de pressão sonora global, em decibéis, que ainda deve ser ponderado na escala A, para se aproximar da audibilidade do ouvido humano. Para isso, o nível de pressão sonora ponderado em A, contínuo, na condição a favor do vento, L_{AT} , pode ser obtido através da soma das contribuições dos níveis de pressão sonora calculados de acordo com as equações acima para cada fonte pontual, e para cada banda da oitava, segundo a seguinte equação

$$L_{AT} = 10 * \log \left[\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^8 10^{0,1*[L_{fT}(ij)+A_f(j)]} \right] \right] \text{ [dB(A)]} \quad (3.3)$$

onde: n é o número de contribuições i (fontes e caminhos);

j é um índice indicando uma das oito frequências nominais centrais padrão entre 63 Hz e 8 kHz;

A_f indica a ponderação A.

Por fim, para encontrar o valor do nível de pressão sonora ponderado em A a longo prazo, é necessário fazer as correções meteorológicas C_{met}

$$L_{AT(LT)} = L_{AT} - C_{met} \text{ [dB(A)]} \quad (3.4)$$

3.1.2 Cálculo dos fatores de atenuação sonora

a. Divergência geométrica A_{div}

A divergência geométrica advém da propagação de uma onda esférica de uma fonte pontual num campo livre, sendo matematicamente igual a

$$A_{div} = 20 * \log(d) + 11 \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

onde, d é a distância da fonte até o receptor, em metros.

b. Absorção atmosférica A_{atm}

A absorção atmosférica, em decibéis, que ocorrerá devido a propagação por um distância d , em metros, é dado pela equação

$$A_{atm} = \frac{\alpha * d}{100} [dB] \quad (3.6)$$

onde, α é o coeficiente de atenuação atmosférico, em decibéis por quilômetro, para cada frequência nominal central na banda de oitava, conforme Quadro 7.

Quadro 7 – Coeficiente de atenuação atmosférica.

Temperatura	Umidade relativa	Coeficiente de atenuação atmosférica α , dB/km							
		Frequências nominais centrais, Hz							
°C	%	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Fonte: ISO 9613-2, 1996.

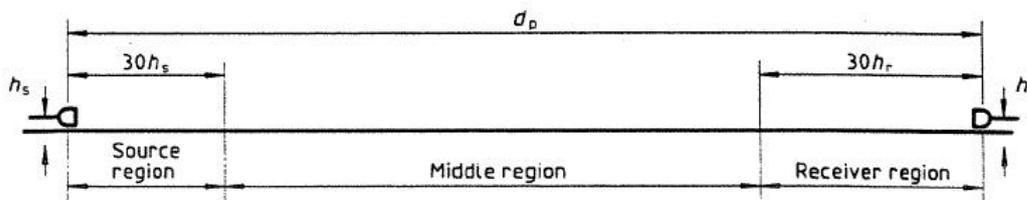
c. Efeito do solo A_{gr}

A norma ISO 9613-2 traz duas formas distintas de calcular o efeito de solo: um método geral e uma forma alternativa.

A atenuação do solo, A_{gr} , surge da reflexão do solo das ondas sonoras que se propagam. A condição de propagação a favor do vento assegura que a atenuação ocorrerá majoritariamente ao redor da fonte e ao redor do receptor. Como restrições do método, há o fato que ele considera o terreno plano ou com uma inclinação constante. Sendo assim, como mostrado na Figura 31, três regiões se destacam:

- a região da fonte (*source region*), que se estende da fonte até $30 h_s$ em direção ao receptor, com uma distância máxima d_p (sendo h_s a altura da fonte e d_p a distância entre a fonte e o receptor);
- a região do receptor (*receiver region*), que se estende do receptor até $30 h_r$ em direção à fonte, com uma distância máxima de d_p (sendo h_r a altura do receptor);
- uma região intermediária (*middle region*), que se encontra entre a região da fonte e a região do receptor. Havendo sobreposição das regiões do receptor e da fonte, não há região intermediária.

Figura 31 – Regiões distintas que determinam a atenuação do solo.



Fonte: ISO 9613-2, 1996.

Levando em consideração essa configuração, a atenuação depende principalmente das regiões do receptor e da fonte, com pouca influência da região intermediária, independentemente do tamanho da mesma.

Para considerar as propriedades acústicas do solo, considera-se um fator G . Esse fator engloba três possibilidades:

- solos não porosos (*hard ground*), que incluem pisos, água, gelo, concreto e outras superfícies que possuem pouca porosidade. Aqui, considera-se $G = 0$;
- solos porosos (*porous ground*), que incluem gramados, florestas, e solos de agricultura, que de forma geral são propícios ao crescimento de vegetação. Para solos porosos, considera-se $G = 1$;
- solos mistos (*mixed ground*), quando o solo possui regiões tanto porosas quanto não-porosas, sendo que o G será um valor entre 0 e 1, que depende da porção do solo que é efetivamente poroso.

Conhecendo esses fatores, calcula-se a atenuação do solo próximo a fonte, A_s , através do fator de solo G_s , a atenuação do solo próximo ao receptor, A_r , a partir do fator de solo G_r e a atenuação da região média A_m , a partir do fator de solo G_m . A atenuação total do solo será a soma de todas as componentes, como segue na equação

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \text{ [dB]} \quad (3.7)$$

O Quadro 8 apresenta as equações necessárias para o cálculo dos coeficientes e dos fatores, para todas as frequências nominais centrais das bandas de oitava.

d. Efeito do solo (A_{gr}) - Método alternativo

Em algumas situações específicas, pode ser necessário usar um método alternativo de cálculo. O método alternativo pode ser utilizado quando não há o nível de potência acústica da fonte dividido em bandas centrais de frequência, por exemplo, que é uma das exigências do método geral de cálculo. Além disso, é necessário que:

Quadro 8 – Expressões utilizadas para o cálculo da atenuação do solo em bandas de oitavas.

Frequência nominal central, Hz	A_s ou $A_r^a)$, dB	A_m , dB
63	-1,5	$-3 * q^b)$
125	$-1,5 + G * a'(h)$	$-3 * q(1 - G_m)$
250	$-1,5 + G * b'(h)$	
500	$-1,5 + G * c'(h)$	
1.000	$-1,5 + G * d'(h)$	
2.000	$-1,5 * (1 - G)$	
4.000	$-1,5 * (1 - G)$	
8.000	$-1,5 * (1 - G)$	

$a'(h) = 1,5 + 3,0 * e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}}) + 5,7 * e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8*10^6 * d_p^2})$
 $b'(h) = 1,5 + 8,6 * e^{-0,09h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}})$
 $c'(h) = 1,5 + 14,0 * e^{-0,46h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}})$
 $d'(h) = 1,5 + 5,0 * e^{-0,9h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}})$

a) Para calcular A_s , considerar $G = G_s$ e $h = h_s$;
Para calcular A_r , considerar $G = G_r$ e $h = h_r$.
b) $q = 0$, quando $\leq 30 * (h_s + h_r)$;
 $q = 1 - 30 * \left(\frac{h_s + h_r}{d_p}\right)$, quando $d_p > 30 * (h_s + h_r)$,
onde d_p é a distância receptor-fonte.

Fonte: ISO 9613-2, 1996.

- somente o nível de pressão sonora no receptor seja de interesse;
- a propagação do som se dê, na maior parte, em solo poroso;
- o som não possui tons puros.

Quando todos esses requisitos são preenchidos, é possível calcular a atenuação do solo pela seguinte equação

$$A_{gr} = 4,8 - \left(\frac{2 * h_m}{d}\right) * \left(17 + \frac{300}{d}\right) \geq 0 \text{ dB} \quad (3.8)$$

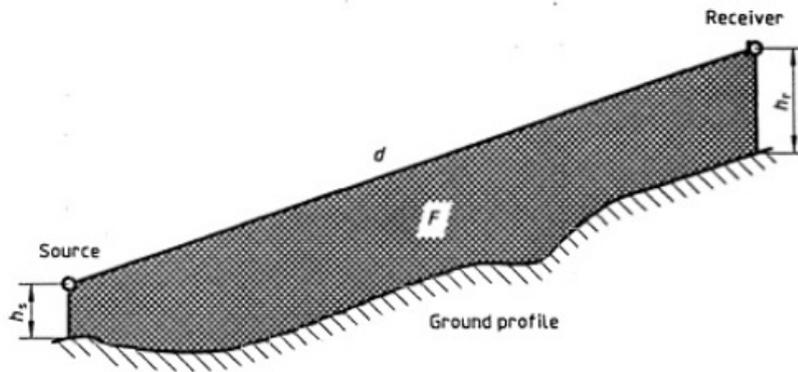
sendo h_m a altura média, acima do solo, em que se dá a propagação, em metros; d é a distância entre a fonte e o receptor.

A altura média, h_m , é calculada segundo a relação entre a área varrida entre a linha que conecta ambas as alturas e o solo (F) e a distância entre o receptor e a fonte, como pode ser visto na Figura 32.

Tendo a área e a distância, a altura média pode ser calculada pela expressão

$$h_m = \frac{F}{d} \quad (3.9)$$

Figura 32 – Método de cálculo para o cálculo da altura média.



Fonte: ISO 9613-2, 1996.

em que F pode ser a soma de uma série infinitesimal de pequenas áreas.

Um último ajuste, para utilizar o método, é a correção da diretividade, uma vez que esse método não considera o aumento do nível de potência acústica devido às reflexões próximas a fonte. Esse termo deve ser somado ao cálculo do ruído total, sendo igual a

$$D_{\Omega} = 10 * \log \left[1 + \frac{d_p^2 + (h_s - h_r)^2}{d_p^2 + (h_s + h_r)^2} \right] \quad (3.10)$$

onde: h_s é a altura da fonte;

h_r é a altura do receptor;

d_p é a distância entre a fonte e o receptor.

e. Barreiras acústicas / *Screening* (A_{bar})

Para um objeto ser considerado uma barreira acústica, algumas características devem estar presentes, como:

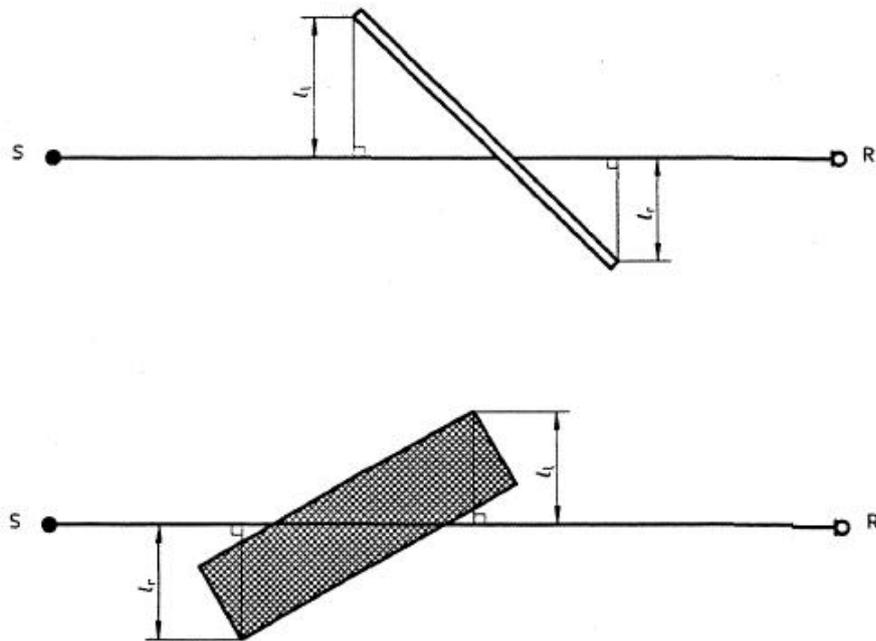
- a densidade superficial deve ser de, no mínimo, 10 kg/m^2 ;
- o objeto é sólido, ou seja, não há grandes fendas ou brechas;
- a dimensão horizontal do objeto, que é perpendicular a uma reta entre a fonte e o receptor, é maior que o comprimento de onda acústico da frequência nominal central de interesse, ou seja, $L_i + L_r > \lambda$. A Figura 33 apresenta esse fenômeno.

Como o estudo proposto é de parques eólicos, barreiras acústicas não serão consideradas no presente trabalho.

3.1.3 Condições meteorológicas C_{met}

As condições meteorológicas são de fundamental importância para o cálculo da propagação do ruído. A equação final que apresenta o resultado ponderado em A, considera condições

Figura 33 – Dimensão horizontal da barreira acústica normal à direção da linha de propagação.



Fonte: ISO 9613-2, 1996.

meteorológicas que são favoráveis à propagação do vento, de forma a mensurar a situação mais desfavorável para o ruído. No caso do nível sonoro médio a longo prazo ponderado em A, $L_{AT(LT)}$, o cálculo requer uma avaliação das condições meteorológicas durante meses ou anos, de modo que tanto condições favoráveis quanto desfavoráveis devem entrar na análise. Para isso, uma correção no coeficiente meteorológico C_{met} pode ser utilizado, segundo

$$C_{met} = 0, \quad \text{se } d_p \leq 10 * (h_s + h_r) \quad (3.11)$$

$$C_{met} = C_0 * \left[1 - \frac{10 * (h_s + h_r)}{d_p} \right], \quad \text{se } d_p > 10 * (h_s + h_r) \quad (3.12)$$

sendo, h_s a altura da fonte, em metros;

h_r a altura do receptor, em metros;

d_p a distância plana projetada entre a fonte e o receptor, em metros;

C_0 um fator, em decibéis, que varia conforme a velocidade e direção do vento, bem como o gradiente do vento.

3.1.4 Limitações da ISO 9613-2

Por ser um método bastante simplificado de cálculo, a ISO 9613-2 traz uma série de limitações, o que influencia negativamente a precisão dos resultados. Todavia, é comum que a ISO apresente valores levemente superiores a outros métodos de cálculo mais robustos, como o NORD2000, compensando a falta de precisão com resultados a favor da segurança.

A maior limitação relacionada ao cálculo é a generalização feita pela norma para as condições meteorológicas. A direção do vento é sempre igual a 45° da linha que conecta a fonte ao receptor, com o vento soprando em direção ao receptor. Além disso, as velocidades do vento variam entre 1 m/s e 5 m/s, aproximadamente, em alturas fixas.

Dentre as ausências mais importantes, destaca-se a não-consideração do gradiente do vento.

O gradiente do vento, que é a mudança na velocidade e na direção do vento conforme a altura, é um importante fator, visto que o vento na altura da turbina eólica é sempre maior que o vento na altura do receptor. E como o vento influencia consideravelmente o ruído, pode haver diferença nos cálculos. Como a potência acústica da turbina é um dado de entrada para os cálculos da norma, é essencial que o fabricante forneça os valores de potência acústica para diferentes velocidades de vento, e que o usuário do método calcule o gradiente do vento manualmente, de modo a compensar essa deficiência.

Em relação à temperatura e à umidade relativa do ar, esses são dados que podem variar consideravelmente quando o cálculo é feito para parques eólicos que abrangem grandes áreas. Além disso, essas condições podem variar consideravelmente durante o ano, principalmente em regiões temperadas, que apresentem as estações do ano bem definidas. Sendo assim, o uso de um único coeficiente para representar esses dados pode aumentar a incerteza do método.

Por fim, a forma com a ISO lida com o terreno também é bastante aproximada, principalmente para o método geral, onde se escolhe um único índice que será representativo de toda a região de implantação do parque eólico. Como essas regiões são grandes, é comum que o parque abranja os mais variados tipos de solos, com diferentes valores de porosidade. No caso do método alternativo, se o mesmo não utilizar um número adequado de divisões para calcular a altura média, pode incorrer a erros.

3.2 Descrição do algoritmo desenvolvido baseado na ISO 9613-2

Um algoritmo foi confeccionado com base no modelo de cálculo descrito pela norma ISO 9613-2, com o intuito de calcular o nível de pressão sonora gerado pelo ruído dos aerogeradores nos receptores. Esse algoritmo foi escrito em plataforma MatLab e reproduz de maneira fiel a norma. A validação do algoritmo será apresentada posteriormente.

A sequência lógica do algoritmo é apresentada de maneira simplificada no diagrama da Figura 34.

Inicialmente, é necessário que o usuário insira os dados referentes aos objetos que serão simulados, notadamente: altura da fonte, altura do receptor, distância entre a fonte e o receptor, porosidade do solo em diferentes regiões, existência de barreiras, se a difração ocorre por cima ou pelas laterais (caso haja barreira) e distância entre barreiras (caso haja mais de uma). Esses dados são inseridos via *prompt* de comando do MatLab, ou seja, o programa exibe uma mensagem requisitando um dado, como, por exemplo, a altura da fonte, e o usuário digita o mesmo, que será lido e guardado na memória do programa, para utilização nos cálculos. A Figura 35 mostra os *prompts* de comando do algoritmo.

Figura 34 – Dimensão horizontal da barreira acústica normal à direção da linha de propagação.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 35 – *Prompts* de comando do algoritmo.

```

Command Window
Insira a altura da fonte em metros: 80
Insira a altura do receptor em metros: 4
Insira a distância da fonte até o receptor em metros: 500
Insira, em relação a ISO 9613, a porosidade do solo em porcentagem (0 a 100%) na fonte: 0
Insira, em relação a ISO 9613, a porosidade do solo em porcentagem (0 a 100%) no receptor: 0
f: Há algum obstáculo que se enquadre nas normas da ISO 9613? (y,n): n
  
```

Fonte: elaborado pelo autor.

Com todos os dados submetidos, o programa iniciará o cálculo das atenuações sonoras conforme cada tipo de efeito considerado. Para isso, mais alguns dados serão necessários, como o valor do nível de potência acústica, do aerogerador, em bandas de frequências nominais centrais, entre 63 e 8.000 Hz, e o valor do coeficiente alfa que é utilizado para calcular a absorção atmosférica e que depende da temperatura e da pressão atmosférica. Esse coeficiente pode ser encontrado nas duas partes que compõem a norma ISO 9613.

Após todos os valores estarem calculados por bandas de frequência, há a ponderação em A, que tem por objetivo aproximar o ruído da sensação humana. Ela acontece segundo uma simples adição ou subtração conforme a banda de frequência. Os coeficientes utilizados se encontram no Quadro 9.

Por fim, há a soma da componente de cada frequência para encontrar o ruído final. Esse ruído final ainda será atenuado segundo o coeficiente meteorológico, que requer que o usuário consulte a norma ISO 9613-2 para encontrar o valor do coeficiente C_0 .

Ao término de todos os cálculos, o algoritmo devolverá o nível de pressão sonora total e o valor do nível de pressão sonora por bandas de frequência ponderados em A. A Figura 37 apresenta os dados de saída do algoritmo.

3.3 Descrição básica do programa WindPRO

O programa computacional WindPRO é um *software* comercial baseado em módulos, que tem como objetivo auxiliar no planejamento de parques eólicos. Com o *software*, é possível passar por todas as etapas do projeto, desde a otimização da posição dos aerogeradores para o máximo aproveitamento da energia eólica, até o estudo financeiro do empreendimento. Além disso, o

Figura 36 – Dados de saída do algoritmo.

```

Command Window
O nível de ruído sonoro na banda de 63 Hz no receptor é de: 55.9706 dB
O nível de ruído sonoro na banda de 125 Hz no receptor é de: 50.8206 dB
O nível de ruído sonoro na banda de 250 Hz no receptor é de: 46.5206 dB
O nível de ruído sonoro na banda de 500 Hz no receptor é de: 43.0706 dB
O nível de ruído sonoro na banda de 1000 Hz no receptor é de: 39.1706 dB
O nível de ruído sonoro na banda de 2000 Hz no receptor é de: 32.1706 dB
O nível de ruído sonoro na banda de 4000 Hz no receptor é de: 13.6206 dB
O nível de ruído sonoro na banda de 8000 Hz no receptor é de: -38.4794 dB
O nível de ruído sonoro total no receptor é de: 44.8114 dB

```

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 9 – Ponderação em A.

Frequência nominal central, Hz	Curva A, dB
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1.000	0
2.000	+1,2
4.000	+1
8.000	-1,1

Elaborado pelo autor. Fonte: Noise News.

WindPRO também possui módulos específicos para calcular o impacto ambiental, relacionados ao ruído, *flickering* e zonas de sombreamento, que podem trazer incômodo aos residentes.

Dentre os módulos encontrados no WindPRO, interessa, para o presente trabalho, o módulo DECIBEL, que é baseado inteiramente no método de cálculo descrito na norma ISO 9613-2. A grande vantagem do uso do *software* comercial é a possibilidade de extrapolar o número de aerogeradores para uma quantidade tão grande quanto queira o usuário, limitado apenas pela capacidade computacional. Essa facilidade será extensamente utilizada no trabalho, com uma série de testes e configurações diferentes sendo rodados como forma de estudar a influência de certos parâmetros no ruído total, bem como para estudar o ruído gerado pela implantação de um parque eólico.

3.3.1 Módulo DECIBEL

O DECIBEL é um módulo utilizado para estudar o impacto do ruído em áreas sensíveis ao ruído, devido a implantação de um parque eólico. Os cálculos são rodados para ventos a uma altura de dez metros ou na altura do centro da turbina (denominada *hub height*), para uma

dada direção, em valor global ou em bandas de oitava do nível de pressão sonora. Os limites relacionados ao ruído (normalmente encontrados em normas e diferentes conforme o país) e as distâncias mínimas das residências podem ser inseridos manualmente, e serão utilizados pelo programa, no relatório final, como meio de comparação, para checar se há extrapolação dos mesmos. Por fim, é também possível, caso conhecido, inserir no programa o nível de pressão sonora do ruído ambiente, que irá calcular o nível de pressão sonora do ruído dos aerogeradores e comparar a soma de ambos os ruídos com uma margem de incremento admitida.

a. Inserção de objetos

As simulações no programa WindPRO serão feitas através de objetos, os quais deverão ser inseridos manualmente. Para cada objeto inserido, é necessário fornecer os dados do mesmo, referente aos parâmetros que serão utilizados na simulação, como coordenadas geográficas e topográficas, bem como outras informações específicas, que variam conforme o objeto.

b. Configurações iniciais

O *setup* padrão já apresenta todas as funções importantes selecionadas, possibilitando o cálculo nas áreas sensíveis ao ruído (NSA) e a confecção de um mapa de ruído (ver Figura 38), que apresentará o resultado através de curvas de nível coloridas em torno de todos os aerogeradores (WTGs).

Um fator importante é o cálculo da distância dos aerogeradores até as residências. Essa distância deve respeitar um limite mínimo, que é variável conforme as especificações técnicas do aerogerador e demandas da legislação. Um recurso interessante é o *distance to demand*, que relaciona a distância da residência até a curva de nível que possui o valor da demanda.

Por fim, em *Noise calculation model*, há uma gama de possibilidades em relação ao método utilizado. Essa grande variabilidade surge do fato que a legislação de alguns países exige critérios específicos para o cálculo, de forma que o WindPRO já os traz fixos. No caso do Brasil, utilizaremos o método da ISO 9613-2 General, que é a forma padrão de cálculo descrito na norma.

c. Aerogeradores

Na aba “WTG” deve-se selecionar o *layer* que contém os aerogeradores que serão simulados. O WindPRO evidencia com exatidão os objetos selecionados.

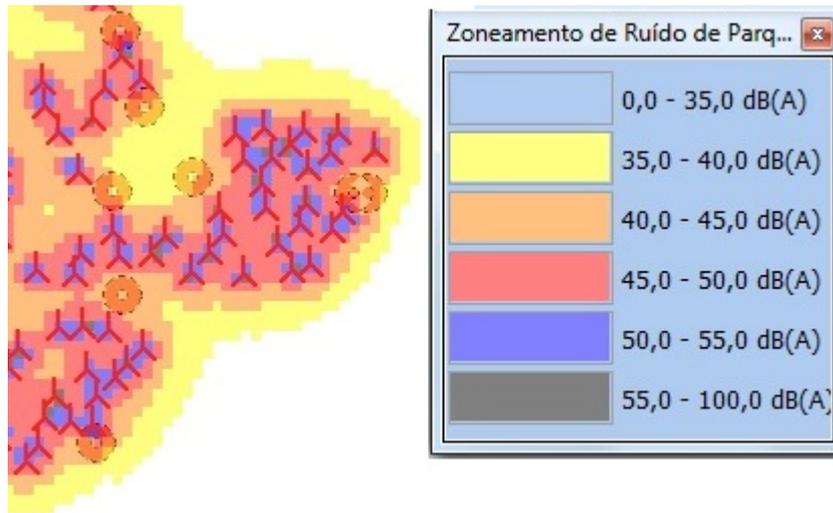
d. Áreas sensíveis ao ruído

Na aba NSA, na mesma forma que na aba WTG, deverão ser selecionados as áreas sensíveis ao ruído, que, normalmente, são as residências habitadas.

e. Mapa de ruído

A quarta aba presente é a referente às configurações que serão utilizadas para a confecção do mapa de ruído, e irão variar conforme a necessidade.

Figura 37 – Mapa de ruído com os aerogeradores (estrutura triangular em vermelho) e as residências (círculos vazados em rosa).



Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

3.3.2 Implementação do método ISO 9613-2 General

Na aba *Main*, a opção *Edit model parameters* apresenta os principais parâmetros relacionados ao cálculo do ruído, sendo eles: velocidade do vento, bandas de frequência de oitava, distribuição espectral, atenuação do solo, coeficientes meteorológicos, tipo de demanda e valores de ruído.

a. Velocidade do vento

Há, ao todo, seis modos diferentes de cálculo. Desses, os dois modos de interesse são:

- *Fixed wind speed*: o cálculo será feito com apenas uma velocidade de vento, fixa, a ser definida no campo ao lado.
- *Wind speed range*: o cálculo será feito para mais de uma velocidade de vento, e uma velocidade mínima, um máximo e um incremento devem ser escolhidos no campo ao lado.

b. Distribuição por bandas de oitavas

Essa opção força o programa a usar uma distribuição em bandas de oitavas ao invés do valor total do ruído.

c. Distribuição espectral

Essa opção permite que o cálculo seja feito para cada banda espectral. Um intervalo de frequências deve ser escolhido. Esse modo é importante quando há limites diferentes para cada frequência.

d. Atenuação do solo

Há quatro diferentes tipos de atenuações. Dessas, são utilizadas as seguintes:

- *General*: a atenuação do ruído segue o método descrito na ISO 9613-2. Aqui, o usuário necessita informar um fator de porosidade geral, que varia de 0 (para o caso de superfícies rígidas) e 1 (para o caso de superfícies porosas), sendo que 0 é a favor da segurança. Na versão *fixed*, conta com algumas opções mais avançadas, como a possibilidade de considerar efeito de vale e o efeito *screening*. Já em *terrain specific*, é possível, através da própria topografia do terreno, selecionar porções de áreas homogêneas previamente inseridas em *area objects* e definir coeficientes específicos de porosidade para elas. Esse método é indicado para os casos em que o terreno é relativamente homogêneo. Caso contrário, recomenda-se usar o método *Alternative*.
- *Alternative*: a opção *Alternative* também se baseia no método descrito na ISO 9613-2, porém na sua versão alternativa. Esse método utiliza o formato orográfico do terreno (inserido como *Line Data*) para calcular a atenuação do ruído, de modo que um vale diminuirá a atenuação e uma montanha aumentará a atenuação. Caso um modelo orográfico (*height contours*) não seja informado, o programa assumirá um terreno em declive constante entre as WTGs e as NSAs (uma vez que a altura do centro da turbina pode chegar até a 100 m, e as NSAs normalmente se encontram em altitudes menores). Para o método ser utilizado com sucesso, necessita-se de:
 1. Somente o volume total do ruído é requerido;
 2. O som predominantemente se propaga por superfícies porosas;
 3. O som não é um tom puro (forma mais básico do som, sendo totalmente definido por apenas uma frequência).

e. Coeficiente meteorológico

O valor para o coeficiente meteorológico deve ser entre 0 e 5, e está relacionado a atenuação por condições meteorológicas especiais, como, por exemplo, quando o ruído está sendo propagado na direção contrária ao vento. Para a maioria das aplicações, recomenda-se usar 0, que seria a situação onde o ruído está se propagando na direção a favor do vento.

f. Tipo de demanda no cálculo

Há três opções, mas apenas uma é utilizada.

WTG noise is compared to demand: o ruído das turbinas de vento é comparado à demanda crítica definida para cada receptor. Se o cálculo cobrir mais de uma velocidade de vento, a demanda será fixa ou específica para cada velocidade.

g. Valores de ruído

Há duas opções, mas apenas uma é utilizada.

All noise values are mean values (L_{wa}): essa é a opção padrão. Todos os valores e os cálculos serão ruído de nível médio (L_{wa}).

h. Som tonal

Som tonal acontecem quando uma banda possui um valor de ruído maior que ambas as bandas vizinhas. É, todavia, incomum em turbinas modernas. Os valores para caracterização de som tonal são retirados da norma NBR 10151, e apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Caracterização de som tonal.

Banda de 1/3 de oitava de interesse	Diferença aritmética entre o nível de pressão sonora da banda de interesse e das bandas adjacentes
25 Hz a 125 Hz	≥ 15 dB
160 Hz a 400 Hz	≥ 8 dB
500 Hz a 10.000 Hz	≥ 5 dB

Fonte: NBR 10151, 2017 (adaptado).

i. Altura do receptor

Essa opção permite ao usuário especificar a altura de cálculo do receptor. Códigos diferentes possuem recomendações diferentes para a altura, sendo 1,5 m, 4 m e 5 m valores típicos. Se a opção *Allow override...* estiver ativa, então a altura individual de cada receptor será levada em conta, porém somente se cada NSA tiver um valor específico de altura informada.

j. Absorção do ar

A absorção do ar depende de uma série de fatores, como temperatura, umidade e pressão atmosférica.

3.3.3 Simulações

Assim como no caso dos aerogeradores, é possível, a partir das propriedades do mesmo, modificar dados que são de suma importância para a simulação, denominados *Demands*. A demanda é um conceito ligado ao máximo ruído que os aerogeradores poderão gerar sem que haja um impacto negativo na qualidade de vida dos moradores locais. Para a demanda, há duas alternativas: comparar o ruído gerado pelos aerogeradores com um ruído máximo ou analisar a soma do ruído ambiente com o ruído dos aerogeradores com uma margem aceitável de incremento de ruído.

a. Comparação do ruído gerado com o ruído máximo

No caso de comparar o ruído gerado pelos aerogeradores com um ruído máximo, que deve ser pesquisado em normas, o WindPRO fará uma comparação simples, de modo a determinar se a demanda foi atendida ou não. Para isso, é necessário inserir o valor de demanda no campo *Noise demand*. Esse valor pode ser variável, para diferentes valores de velocidade de vento. Além das velocidades de vento, pode-se discretizar por bandas espectrais, que funcionará da mesma forma que a discretização por velocidades do vento. Além disso, é importante salientar que esse processo deve ser feito para cada NSA.

No caso da Brasil, a norma de interesse é a NBR 10151, que traz os limites dos níveis de pressão sonora para diferentes tipos de áreas habilitadas e períodos, como apresenta o Quadro 11.

Quadro 11 – Limites de níveis de pressão sonora em função dos tipos de áreas habitadas e do período

Tipos de áreas habitadas	RLAeq Limites de níveis de pressão sonora	
	Período diurno	Período noturno
Área de residências rurais	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista predominantemente residencial	55	50
Área mista com predominância de atividades comerciais e/ou administrativa	60	55
Área mista com predominância de atividades culturais, lazer e turismo	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: NBR 10151, 2017.

b. Comparação do incremento do ruído ambiente com uma margem tolerável

A segunda alternativa para a comparação é informar o parâmetro ruído ambiente, medido *in loco*. Além dele, é necessário inserir também um parâmetro *margin*, que é a margem permitida para o aumento do ruído. Com ambos os parâmetros, o WindPRO irá somar o ruído ambiente com o ruído simulado das turbinas e comparar com o ruído ambiente somado à margem, determinando se o incremento foi maior que o permitido. Além disso, também é possível discretizar tanto o ruído ambiental quanto a margem permitida em diferentes valores de velocidades. Como mencionado anteriormente, esse processo deve ser feito para cada NSA.

c. Verificação da distância mínima

Por fim, como mencionado anteriormente, há também a opção de indicar uma distância mínima, de forma que o programa testará a distância de todos os aerogeradores até todas as

áreas sensíveis ao ruído.

3.3.4 Resultado final

O resultado final do cálculo poderá ser apresentado de cinco formas diferentes, sendo elas: *Main Result*, *Detailed results*, *Detailed results, graphic*, *Assumptions for noise calculation* e *Map*. Cada uma das opções gerará um arquivo em pdf. *Main Result* é geralmente o documento mais importante, pois apresentará todos os resultados de maneira concisa, podendo os outros serem utilizados de maneira auxiliar.

Capítulo 4

Resultados

Os resultados das simulações aqui apresentados serão divididos em cinco seções: a primeira será utilizada para validar o algoritmo desenvolvido em MatLab, a segunda para validar o *software* WindPRO, a terceira para apresentar a modelagem de um parque eólico pelo *software* WindPRO, a quarta para entender o efeito que a variação da velocidade do vento possui no valor final do nível de pressão sonora (NPS) e a quinta para estudar a relação entre a distância e quantidade de aerogeradores e o incremento do ruído. Por último, há uma seção dedicado as medições realizadas em campo.

4.1 Validação do algoritmo desenvolvido

Os resultados a seguir demonstram comparações entre valores retirados do livro *Wind Turbine Noise*, de Bowdler e Leventhall (2011), com valores alcançados pelo algoritmo apresentado no Apêndice A, estando ambos simulando o método descrito na ISO 9316-2.

Além do método que simula a norma ISO 9613-2, o livro ainda traz outros dois modelos, diferentes, para comparação: o modelo da equação de onda, que resolve uma equação se baseando na teoria eletromagnética, e o Harmonoise, um modelo europeu para previsão do ruído, que pode ser utilizada para diferentes fontes. Como ambos os modelos são complexos por si só, eles não serão detalhados nesse trabalho, estando aqui apenas para comparação com o modelo descrito na ISO 9613-2.

O Quadro 12, retirada do livro, traz os níveis típicos de potência sonora para turbinas eólicas que serão utilizados nas simulações. A velocidade do vento adotada para todas as simulações é de 4 m/s a 10 m de altura.

Na primeira simulação, adotou-se uma altura da fonte de 80 m, uma altura do receptor de 1,5 m, uma distância entre a fonte e o receptor de 500 m e um solo acusticamente duro, ou seja, que não absorve as ondas sonoras ($G = 0$) e sem obstáculos. A Tabela 3 apresenta os valores retirados do livro e o resultado do algoritmo forjado pelo autor. A última coluna se refere ao NPS total, já ponderado em A.

Os resultados, como pode ser observado, ficaram suficientemente próximos. É importante salientar que o referido livro não apresentou valores de temperatura e umidade, de modo que a atenuação atmosférica utilizada foi genérica (10 °C de temperatura e 70% de umidade relativa),

Quadro 12 – Valores de pressão sonora por banda de oitava em uma turbina eólica típica.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
NPS por banda de oitava, dB(A)	118	113	109	106	103	99	92	82

Fonte: Wind Turbine Noise (BOWDLER & LEVENTHALL, 2011).

Tabela 3 – Valores da simulação do NPS para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
ISO 9613-2, dB(A)	56,1	50,8	46,0	42,9	38,8	32,3	16,6	-	45
Wave Solution, dB(A)	58,4	52,5	44,6	40,3	38,7	32,3	20,8	-	44
Harmonoise, dB(A)	58,6	52,8	45,0	40,0	39,7	33,5	17,6	4,9	44
Algoritmo, dB(A)	56,0	50,9	46,5	43,1	39,2	32,2	13,6	-	44,81

Fonte: elaborado pelo autor.

sendo possivelmente responsável por eventuais discrepâncias. É perceptível, também, que tanto o modelo “Wave Solution” quanto o “Harmonoise” apresentam valores menores de NPS nas bandas de 250 Hz e 500 Hz. Isso acontece porque ambos os modelos consideram a interferência entre ondas diretas e refletidas, que, para as alturas de 80 m e 1,5 m, para a fonte e receptor, respectivamente, e 500 m de distância, acontece em 370 Hz.

Na segunda simulação adotou-se os mesmos valores para a altura da fonte, do receptor e a distância entre ambos, porém mudou-se a configuração do solo, que passou a ser considerado misto ($G = 0,5$). Com exceção de casos em que se pode atender a recomendação da norma de assumir um solo com nenhuma absorção sonora ($G = 0$, para água ou concreto) ou com absorção alta ($G = 1$, para neve ou floresta), que são raros, um índice misto de $G = 0,5$ pode ser utilizado para caracterizar área arada ou pastagens, o que condiz com a realidade, uma vez que parques eólicos normalmente são instalados em zonas rurais. A Tabela 4 mostra a comparação dos valores e o resultado do algoritmo.

É interessante observar, nessa simulação, que a diminuição do NPS total para os métodos que simulam a ISO 9613-2 é de aproximadamente 3 dB(A), ao contrário dos outros métodos, em que houve pouca alteração no NPS máximo. Esse fenômeno tem relação com a altura do

Tabela 4 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo misto e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
ISO 9613-2, dB(A)	56,1	47,8	40,9	38,9	37,0	30,8	15,1	-	42
Wave Solution, dB(A)	59,7	52,0	43,3	40,4	37,1	30,8	18,9	-	43
Harmonoise, dB(A)	59,9	52,2	43,8	40,5	38,0	31,3	21,1	4,8	44
Algoritmo, dB(A)	56,0	47,8	41,5	39,1	37,3	30,7	12,1	-	41,83

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Diferença na atenuação entre solo acusticamente duro e solo misto para 500 m de distância entre a fonte e o receptor.

Frequência, Hz	Solo acusticamente duro (G=0), dB(A)	Solo misto (G=0,5), dB(A)	Diferença, dB(A)
63	56,0	56,0	0
125	50,9	47,8	3,1
250	46,5	41,5	5,0
500	43,1	39,1	4,0
1.000	39,2	37,3	1,9
2.000	32,2	30,7	1,5
4.000	13,6	12,1	1,5
8.000	-	-	-
Total	44,81	41,83	2,98

Fonte: elaborado pelo autor.

receptor e será explorado adiante. A Tabela 5 apresenta a diferença por bandas de frequência para a ISO 9613-2.

A atenuação é evidente principalmente nas frequências de 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz. Isso é condizente com o efeito comentado anteriormente, chamado de *ground effect dip*, que ocorre devido a transformação da energia acústica em energia vibracional.

Em relação à acurácia do algoritmo, vê-se que os resultados foram condizentes e, além disso, pode-se notar que a diferença se manteve constante em praticamente todos os valores.

A terceira simulação apresentada utilizou os mesmos parâmetros utilizados na primeira, com modificação na distância entre a fonte e o receptor, que passou a ser de 1.500 m. A Tabela 6 apresenta o resultado do algoritmo desenvolvido e os valores comparados.

Tabela 6 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
ISO 9613-2, dB(A)	46,5	41,0	35,4	31,1	25,3	14,0	-	-	33
Wave Solution, dB(A)	49,2	43,8	39,0	32,3	19,1	16,2	3,3	-	34
Harmonoise, dB(A)	49,4	44,1	39,6	33,1	19,0	16,2	3,4	4,9	35
Algoritmo, dB(A)	46,3	40,9	36,0	31,6	26,0	13,0	-	-	33,15

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo misto e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
ISO 9613-2, dB(A)	46,5	36,8	30,4	27,1	23,5	12,5	-	-	33
Wave Solution, dB(A)	46,8	39,4	30,9	24,8	25,5	14,2	3,4	-	34
Harmonoise, dB(A)	47,1	39,8	31,5	25,0	26,6	17,0	5,7	4,9	35
Algoritmo, dB(A)	46,3	36,7	31,0	27,6	24,1	11,4	-	-	33,15

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim como na primeira simulação, aqui também há a interferência entre a onda emitida e a onda refletida. Essa interferência, todavia, acontece próximo aos 1.000 Hz, devido a maior distância entre a fonte e o receptor. Isso explica a atenuação ocorrida nos valores tanto do “Wave Solution” quanto do “Harmonoise”.

Novamente, em relação ao algoritmo, vemos que o resultado foi satisfatório, apesar de alguns valores estarem mais discrepantes. O resultado final do NPS, todavia, continua bastante próximo.

A quarta simulação foi realizada com os mesmos valores que a anterior, porém em solo misto. A Tabela 7 traz as comparações o resultado da simulação do algoritmo desenvolvido.

Ao contrário da primeira comparação, onde apenas o modelo da ISO 9613-2 possuía uma diminuição considerável no NPS, todos os modelos apresentaram uma queda no NPS total, em

Tabela 8 – Diferença na atenuação entre solo acusticamente duro e solo misto para 1.500 m de distância entre a fonte e o receptor com 1,5 m de altura.

Frequência, Hz	Solo acusticamente duro (G=0), dB(A)	Solo misto (G=0,5), dB(A)	Diferença, dB(A)
63	46,3	46,3	0
125	40,9	36,7	4,2
250	36,0	31,0	5,0
500	31,6	27,6	4,0
1.000	26,0	24,1	1,9
2.000	13,0	11,4	1,6
4.000	-	-	-
8.000	-	-	-
Total	33,15	29,74	3,41

Fonte: elaborado pelo autor.

torno de 4 dB(A). Essa queda pode ser explicada, principalmente, pela maior influência do solo em distâncias maiores. Novamente pode-se notar o *ground effect dip*, agora mais pronunciado, como apresentado na Tabela 8.

Os resultados do algoritmo, uma vez mais, foram condizentes, provando que o algoritmo lida corretamente com uma série de parâmetros.

É interessante notar que há, na literatura, a recomendação de que uma altura do receptor de 4,0 m deve ser usada, no mínimo, visto que alturas inferiores a 4,0 m aumentariam consideravelmente a sensibilidade do modelo em relação ao solo. Assim, duas simulações foram feitas: uma igual a terceira simulação (altura da fonte de 80 m, distância fonte-receptor de 1.500 m e solo acusticamente duro, com altura do receptor de 4,0 m) e outra igual a quarta simulação (altura da fonte de 80 m, distância fonte-receptor de 1.500 m e solo misto, com altura do receptor de 4,0 m), de modo que as simulações possam ser comparadas para ser analisada a relação entre altura do receptor e configuração do solo.

Ainda em relação a Tabela 8, referente a um receptor com 1,5 m de altura, há um incremento máximo de 5,0 dB(A), na banda de 250 Hz, e uma alteração média de 3,3 dB(A).

As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores para as mesmas simulações e os resultados do algoritmo, porém com uma altura de receptor de 4,0 m.

No tocante à ISO 9613-2, no caso do solo acusticamente duro, na Tabela 9 é notável que a mudança de altura no receptor em nada alterou os valores dos NPS por frequência ou do NPS total, em relação à Tabela 6. Isso é esperado, visto que, para o caso de um solo acusticamente duro, a altura do receptor não influencia no NPS total.

No que se refere ao caso de solo misto, todavia, há um incremento de 2 dB(A), de 29 dB(A), na Tabela 7, para 31 dB(A), na Tabela 10. Isso fez com que o modelo da ISO 9613-2 se aproxime mais dos outros modelos em relação ao ruído total. As Tabelas 11 e 12 apresentam a

Tabela 9 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 4,0 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
ISO 9613-2, dB(A)	46,5	41,0	35,4	31,1	25,3	14,1	-	-	33
Wave Solution, dB(A)	48,9	43,0	35,3	26,5	26,8	15,7	3,4	-	33
Harmonoise, dB(A)	48,6	43,9	35,4	23,3	25,3	16,5	5,3	4,9	33
Algoritmo, dB(A)	46,3	40,9	36,0	31,6	25,9	12,9	-	-	33,14

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Valores da simulação de ruído para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 4,0 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo misto e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
ISO 9613-2, dB(A)	46,5	37,5	32,9	29,6	23,8	12,6	-	-	31
Wave Solution, dB(A)	46,2	37,4	30,2	31,3	22,2	13,9	3,4	-	31
Harmonoise, dB(A)	44,5	37,6	29,2	30,9	20,1	13,7	3,4	4,9	30
Algoritmo, dB(A)	46,3	37,4	33,5	30,1	24,4	11,4	-	-	31,24

Fonte: elaborado pelo autor.

comparação entre o solo acusticamente duro e o solo misto.

Aqui, é possível notar que as alterações foram menores em todas as bandas, com um valor máximo de 3,5 dB(A), na banda de 125 Hz, e um valor médio de 2,1 dB(A). Conclui-se que, para alturas de receptor igual a 1,5 m, o modelo da ISO 9613-2 é particularmente sensível ao efeito do solo, podendo gerar uma atenuação maior do que a esperada.

4.2 Validação de resultados do WindPRO

Devido à complexidade e o tempo necessário para forjar um algoritmo que simule todo o parque, optou-se por utilizar um programa comercial que faça o cálculo baseado na norma ISO 9613-2. Todavia, *softwares* comerciais são conhecidos como "caixas pretas", pois normalmente

Tabela 11 – Diferença na atenuação entre solo acusticamente duro e solo misto para 1.500 m de distância entre a fonte e o receptor com 4,0 de altura.

Frequência, Hz	Solo acusticamente duro (G=0), dB(A)	Solo misto (G=0,5), dB(A)	Diferença, dB(A)
63	46,3	46,3	0
125	40,9	37,4	3,5
250	36,0	33,5	2,5
500	31,6	30,1	1,5
1.000	26,0	24,4	1,5
2.000	13,0	11,4	1,5
4.000	-	-	-
8.000	-	-	-
Total	33,15	29,74	3,41

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Diferença de atenuação para altura de receptor 1,5 m ou 4,0 m.

Frequência, Hz	Diferença, em dB(A), para $h_r = 1,5$ m	Diferença, em dB(A), para $h_r = 4,0$ m	Diferença de atenuação
63	0	0	-
125	4,2	3,5	-0,7
250	5,0	2,5	-2,5
500	4,0	1,5	-2,5
1.000	1,9	1,5	-0,4
2.000	1,6	1,5	-0,1
4.000	-	-	-
8.000	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

os códigos implementados não são abertos ao público. Para contornar esse problema, fez-se comparações através das simulações do algoritmo e do WindPRO, de modo a avaliar, mesmo que de forma limitada, se os resultados são suficientemente parecidos.

Para as simulações, utilizou-se os quatro cenários anteriores, notadamente: uma distância entre 500 m entre a fonte e o receptor, com solo acusticamente duro e misto, e uma distância de 1.500 m, com os mesmos tipos de solo.

Todas as simulações foram feitas com os mesmos parâmetros, como mostra o Quadro 13.

Quadro 13 – Parâmetros utilizados nas simulações de validação.

Modelo de cálculo de ruído	ISO 9613-2 General
Velocidade do vento	4,0 m/s
Distribuição por bandas de oitavas	Yes
Distribuição espectral	From 62,5 Hz to 8.000 Hz
Coefficiente de absorção do solo	Variável
Coefficiente meteorológico	0 dB(A)
Tipo de demanda no cálculo	1: WTG noise is compared to demand
Valores de ruído	All noise values are mean values (L_{wa})
Som tonal	Fixed penalty added to source noise of WTG
Penalidade por som tonal	5,0 dB(A)
Altura do receptor	4,0 m
Desvio de demandas oficiais	0 dB(A)

Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

A única particularidade é o coeficiente de absorção do solo (*ground attenuation*), sendo 0 para o solo acusticamente duro e 0,5 para o solo misto. A absorção do ar foi considerada conforme os valores-padrão recomendados pela norma ISO 9613-2, apresentados no Quadro 14. Todos os dados utilizados estão idênticos aos dados rodados pelo algoritmo, originários do livro Wind Turbine Noise (BOWDLER & LEVENTHALL, 2011). Para a simulação, criou-se um aerogerador customizado, com o mesmo nível de potência acústica nas bandas de frequência, conforme Quadro 12.

A primeira simulação abordou o caso em que a distância entre fonte e receptor é de 500 m, com o solo acusticamente duro. A Tabela 13 traz uma comparação entre os resultados dos NPS gerados pelo *software* WindPRO e o algoritmo. Os resultados foram bastante próximos, com um desvio máximo de 0,2 dB(A).

A segunda simulação utiliza os mesmos parâmetros da primeira, com exceção do solo, que agora é misto ($G = 0,5$). A Tabela 14 mostra uma comparação de ambos os resultados fornecidos pelo WindPRO e o algoritmo confeccionado. Novamente, os valores foram praticamente idênticos, com um desvio máximo de 0,2 dB(A).

Quadro 14 – Coeficientes de absorção do ar, por frequência.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Absorção do ar, dB/km	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
WindPRO, dB(A)	55,9	50,7	46,4	43,0	39,1	32,0	13,4	-	44,71
Algoritmo, dB(A)	56,0	50,9	46,5	43,1	39,2	32,2	13,6	-	44,81

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 500 m e solo misto e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
WindPRO, dB(A)	55,9	47,7	41,4	39,0	37,2	30,5	11,9	-	41,73
Algoritmo, dB(A)	56,0	47,8	41,5	39,1	37,3	30,7	12,1	-	41,83

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo acusticamente duro e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
WindPRO, dB(A)	46,3	40,9	36,0	31,6	25,9	13,0	-	-	33,16
Algoritmo, dB(A)	46,3	40,9	36,0	31,6	26,0	13,0	-	-	33,15

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Comparação entre os valores de NPS da simulação do WindPRO e do algoritmo para altura da fonte de 80 m, altura do receptor de 1,5 m, distância entre fonte e receptor de 1.500 m e solo misto e sem obstáculos.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Total
WindPRO, dB(A)	46,3	36,7	31,0	27,7	24,1	11,5	-	-	29,76
Algoritmo, dB(A)	46,3	36,7	31,0	27,6	24,1	11,4	-	-	29,74

Fonte: elaborado pelo autor.

A terceira simulação possui os mesmos parâmetros que a primeira, com diferença na distância, que agora é de 1.500 m. A Tabela 15 apresenta a comparação entre ambos os resultados (WindPRO e algoritmo). Os resultados são virtualmente idênticos, como esperado.

Por fim, a quarta simulação foi feita nos mesmos moldes da anterior, porém com solo misto ($G = 0,5$). A Tabela 16 mostra a comparação dos valores de NPS produzidos pelo WindPRO e o algoritmo. Assim como nas outras condições de simulação, o resultado dos NPS foi praticamente idêntico.

As simulações realizadas com o *software* WindPRO validam os resultados obtidos, pois esses resultados foram virtualmente idênticos em todas as simulações, salvo possíveis arredondamentos. Sendo assim, o *software* será utilizado para estudar o comportamento do NPS em si dos parques eólicos nos tópicos que se seguem.

4.3 Modelagem acústica de um parque eólico segundo o WindPRO

Como dito anteriormente, a vantagem do *software* WindPRO é a possibilidade de modelar um parque eólico com uma quantidade finita de aerogeradores e objetos sensíveis ao ruído (no caso de um parque eólico, comumente residências). Com essa modelagem, é possível demonstrar que, mesmo sendo relativamente simples, o método proposto pela norma ISO 9613-2 pode ser

usado para resolver problemas complexos, com uma grande quantidade de variáveis.

Para isso, buscou-se, junto a uma empresa do setor de geração de energia elétrica, dados reais que representassem as condições locais da implantação e pudessem ser simulados no *software*, com o intuito de avaliar os NPS nas residências próximas. Obtendo o valor do NPS mediante a simulação, é possível comparar os valores adquiridos com os limites máximos admitidos pela NBR 10151 (2017), verificando se há conformidade com a norma.

4.3.1 Parâmetros de entrada

Para o cálculo, a norma ISO 9613-2 necessita de uma série de parâmetros de entrada, como a posição dos aerogeradores, altura da fonte e do receptor, dentre outros. Esses dados foram fornecidos diretamente pela empresa e medidos em campo, nas instalações do parque, ou advêm de séries históricas captadas por torres anemométricas instaladas na região. Ainda assim, algumas simplificações foram feitas, e serão comentadas adiante.

Por sigilo de projeto, não é possível identificar o local de implantação do parque e nem o nome do empreendimento. Todavia, é possível ver o esboço da posição dos aerogeradores em relação às residências (em formato de círculo vazado), como mostra a Figura 38. Ao todo, há 29 residências para 241 aerogeradores projetados, com *hub height* de 80 m. Essa disposição espacial atende à demanda de uma distância mínima de 400 metros entre um aerogerador e qualquer residência, bem como entre os próprios aerogeradores, critério definido pela Resolução CONAMA nº 462/2014, no item 5.1.7 do Anexo I - Estudos de impactos ambientais de projetos eólicos.

Com as posições decididas, é possível iniciar a simulação. O modelo de cálculo utilizado, implementado no *software*, é a ISO 9613-2 General. O Quadro 15 apresenta os parâmetros utilizados para o início do cálculo.

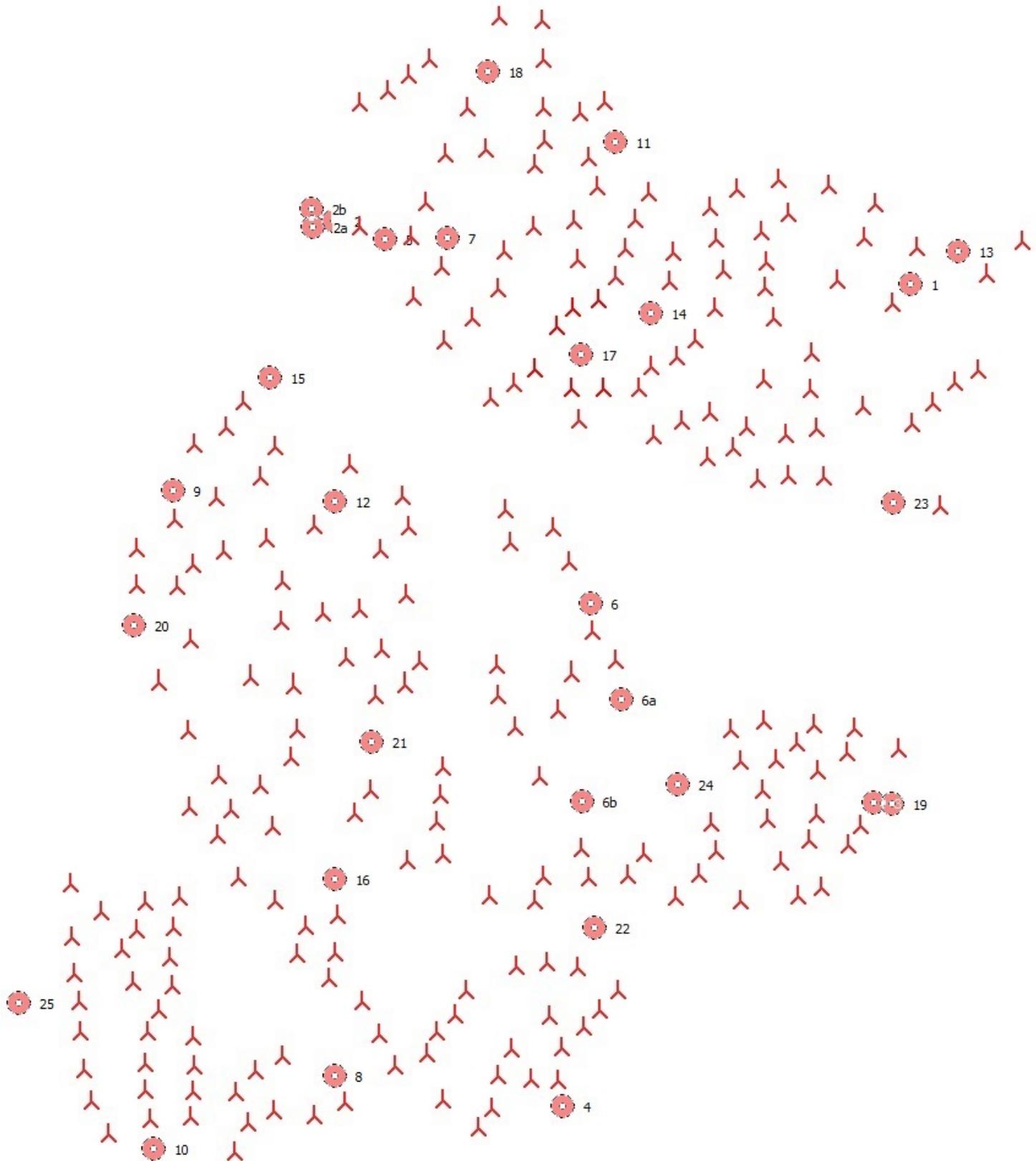
A velocidade do vento, como será discutida adiante, é um dos principais fatores que influenciam no NPS. Optou-se por utilizar um valor fixo, de 8 m/s, por ser o valor com o maior nível de potência acústica da fonte, logo, também será o valor que irá gerar o maior valor de nível de pressão sonora no receptor.

A atenuação do solo foi calculada pelo método alternativo descrito na ISO 9613-2. Esse é o método recomendado devido a utilização do perfil orográfico do solo. Esse perfil entra como dado de entrada do *software* como um *line object*, ou, “objeto de linha”, e apresenta a altitude real de alguns pontos, através de uma matriz. A obtenção desse elemento de linha é possível graças a um banco de dados *online* que pode ser acessado através do próprio *software*.

Para calcular a altitude, utiliza-se o *Triangular Irregular Network*, ou TIN, que é uma rotina de interpolação que irá calcular os pontos de elevação de cada aerogerador e residência com base em altitudes de referência.

A atenuação meteorológica é um fenômeno que acontece segundo as condições da equação 3.12. Para isso, a distância entre a fonte e o receptor, d_p , deve ser maior que 840 m (sendo 80 m da altura da fonte e 4 m da altura do receptor). Como será provado adiante no trabalho, considerar apenas aerogeradores até 1.000 m é uma aproximação suficiente para o cálculo do NPS. Tomando o pior caso (1.000 m), uma conta rápida nos daria um coeficiente meteorológico

Figura 38 – Esboço da posição dos aerogeradores no parque eólico em relação às residências.



Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

Quadro 15 – Parâmetros utilizados nas simulações de validação.

Modelo de cálculo de ruído	ISO 9613-2 General
Velocidade do vento	8,0 m/s
Distribuição por bandas de oitavas	No
Distribuição espectral	No
Coefficiente de absorção do solo	Alternative
Coefficiente meteorológico	0 dB(A)
Tipo de demanda no cálculo	1: WTG noise is compared to demand
Valores de ruído	All noise values are mean values (L_{wa})
Som tonal	Fixed penalty added to source noise of WTG
Penalidade por som tonal	5,0 dB(A)
Altura do receptor	4,0 m
Desvio de demandas oficiais	0 dB(A)

Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

C_{met} de (assumindo o máximo recomendado por norma para C_0 , igual a 2):

$$C_{met} = C_0 * \left[1 - 10 * \frac{h_s + h_r}{d_p} \right] = 2 * \left[1 - 10 * \frac{84}{1000} \right] = 0,32$$

Como o coeficiente meteorológico deve ser subtraído do NPS total final, um valor de 0,32 é pouco significativo. Por isso, optou-se por considerar o coeficiente meteorológico igual a zero para todas as simulações.

O modo de cálculo escolhido foi o de comparação entre o ruído previsto pela simulação com uma demanda (que será consultada na NBR 10151) e os valores serão apresentados como valores médios de nível de pressão sonora (L_{wa}).

Não se observou a presença de som tonal, logo, não há necessidade para a penalidade, que tem como valor padrão 5 dB(A).

A altura do receptor foi calculada em 4,0 m, como demonstrado anteriormente, de forma a minimizar a atenuação de leves mudanças no solo.

A norma não especifica nenhum desvio ou penalidade para nenhuma situação em específico, logo, mantém-se o valor de 0 dB(A).

Por fim, é preciso informar os valores dos coeficientes alfa para o cálculo da absorção atmosférica. Esses coeficientes podem ser retirados da norma ISO 9613-1 utilizando dados fornecidos de temperatura, pressão e umidade. No presente parque, utilizou-se 16,3°C para a temperatura, 72,8% para a umidade relativa e 94,6 kPA para a pressão atmosférica, sendo valores médios dos dados recebidos diretamente das torres anemométricas. Os valores utilizados estão no Quadro 16.

Quadro 16 – Valores dos coeficientes alfa utilizados na absorção atmosférica.

Frequência, Hz	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Absorção do ar, dB/km	0,1	0,4	1,2	2,5	4,4	9,0	26,7	94,6

Fonte: ISO 9613-1, 1993.

4.3.2 Níveis de pressão sonora no exterior das residências

O resultado do cálculo pode ser visto na Figura 39. As quatro últimas residências foram nomeadas de maneira diferente pois não se encontrou proprietário, ou seja, não há certeza se elas são realmente habitadas.

Além do resultado final do NPS, buscou-se, através da NBR 10151, os limites permitidos pela norma para o nível de pressão sonora nos receptores. Esses limites dependem do tipo de área habitada e do período do dia, podendo ser diurno ou noturno, sendo que o horário que engloba o período pode variar de município para município.

No parque eólico estudado, a área é predominantemente rural, como descrito no plano diretor da cidade. Com isso, optou-se por fazer as simulações e comparar com o limite do período diurno, RL_{Aeq} , de 40 dB(A), visto ser um valor mais condizente com a realidade, como será demonstrado na seção 4.6. Tendo esse valor base, é possível fazer a comparação do limite do NPS com os da simulação, de modo a verificar a viabilidade do parque. Essa verificação também está feita na Figura 39, em relação a linha vermelha que representa o limite de 40 dB(A).

Como pode ser visto, das 29 residências, apenas sete atenderam os pré-requisitos da norma NBR 10151, notadamente as residências 15, 23, 24, 25, 6b, 2a e 2b. Esse resultado demonstra que o projeto está em desacordo com as recomendações, exigindo uma mudança no mesmo ou a recomendação de tratamento acústico das residências, com barreiras ou outras formas de atenuar o ruído, dirimindo ao máximo o possível incômodo dos residentes.

Um outro ponto interessante a observar é a existência de árvores em muitas das casas da região, sendo a Figura 40 um exemplo. As mesmas são utilizadas como barreiras mecânicas naturais contra os ventos que sopram constantemente. Por isso, é comum que o NPS do ruído ambiente próximo às residências seja superior a 50 dB(A)¹, fazendo com que o incremento no ruído, promovido pelos aerogeradores, seja mínimo para o NPS final. Essa é uma situação única e possivelmente exigirá um estudo mais aprofundado e uma discussão com o órgão ambiental competente.

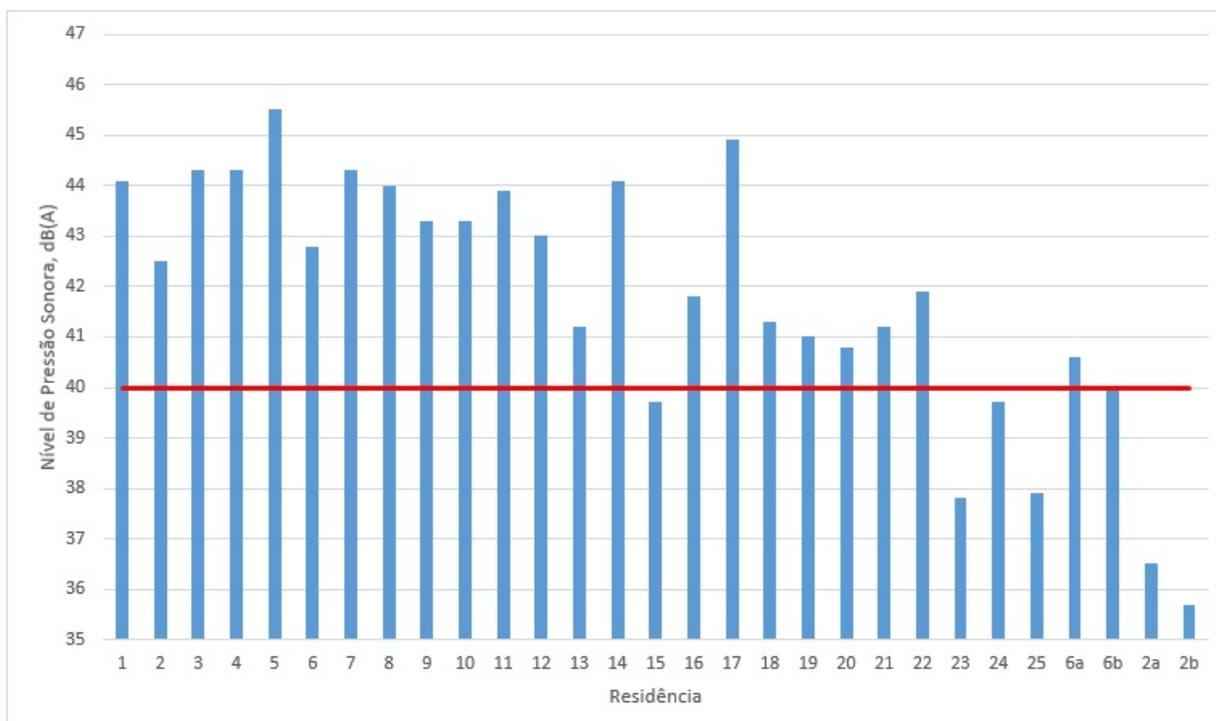
4.3.3 Mapa de ruído

O mapa de ruído, confeccionado pelo próprio *software*, se encontra na Figura 41.

Nesse mapa, a zona de interesse fica na zona amarela, que representa a faixa entre 35 a 40 dB(A). Como pode ser visto, a maior parte das residências se encontram dentro da zona laranja,

¹ Medidas preliminares foram realizadas nas residências, e muitas se apresentaram superiores a 50 dB(A).

Figura 39 – Valores dos níveis de pressão sonora no exterior das residências obtidos da simulação com WindPRO.



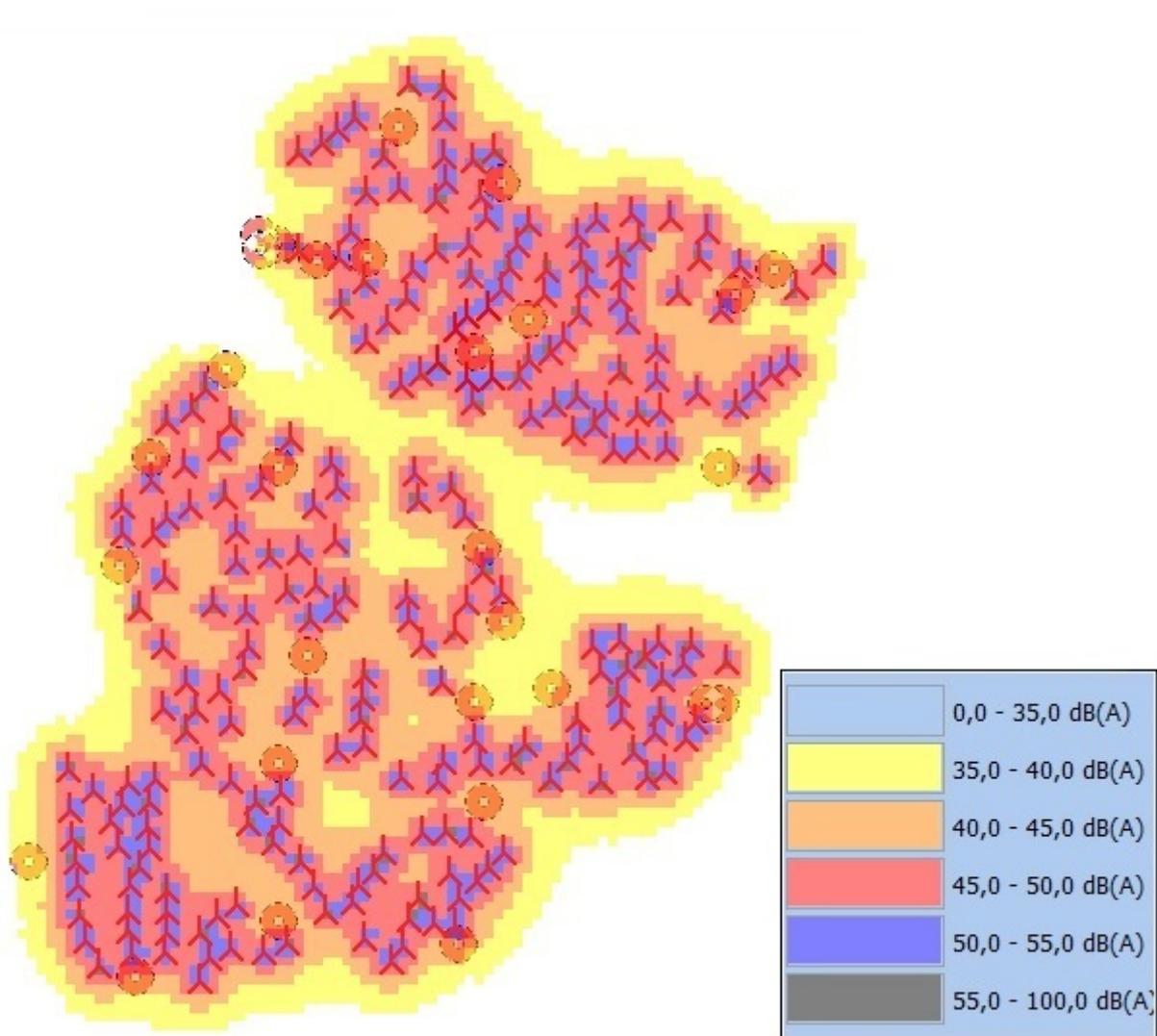
Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

Figura 40 – Casa típica da região, rodeada por árvores.



Fonte: Google Earth Pro.

Figura 41 – Mapa de ruído do parque eólico..



Fonte: WindPRO.

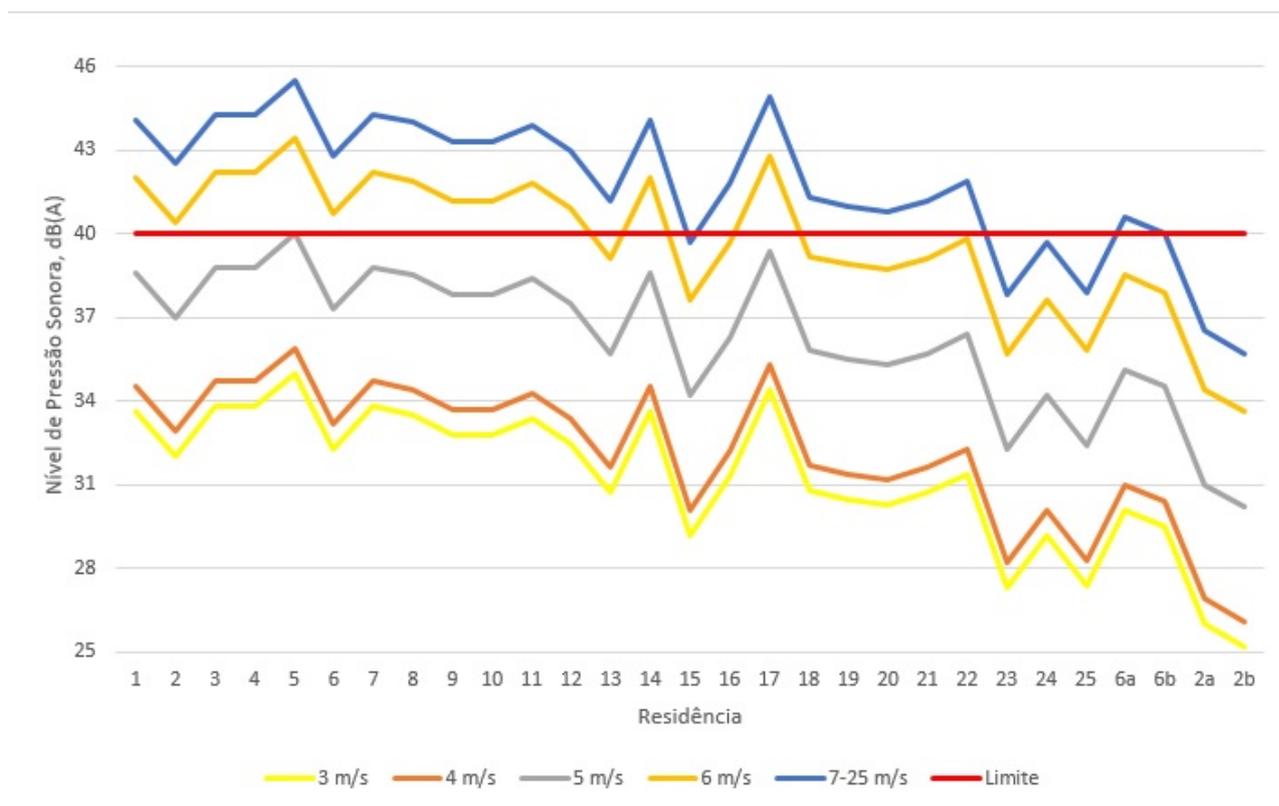
que corresponde a faixa entre 40 a 45 dB(A), sendo superior ao máximo exigido pela norma.

4.4 Influência da velocidade do vento no NPS total

Um dos parâmetros mais importantes para o ruído total do parque eólico é a velocidade do vento, que varia constantemente devido a uma série de fatores, tanto de forma horária quanto de forma sazonal. Tendo em vista que os aerogeradores que serão instalados no parque em estudo funcionam em uma faixa entre 3 m/s e 25 m/s, decidiu-se simular todas essas velocidades, para compreender a influência real da velocidade do vento no NPS do ruído desse aerogerador no parque.

Todavia, constatou-se que, a partir dos 8 m/s, não há mais mudança no NPS emitido pelas turbinas eólicas, conforme catálogo do fabricante (GAMESA, 2014). Isso acontece porque há um sistema de freamento aerodinâmico que impede que haja dano estrutural no motor das turbinas.

Figura 42 – Nível de pressão sonora, nas residências, para diferentes velocidades do vento.



Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

Fez-se, então, o corte em 8 m/s. O Quadro 17 apresenta os níveis de potência acústica (NWS) da fonte. O nível de pressão sonora nos residentes, para diferentes velocidades, considerando todos os AEs do parque, é mostrado na Figura 42.

Quadro 17 – Níveis de potência acústica (NWS) na fonte.

Velocidade do vento, m/s	3	4	5	6	7	8
NWS do AE, dB	94,0	94,6	98,3	101,7	104,3	104,5

Fonte: GAMESA, 2014.

Em relação ao gráfico da Figura 42, percebe-se que o incremento do ruído é constante em todas as faixas de velocidade de vento, para todas as residências. Esse incremento é apresentado na Tabela 17 e é diretamente relacionado ao incremento do nível de potência acústica da fonte, apresentado no Quadro 17. Em relação as faixas de 7 m/s e 8 m/s, como não houve diferença no ruído, elas foram representadas juntas, e representam o limite superior de ruído dos aerogeradores.

A partir do mesmo gráfico, pode-se analisar que algumas residências apresentaram um NPS alto, enquanto outras apresentam um NPS baixo. Isso pode ser entendido conforme a

Tabela 17 – Incremento do NPS por faixa de velocidade do vento, para todas as residências do parque eólico.

Faixa de velocidade, m/s	Varição do NPS na faixa de velocidade, dB(A)	Incremento, dB(A)
3 - 4	34,4 - 35,3	0,9
4 - 5	35,3 - 39,4	4,1
5 - 6	39,4 - 42,8	3,4
6 - 7	42,8 - 44,9	2,1
7 - 8	44,9 - 44,9	-

Fonte: elaborado pelo autor.

quantidade de aerogeradores próximos as habitações. A residência 5 é a que apresenta o maior NPS de todas as residências. A localização da casa, em azul, se encontra na Figura 43. A casa 5 está na zona de influência² de apenas três aerogeradores, sendo que a maior parte do ruído provém de apenas dois aerogeradores. Além disso, um terceiro aerogerador, mais distante, está posicionado em uma direção azimutal de 45°, que é justamente a direção onde o NPS será maior, como comentado na seção 3.1.4. A distância e a orientação azimutal de cada aerogerador para a casa se encontra no Quadro 18.

Quadro 18 – Distância e orientação azimutal dos aerogeradores para a residência 5.

Aerogerador	Distância, m	Orientação azimutal
1	894	46,4°
2	418	86,7°
3	465	294,8°

Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

É interessante observar que a segunda residência com o maior ruído é a residência 17, que é apresentada na Figura 44. Todavia, a residência 17 está na zona de influência de seis aerogeradores, o dobro da residência 5. Isso é um indício da importância da distância para o NPS que chega as residências e uma razão pela qual boa parte das agências internacionais traçaram distâncias mínimas como forma de controle do ruído, como comenta Filho & Azevedo (2013; Quadro 4). O Quadro 19 traz a distância e orientação azimutal de cada aerogerador, separado por cores, para melhor observação.

O ponto com o menor ruído, residência 2b, por outro lado, está relativamente afastada dos AEs, como pode ser visto na Figura 38.

Como já comentado anteriormente, o limite de 40 dB(A) acontece quando o vento alcança 5 m/s no aerogerador, de modo que o empreendimento pode respeitar a norma ou não, dependendo da velocidade do vento. Considerando que as regiões de instalação de fazendas eólicas são regiões

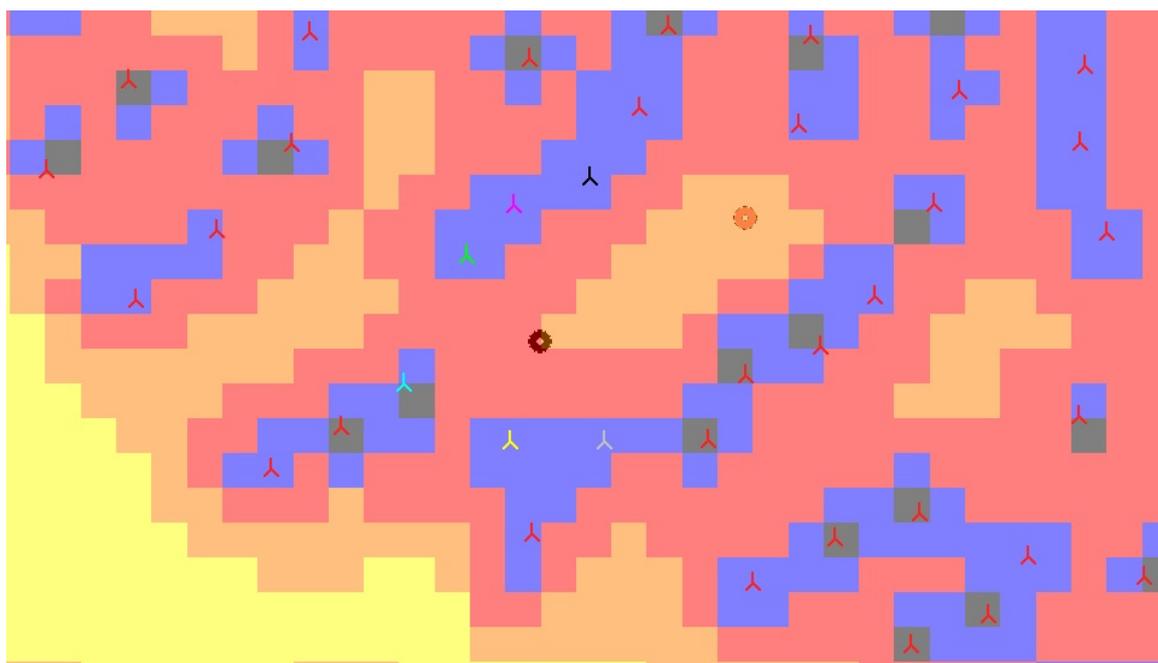
² Zona que compreende uma circunferência com 1 km de raio de cada aerogerador.

Figura 43 – Localização da residência 5 no parque eólico.



Fonte: WindPRO.

Figura 44 – Localização da residência 17 no parque eólico.



Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

Quadro 19 – Distância e orientação azimutal dos aerogeradores para a residência 17.

Aerogerador	Distância, m	Orientação azimutal
Preto	934	17,1°
Rosa	769	348,4°
Verde	619	318,6°
Azul	794	252°
Amarelo	587	196,3°
Cinza	666	147,9°

Elaborado pelo autor. Fonte: WindPRO.

com grande constância de ventos, pode-se esperar que normalmente esse limite será ultrapassado. Por fim, considerando a faixa de vento em que há funcionamento dos aerogeradores, pode-se esperar, para o caso específico do parque aqui estudado, uma variação de até 10,5 dB(A) no NPS que incide nas residências, conforme valores máximos e mínimos da Tabela 17.

Por fim, o gráfico da Figura 42 apresenta de forma bastante direta um problema complexo relacionado ao ruído dos aerogeradores. O problema surge com a dependência do ruído em relação à velocidade do vento. Assim como o aerogerador é mais ruidoso em velocidades de vento maiores, também o vento em si o é. Isso significa dizer que o ruído ambiente também aumenta com o aumento da velocidade do vento. Considerando que parques eólicos são comumente instalados em zonas rurais, que normalmente possuem poucas fontes de ruído, o vento é a principal fonte de ruído desses locais. Dependendo das condições climáticas, o próprio ruído ambiente pode ser superior aos limites impostos pela NBR 10151. Isso é um indício que a NBR 10151 pode não ser adequada para a averiguação do incômodo do ruído dos aerogeradores. Mais sobre essa discussão na seção 4.6.

4.5 Incremento do NPS pelo aumento do número de aerogeradores

Uma das complexidades relacionadas à previsão dos NPS mediante a simulação é a configuração particular de aerogeradores ao redor das residências. Enquanto algumas residências sofrem influência de apenas de um aerogerador, outras são influenciadas por até seis aerogeradores, com as mais variadas distâncias. Por isso, fez-se um estudo para entender melhor a influência de cada aerogerador para o NPS total, em diferentes distâncias.

Os resultados das simulações consideraram uma velocidade de vento de 8 m/s, método alternativo para o cálculo da absorção sonora do solo (apresentado em 3.1.2), altura da fonte de 80,0 m e do receptor de 4,0 m, bem como temperatura e umidade relativa constantes recomendados pela ISO 9613-2 (10° C e 70% de umidade relativa).

Como um dos critérios do projeto era uma distância mínima de 400 metros entre os aerogeradores e as casas (CONAMA nº462), fez-se simulações dessa configuração.

Primeiramente, simulou-se apenas uma casa e o aerogerador. Numa segunda simulação, acrescentou-se um aerogerador na direção leste da casa e o resultado é o esperado para o caso, já

Tabela 18 – Incremento do NPS total com o aumento do número de aerogeradores a 400 m.

Quantidade de aerogeradores	NPS total, dB(A)	Incremento, dB(A)
1	43,0	-
2	46,0	3
3	47,5	1,5
4	48,6	1,1

Fonte: elaborado pelo autor.

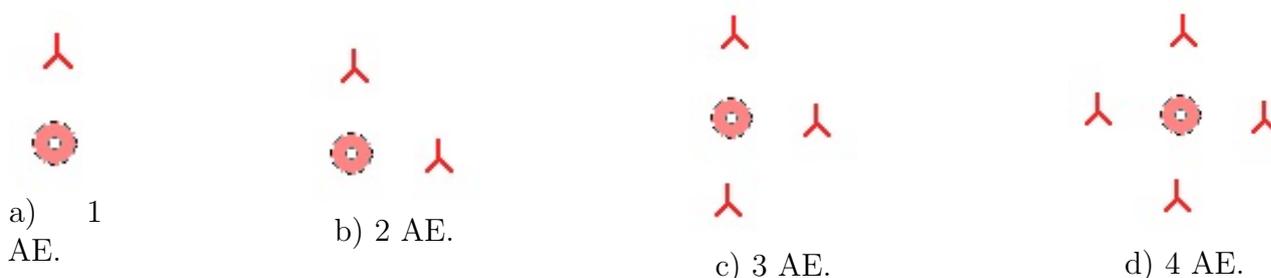
Tabela 19 – Incremento do NPS total com o aumento do número de aerogeradores a 700 m.

Quantidade de aerogeradores	NPS total, dB(A)	Incremento, dB(A)
1	35,4	-
2	38,4	3
3	40,4	2
4	41,8	1,4

Fonte: elaborado pelo autor.

que a soma de dois NPS da mesma intensidade é o acréscimo de 3 dB(A). A terceira simulação ocorreu com o acréscimo de um terceiro aerogerador na direção sul da residência. Por fim, se adicionou um aerogerador a oeste da casa, como mostra a Figura 45.

Figura 45 – Simulação de uma casa e aerogeradores (AE) a 400 m de distância.



Fonte: WindPRO.

A Tabela 18 apresenta os valores e o incremento para cada acréscimo de aerogerador.

Com o intuito de comparar, fez-se o mesmo processo para os aerogeradores a 700 m. Como o processo é idêntico, e tendo em visto diminuir a quantidade de informações repetidas, preferiu-se mostrar apenas a tabela final. A Tabela 19 apresenta o resultado para o incremento do NPS total. É possível perceber que o incremento do ruído foi maior que no caso anterior, todavia, apenas um aerogerador a 400 m é mais ruidoso que quatro aerogeradores a 700 m (incremento de 1,2 dB(A)).

Por fim, simulações foram feitas no caso de 1.000 m de distância, no mesmo molde dos

Tabela 20 – Incremento do NPS total com o aumento do número de aerogeradores a 1.000 m.

Quantidade de aerogeradores	NPS total, dB(A)	Incremento, dB(A)
1	30,8	-
2	33,8	3
3	35,8	2
4	37,3	1,5

Fonte: elaborado pelo autor.

anteriores. A Tabela 20 apresenta o resultado para o incremento do NPS total. Aqui é perceptível que o incremento é levemente superior que no caso anterior. Todavia, quatro aerogeradores a 1.000 m são tão ruidosos quanto dois aerogeradores a 700 m, porém muito menos ruidosos que um aerogerador a 400 m (precisamente 5,7 dB(A) de diferença).

Para complementar o estudo, misturou-se vários dos cenários anteriores, de modo a avaliar as diferentes configurações de aerogeradores. As situações estudadas são apresentadas abaixo. A Figura 46 apresenta todas as configurações utilizadas para o estudo.

Tendo por base as configurações com quatro aerogeradores a 400 m e quatro aerogeradores a 700 m, confeccionou-se duas tabelas, para comparação dos resultados. A primeira, Tabela 21, para fazer comparações com 400 m. Já a segunda, Tabela 22, foi confeccionada para fazer comparações em relação as turbinas a 700 m.

É possível notar, aqui, que o acréscimo de aerogeradores a 700 m ou a 1.000 m pouco influenciou no NPS total.

No caso de acrescentar dois aerogeradores a 700 m, o acréscimo no NPS total foi de 0,4 dB(A). Outros dois aerogeradores, para um total de quadro, dobram o incremento do NPS total para 0,8 dB(A).

Já no caso de acrescentar quatro aerogeradores a 1.000 m, o acréscimo é de apenas 0,3 dB(A).

O caso onde todos os aerogeradores estão funcionando, ou seja, os 12 aerogeradores, o acréscimo de ruído é de apenas 1,1 dB(A).

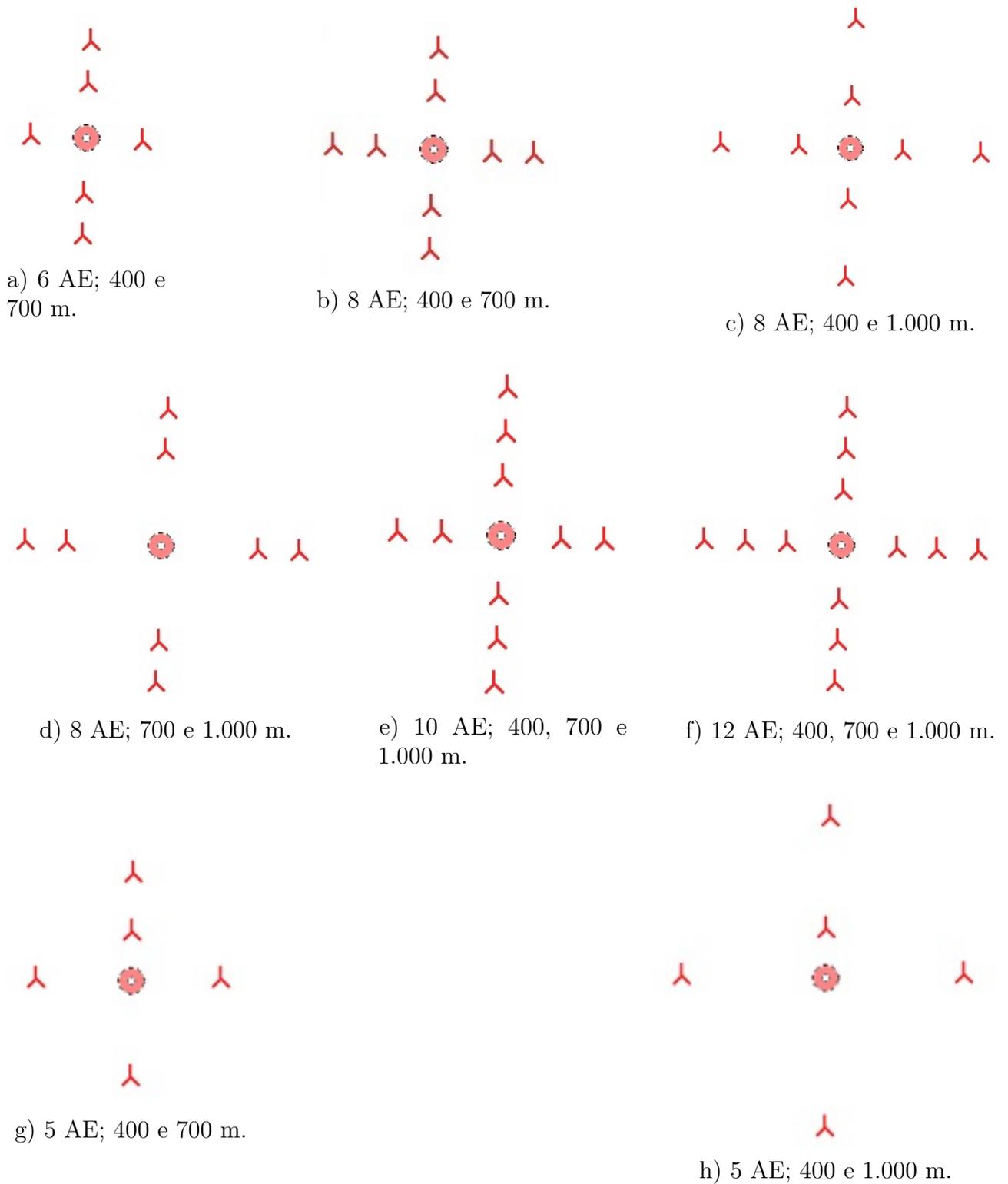
O maior incremento ocorreu quando há adição de quatro aerogeradores a 1.000 m na presença de quatro aerogeradores a 700 m. Contudo, esse acréscimo foi de apenas 1,3 dB(A) do NPS inicial para os aerogeradores a 700 m, o que ainda é um aumento em nível de pressão sonora pouco expressivo.

Por fim, é comparado o incremento, a partir de apenas um aerogerador a 400 metros, com a adição de quatro aerogeradores a 700 m (g; Figura 46) e quatro aerogeradores a 1.000 m (h; Figura 46). A Tabela 23 traz essa comparação.

Em relação a adição de quatro aerogeradores a 700 m, o incremento no ruído foi de 2,4 dB(A), que é um incremento considerável. Na adição de quatro aerogeradores a 1.000 m, o incremento foi de apenas 0,9 dB(A), o que não representa muito, em termos de NPS.

Pode-se concluir, então, que quando se trabalha com a influência dos aerogeradores no NPS

Figura 46 – Simulações realizadas para o estudo.



Fonte: WindPRO.

total de uma residência, trabalhar com aerogeradores até 1 km da residência é uma aproximação condizente, e implicará em um resultado bastante satisfatório a nível de engenharia.

Tabela 21 – Incremento do NPS com o aumento do número de aerogeradores, em relação a quatro aerogeradores a 400 m.

Quantidade de aerogeradores (AE)	NPS total, dB(A)	Incremento, dB(A)
4 AE; 400 m	48,6	-
6 AE; 400 e 700 m	49,0	0,4
8 AE; 400 e 700 m	49,4	0,8
8 AE; 400 e 1.000 m	48,9	0,3
10 AE; 400, 700 e 1.000 m	49,6	1,0
12 AE; 400, 700 e 1.000 m	49,7	1,1

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 22 – Incremento do NPS com o aumento do número de aerogeradores, em relação a quatro aerogeradores a 700 m.

Quantidade de aerogeradores (AE)	NPS total, dB(A)	Incremento, dB(A)
4 AE; 700 m	41,8	-
8 AE; 700 e 1.000 m	43,1	1,3

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 23 – Incremento do ruído com o aumento do número de aerogeradores, em relação a um aerogerador a 400 m.

Quantidade de aerogeradores (AE)	NPS total, dB(A)	Incremento, dB(A)
1 AE; 400 m	43,0	-
5 AE; 400 e 7000 m	45,4	2,4
5 AE; 400 e 1.000 m	43,9	0,9

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6 Medições

Na semana do dia 16 de abril de 2018, houve uma visita a campo para fazer medição de NPS do ruído dos aerogeradores em um dos parques eólicos já instalados, no Rio Grande do Sul. Essa viagem teve por objetivo, a partir das medições em campo, validar o modelo computacional desenvolvido, que também é utilizado pelo WindPRO. Para isso, utilizou-se uma estação de monitoramento de ruído, bem como uma estação meteorológica, como demonstrado na Figura 47.

Na direita da Figura 47, junto ao tripé cinza, observa-se a utilização de um cabo de microfone externo, colocado a 1,2 m, por motivos de segurança³. Esse dispositivo é montado numa unidade exterior, modelo DMK01, que tem como função proteger o microfone das intempéries. Além disso, utilizou-se uma espuma de proteção para dirimir o ruído proveniente do vento diretamente no microfone. Na caixa de armazenagem permaneceram o sonômetro, modelo FUSION, da 01 dB, e a bateria, também protegidos da chuva. Por fim, tomou-se o cuidado de deixar uma distância mínima de 2 m entre a estação meteorológica e o microfone, visto que aquela emitia um pulso de baixa frequência, que poderia ser captado pelo microfone. A Figura 48 apresenta os principais componentes.

A montagem da estação ocorreu no dia 17 de abril, pela manhã, iniciando a medição às 12:34:45. Os níveis de pressão sonora do ruído dos aerogeradores no parque foram medidos por um período de aproximadamente 22 horas. Como pode ser visto na Figura 47, o solo é plano e a vegetação é rasteira, influenciando pouco na reflexão sonora do ruído sobre o solo.

Havia, no local, a presença de gado bovino, bem como ovelhas, emas e insetos, como um grilo, que esteve presente durante toda a montagem do instrumento. Aves também sobrevoavam o local, e eram bastante ruidosas. Como animais representam sons intrusivos, esses devem ser eliminados, não contribuindo para o resultado final das medições.

A posição exata do ponto de medição é mostrada na Figura 49, e foi definida em virtude da direção do vento⁴ e da disponibilidade dos moradores. A distância do ponto para o aerogerador mais a norte era 431 m e para o aerogerador mais a noroeste era de 569 m. Os outros aerogeradores estavam a mais de 1.000 m de distância.

O desmonte do aparelho ocorreu no dia 18 de abril, às 10:40:58. Por recomendação da norma, os valores medidos dos níveis de pressão sonora foram tratados, através do dBTrait, *software* de pós-processamento de dados, de forma a obter um tempo de integração de 10 minutos ($L_{Aeq,10min}$).

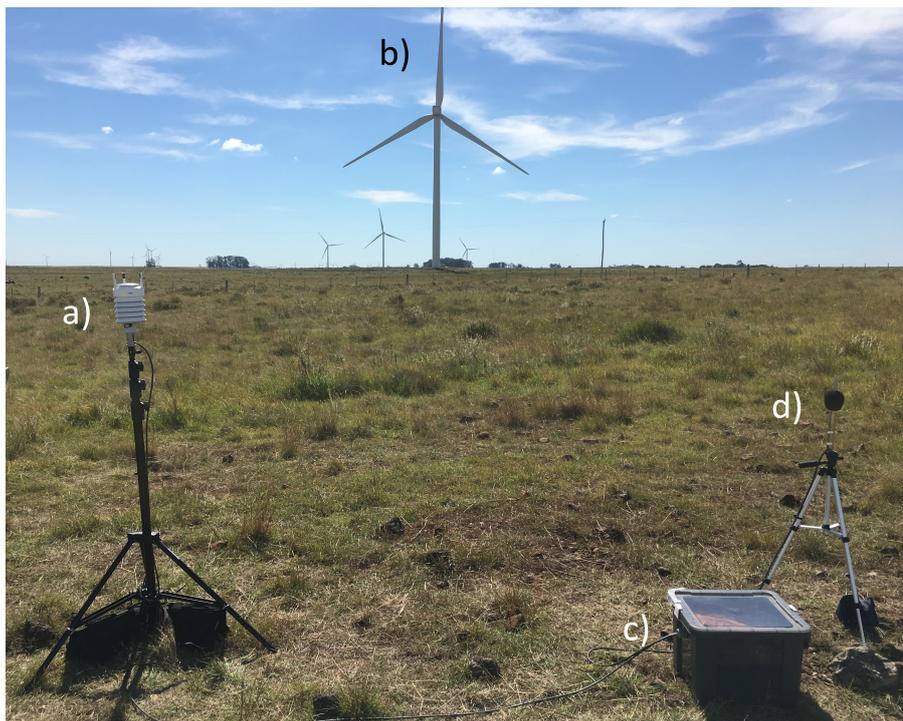
Como forma de verificar a precisão das simulações, fez-se a simulação computacional do mesmo ponto, com o programa WindPRO. A simulação utilizou os dados medidos do parque (16,3°C para a temperatura, 72,8% para a umidade relativa e 94,6 kPa para a pressão atmosférica, conforme 4.3.1), e um modelo preciso do solo, através do perfil orográfico do mesmo (vide 4.3.1). Optou-se, ainda, por simular para diferentes velocidades do vento, entre 3 m/s e 8 m/s.

Para fazer a comparação entre os resultados das medições em campo com os da simulação,

³ O tripé do microfone teve de ser substituído de última hora, e o tripé substituto não era tão seguro. Por isso, ocorreu o rebaixamento para 1,2 m.

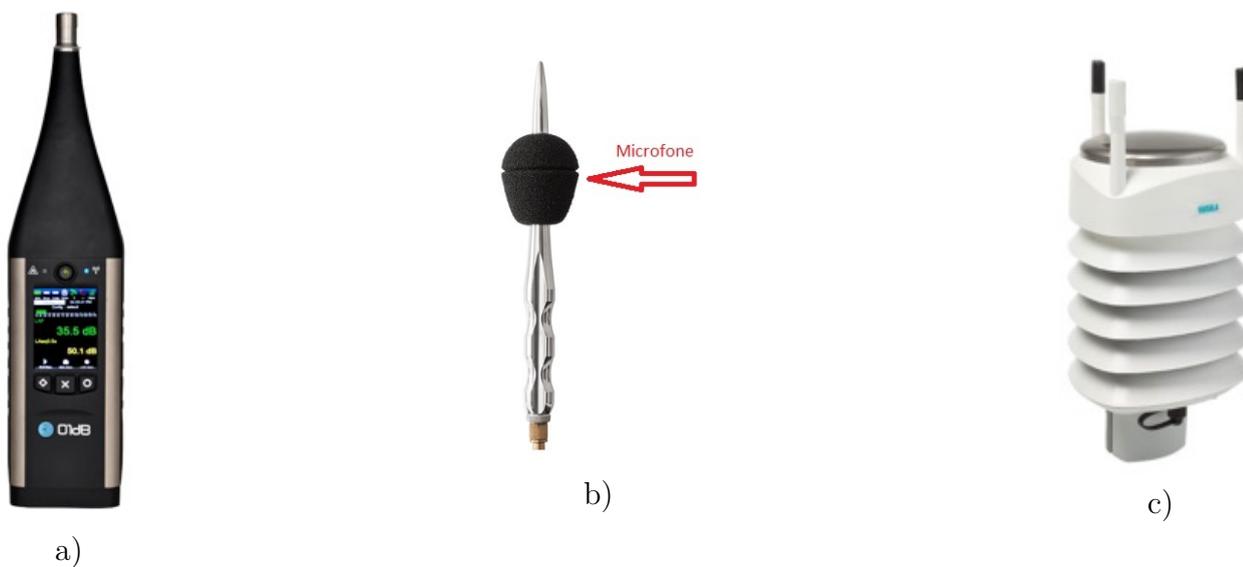
⁴ Nesse dia, a direção do vento era norte, ou seja, nascia no norte e soprava em direção ao sul.

Figura 47 – Estação de monitoramento de ruído e estação meteorológica. a) Estação meteorológica. b) Aerogerador. c) Caixa de armazenamento. d) Microfone.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 48 – Equipamentos de medição de ruído. a) Sonômetro. b) Unidade externa DMK01. O microfone fica dentro da carcaça de aço, aproximadamente na altura indicada. c) Estação meteorológica.



Fonte: 01 dB.

o tratamento dos dados obtidos com o sonômetro se deu da seguinte maneira: para comparar com o nível de pressão sonora referente a 3 m/s na simulação, fez-se uma média de todos os

Figura 49 – Posição do ponto de medição.



Elaborado pelo autor. Fonte: Google Earth.

Tabela 24 – Comparação entre os valores dos NPS da simulação e das medições.

Velocidade do vento, m/s	Previsão NPS ISO 9613-2, dB(A)	Média do $L_{Aeq,10min}$, dB(A)	Diferença, dB(A)
3 ± 0,5	34,80	31,93	+2,88
4 ± 0,5	35,30	35,27	+0,03
5 ± 0,5	40,40	42,70	-2,30
6 ± 0,5	44,60	41,00	+3,60
7 ± 0,5	45,00	39,40	+5,60
8 ± 0,5	45,00	41,15	+3,85

Fonte: elaborado pelo autor.

valores de $L_{Aeq,10min}$ que se encontravam na faixa de 2,5 m/s e 3,5 m/s. Para 4 m/s na simulação, a faixa foi de 3,5 m/s até 4,5 m/s, e assim por diante. É importante salientar que essa faixa de velocidade de vento foi retirada diretamente do anemômetro que se encontra no topo da torre mais próxima ao ponto de medição, a 80 metros de altura, visto que não foi encontrada correlação entre os valores medidos com a estação meteorológica, que apresentou velocidades de vento muito inferiores⁵. Os resultados são apresentados na Tabela 24.

Na Tabela 24 pode-se notar que, de modo geral, a aproximação da simulação é satisfatória. Um efeito agravante é a impossibilidade de se escolher a direção do vento na norma ISO 9613-2, que está sempre a 45°, conforme mencionado em 3.1.4, o que pode modificar os valores dos níveis

⁵ A maior parte dos valores estava na faixa entre 2 m/s e 4 m/s de vento, tendo pouca relação com as variações do ruído.

Figura 50 – Posição do ponto de medição durante o período 15 a 22 de maio de 2018.



Elaborado pelo autor. Fonte: Google Earth Pro.

de pressão sonora. Apesar disso, é possível notar que a simulação normalmente apresenta valores dentro de uma faixa aceitável de variação, apesar de todas as incertezas, o que demonstra a confiabilidade do método.

Dois pontos interessantes foram o NPS máximo acontecer na faixa de $5 \pm 0,5$ m/s e o NPS relativamente baixo na faixas de $7 \pm 0,5$ m/s. A razão para isso acontecer é desconhecida, cabendo estudos mais aprofundados ou um trabalho com amostragem maior. Uma possibilidade é a direção no vento, que, nesse estudo, variou entre 345° a 80° . Supondo que o vento que se enquadra na faixa de $5 \pm 0,5$ m/s tenha vindo majoritariamente na direção 0° , ele poderia ser mais ruidoso que um vento na faixa $7 \pm 0,5$ m/s vindo na direção 80° ⁶.

No mês de maio ocorreram novas medições. Ao contrário das medições anteriores, essas tinham por objetivo caracterizar a influência do vento no ruído total, de modo que ocorreram em um local sem a presença de aerogeradores. A montagem da estação de monitoramento de ruído seguiu os mesmos princípios da montagem anterior, em relação à altura dos sensores e ao afastamento entre eles. A medição iniciou às 17:20:06, do dia 15/05/2018 e finalizou às 14:14:26, do dia 22/05/2018, gerando uma quantidade muito superior de dados. A posição exata é mostrada na Figura 50.

Como pode ser observado na Figura 50, o local de instalação era bastante inóspito, havendo pouca influência de outras fontes. Ao contrário da medição anterior, não houve presença significativa de animais. Os resultados receberam tratamento estatístico, onde foi utilizado o tempo de integração de 10 minutos. Eles são apresentados na Tabela 25, para o dia, e Tabela 26, para a noite.

Dos resultados, é interessante observar que não há diferença significativa nos níveis de pressão sonora, tanto no período diurno, quanto no período noturno. Não há, também, diferença

⁶ Como, no momento da instalação, o vento era norte, os equipamentos foram instalados de modo que o vento norte produzisse o maior ruído possível.

Tabela 25 – Índices estatísticos das medições de ruído para o período diurno, entre 7:00 e 19:00.

Dia (7:00 - 19:00)						
	$L_{Ad,10min}^1$, dB(A)	$L_{90,10min}^2$, dB(A)	$L_{50,10min}^3$, dB(A)	$L_{10,10min}^4$, dB(A)	V_{vest}^5 , m/s	Desvio-padrão ⁶ , m/s
16/mai	39,2	37,3	37,5	41,4	3,8	1,2
17/mai	39,3	37,5	38,0	40,5	4,3	0,7
18/mai	40,0	37,6	38,9	42,2	4,9	0,7
19/mai	41,9	37,5	39,1	44,2	5,0	1,0
20/mai	38,3	37,6	37,7	38,9	3,3	0,8
21/mai	38,3	37,5	37,7	38,0	2,5	0,5

¹ $L_{Ad,10min}$ é o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A, obtido por integração no tempo de 10 min, no espectro global, para o período diurno;

² $L_{90,10min}$ é o nível excedido durante 90% do tempo, obtido por integração no tempo de 10 min. Em outras palavras, o nível de pressão sonora esteve acima desse valor durante 90% do tempo, pode ser considerado um ruído residual;

³ $L_{50,10min}$ é o nível excedido durante 50% do tempo, obtido por integração no tempo de 10 min. Em outras palavras, podendo ser considerado uma média dos níveis do ruído flutuante;

⁴ $L_{10,10min}$ é o nível excedido durante 10% do tempo, obtido por integração no tempo de 10 min. Em outras palavras, representa eventos não-usuais ou esporádicos;

⁵ V_{vest} é a velocidade do vento média, medida na estação meteorológica, para cada dia.

⁶Desvio-padrão médio da velocidade do vento, assumindo um valor a cada 10 minutos.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 26 – Índices estatísticos das medições de ruído para o período noturno, entre 19:00 e 7:00.

Noite (19:00 - 7:00)						
	$L_{An,10min}^1$, dB(A)	$L_{90,10min}$, dB(A)	$L_{50,10min}$, dB(A)	$L_{10,10min}$, dB(A)	V_{vest} , m/s	Desvio-padrão ⁶ , m/s
15/mai	41,3	37,6	39,1	44,3	5,1	0,9
16/mai	37,8	37,3	37,4	38,1	3,3	0,6
17/mai	43,0	38,0	40,7	46,2	5,8	0,9
18/mai	38,5	37,4	37,8	39,2	3,4	1,0
19/mai	38,3	37,5	37,8	39,0	3,8	0,4
20/mai	37,7	37,5	37,5	37,6	1,7	0,3
21/mai	37,7	37,5	37,6	37,7	1,7	0,3

¹ $L_{An,10min}$ é o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A, obtido por integração no tempo de 10 min, no espectro global, para o período noturno.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 27 – Valores de $L_{Ad,10min}$ e V_{vest} , em ordem crescente, para o período diurno.

$L_{Ad,10min}$	V_{vest}	Dia
38,3	2,5	21/mai
38,3	3,3	20/mai
39,2	3,8	16/mai
39,3	4,3	17/mai
40,0	4,9	18/mai
41,9	5,0	19/mai

Elaborado pelo autor. Fonte: dBTrait.

significativa em relação ao nível de pressão sonora por bandas centrais de frequência, em 1/3 de oitavas, como mostrado na Figura 51. Esses dados foram retirados diretamente do dBTrait, e então fez-se a média diurna e noturna dos valores. Apesar de pouco usual, a média se justifica pela presença de um espectro com baixíssima variação em todos os dias, tendo uma desvio-padrão médio total de 3,32. A maior diferença no espectro foi de 5,2 dB(A), nas bandas de 8 Hz, 31,5 Hz e 40 Hz. Por fim, não se pode determinar o que causou os picos que se apresentam na faixa de 10k Hz e 20k Hz, mas considerando a constância nos valores durante os setes dias de medições, especula-se que seja algum ruído dos próprios equipamentos, como o pulso da estação meteorológica, mencionado anteriormente.

Outro ponto bastante interessante, que corrobora com a hipótese que a NBR 10151, ao apresentar valores gerais de ruído, não é adequada para avaliar o incômodo do ruído gerado pelos aerogeradores, é o fato que o ruído ambiente noturno ser superior, em todos os dias, ao máximo permitido por norma, de 35 dB(A). O mesmo aconteceu em algumas ocasiões, em relação ao período diurno, onde o máximo é de 40 dB(A). Isso é esperado, visto que as áreas que recebem parques eólicos devem possuir, preferencialmente, uma taxa constante de vento durante todo o ano e uma baixa rugosidade superficial, ou seja, não deve haver barreiras, como florestas, que atenuam a velocidade do vento e geram turbulência, o que poderia ser prejudicial ao sistema mecânica dos aerogeradores, principalmente das pás (PINTO, 2012). No caso específico do parque em estudo, é importante ressaltar a presença de um solo bastante duro, quase rochoso, que pouco contribui para a atenuação do ruído.

Os maiores valores para os descritores de níveis sonoros ocorrem na noite de 17/maio, em que a velocidade do vento atingiu o máximo de 5,8 m/s. Em contrapartida, os valores mais baixos de ruído aconteceram na noite do dia 20/maio, em que a velocidade do vento foi de 1,7 m/s. De fato, organizando os valores de $L_{Ad,10min}$ e $L_{An,10min}$ em ordem crescente, é possível ver uma tendência para o aumento do NPS com o aumento da velocidade do vento, tanto no período diurno, quanto no período noturno, respectivamente, como mostram as Tabelas 27 e 28. A única exceção, em relação às noites de 18 e 19 de maio, é explicada quando analisado o desvio padrão do vento, que foi muito superior na noite de 18/mai.

Esses são outros indícios que a aplicação da norma NBR 10151 não é apropriada para empreendimentos que lidem com valores baixos de NPS. O próprio vento, por exemplo, já

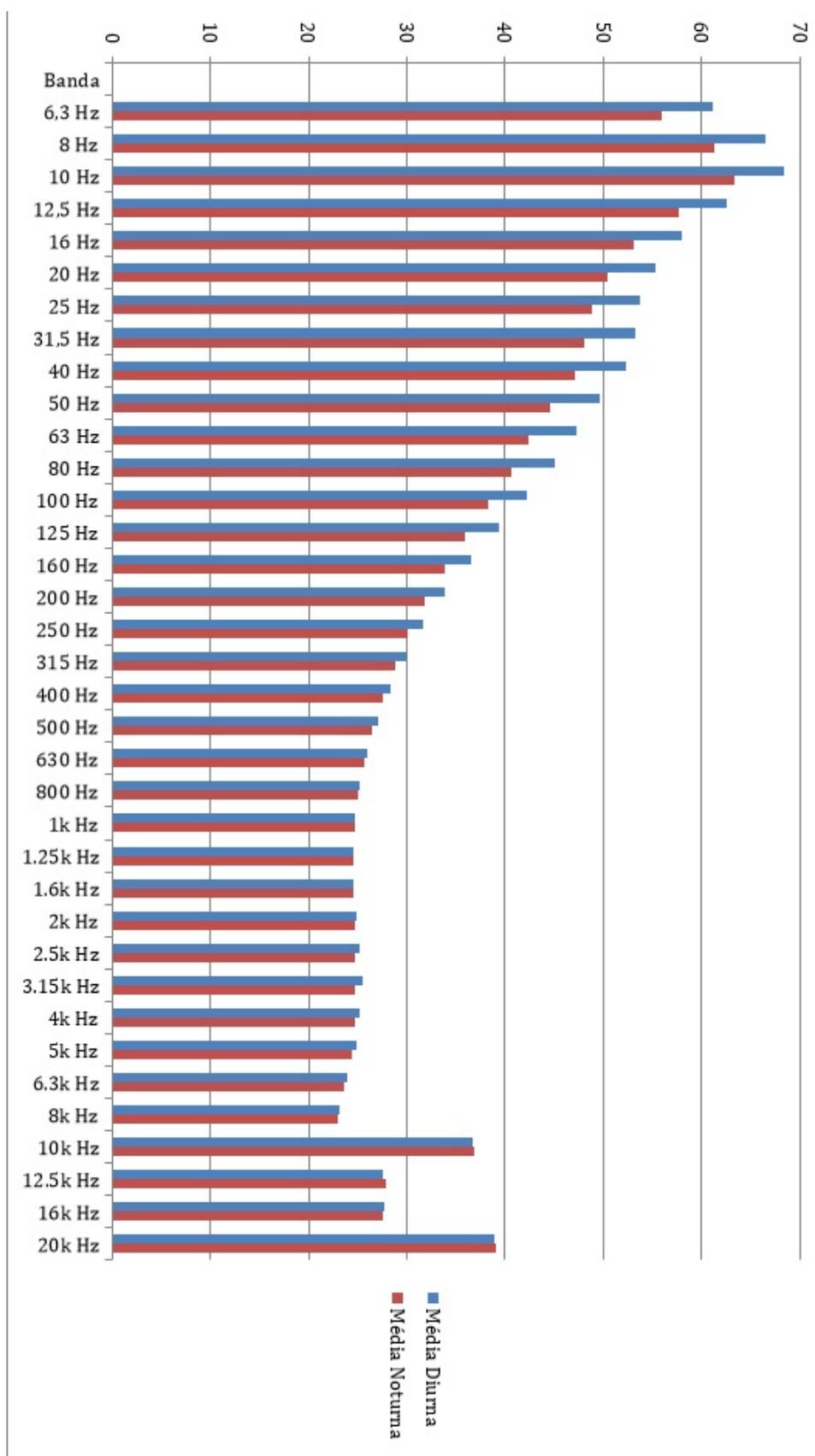
Tabela 28 – Valores de $L_{An,10min}$ e V_{vest} , em ordem crescente, para o período noturno.

$L_{An,10min}$	V_{vest}	Noite
37,7	1,7	20/mai
37,7	1,7	21/mai
37,8	3,3	16/mai
38,3	3,8	19/mai
38,5	3,4	18/mai
41,3	5,1	15/mai
43,0	5,8	17/mai

Elaborado pelo autor. Fonte: dBTrait.

ultrapassa os valores recomendados por norma. E isso considerando que o ponto medido era completamente isolado de fontes de ruído externas, como a presença de árvores ou animais, que são bastante comuns próximo as residências e certamente incrementam o nível de pressão sonora a qual estão submetidos os moradores dessas regiões. Como dito anteriormente, deve-se levar em conta a particularidade da implantação de parques eólicos, que normalmente acontecem justamente em regiões já bastante ruidosas, devido à configuração dos terrenos, que preferencialmente são livres de obstáculos. Por fim, levanta-se o questionamento do incômodo em si, visto que não é possível dizer, com plena certeza, que sempre que o ruído for superior a 40 dB(A), em ambiente rural, os residentes se sentirão incomodados.

Figura 51 – Média diurna e noturna dos níveis de pressão sonora por bandas centrais de frequência, em 1/3 de oitavas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Capítulo 5

Considerações Finais

O presente trabalho propôs a utilização do método preconizado pela normativa ISO 9613-2 para a modelagem e simulação do ruído de aerogeradores em parques eólicos. Para isso, primeiramente, implementou-se um algoritmo tendo por base as equações e considerações trazidas pela norma, que obteve sucesso na determinação do nível de pressão sonora (NPS). Após, estando o algoritmo validado, utilizou-se um *software* comercial para a análise de casos mais complexos, como a modelagem e avaliação do nível de pressão sonora de um parque eólico com dados reais quanto ao número e distribuição dos aerogeradores, velocidade do vento e tipo de solo.

Na comparação dos valores dos NPS por diferentes métodos de modelagem, observou-se que há certa variação dos NPS por bandas de frequências, sendo que tanto o modelo da teoria eletromagnética quanto o modelo do Harmonoise consideram a interferência que ocorre entre as ondas diretas e refletidas, ao contrário do modelo da ISO 9613-2, que não considera esse efeito. Contudo, o ruído final de todos os modelos mostrou-se próximo, havendo pouca variação. Comprovou-se, também, que uma altura do receptor de 4,0 m é mais adequada para a utilização da ISO 9613-2, diminuindo a sensibilidade do modelo pelo efeito do solo, bem como se verificou o efeito chamado de *ground effect dip*.

Na modelagem acústica do parque eólico, mesmo respeitando a distância mínima de 400 m das residências, percebe-se que o ruído produzido foi maior, na maioria das casas, que os valores admitidos pela normativa brasileira, notadamente a NBR 10151 (2017). Todavia, o ruído ambiental das casas muitas vezes é superior ao próprio limite imposto pela norma, mostrando que esse não é um método adequado para fazer esse tipo de avaliação. Além disso, é importante salientar que o incômodo gerado é necessariamente subjetivo, e varia de residente para residente.

Estudos foram feitos no sentido de compreender o efeito da velocidade do vento no ruído final. Observou-se que o ruído do aerogerador possui um “máximo”, não variando para velocidades de vento muito grandes. Todavia, a velocidade do vento influencia substancialmente o ruído final. Um aumento de 1 m/s na velocidade do vento, de 4 m/s para 5 m/s, foi responsável por um incremento no ruído de 4,1 dB(A). Dentro da faixa de operação do modelo apresentado de aerogerador, entre 3 m/s e 25 m/s, a variação máxima do ruído é de 10,5 dB(A). Em termos de pressão sonora, isso equivale a um aumento de mais de três vezes, o que evidencia a dinamicidade do ruído de aerogeradores.

Uma outra análise feita foi em relação a influência de mais de um aerogerador nas residências, para diferentes distâncias. O estudo mostrou que aerogeradores a uma distância maior que 1.000 m possuem influência desprezível no NPS total, podendo, portanto, serem desconsiderados.

Uma importante discussão foi aberta em relação à adequação da norma NBR10151 (2017) na avaliação dos NPS para ambientes externos às edificações em áreas habitadas, isto é, no entorno dos parques eólicos. Foram encontrados indícios, tanto a partir das simulações, quanto a partir das medições, que ela não é adequada. Estudos posteriores poderiam ser conduzidos, de modo a compreender de forma mais profunda esse problema, e indicar formas mais corretas de se fazer essa avaliação.

Por fim, considera-se que o tema aqui abordado, que vem sendo estudado por uma série de orientandos do Prof. Felipe Vergara, no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) e no Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon) da Universidade Federal de Santa Catarina, é de suma importância, visto que a energia eólica é uma das fontes com o menor impacto ambiental e que vem se expandindo de forma considerável na matriz energética brasileira.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Por ser uma demanda muito nova, a avaliação do impacto sonoro permite ao pesquisador uma série de possibilidades relacionadas ao caminho que pode ser seguido. Como o trabalho apresentou, um estudo mais aprofundado das normas de avaliação ambiental de ruído poderia ser feito, já que a NBR 10151 é muito genérica e, por vezes, pode ser insuficiente para uma análise do ruído adequada. Países como Reino Unido, Países Baixos, Austrália, EUA e Alemanha se utilizam da energia eólica há mais tempo e possivelmente possuem uma normativa mais madura para essa avaliação.

Um possível trabalho, que mantenha o foco na ISO 9613-2, pode expandir o algoritmo para englobar casos mais complexos, com um ou mais aerogeradores ou residências. Nesse caso, pode-se criar uma interface gráfica, facilitando a entrada de dados. É importante salientar, todavia, que a otimização de um programa desse porte pode ser um problema complexo, visto que as simulações com o *software* comercial para o parque eólico demoravam em torno de 15 minutos.

Além da ISO 9613-2, um outro modelo, talvez muito mais interessante, é o NORD2000. O NORD2000 foi criado para ser mais fiel aos parâmetros encontrados em campo, possuindo uma série de dados de entrada muito maior e mais detalhada, resultando em simulações mais precisas. Para tirar o máximo do modelo, porém, seria preciso um elevado conhecimento de programação, uma vez que é possível, como no exemplo do solo, entrar com dados no formato GIS.

Saindo das simulações *per se*, uma outra possibilidade de desdobramento é a medição dos níveis de pressão sonora nas localidades, por meio de sonômetros especializados, de forma sistemática e precisa, com o intuito de definir a acurácia dos métodos de simulação com os valores reais encontrados em campo. No caso da ISO 9613-2, que não simula nenhuma fonte externa que eventualmente possa existir, essas simulações deveriam ser em lugares protegidos

do ruído de outras fontes. Além disso, caso um estudo mais longo, que englobe uma quantidade maior de dados, seja feito, poderia haver a calibração dos resultados do método da norma com os dados das medições, aumentando ainda mais a confiabilidade das simulações.

Finalmente, um outro trabalho poderia ser feito em relação à acústica subjetiva, para medir o incômodo dos residentes em locais em que parques eólicas tenham sido implantados. Para essa pesquisa, seria necessário criar um procedimento de avaliação subjetiva, padronizado e com base em pesquisas reconhecidas internacionalmente. Esse estudo é importante pois, mesmo que o ruído de aerogeradores em parques eólicos esteja nos níveis limitados por norma, é possível que ainda haja incômodo.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL) - ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília: ANEEL, 2008. 3^a ed. 236 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL) - ANEEL. *BIG – Banco de informações de geração*. 2017. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidade-brasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 8 fev. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEólica. *Brasil chega a 13 GW de capacidade instalada em energia eólica*. 2018. Disponível em: <abeeolica.org.br/noticias/brasil/brasil-chega-a-13-gw-de-capacidade-instalada-de-energia-eolica/>. Acesso em: 21 fev. 2018.

AMARANTE, O. A. *et al.* *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2001. 44 p. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

ARAKAWA, C. *et al.* Numerical approach for noise reduction of wind turbine blade tip with Earth Simulator. *Journal of the Earth Simulator*, vol. 2, p. 11-33. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10151: Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitats - Aplicação de uso geral*. Rio de Janeiro, 30 p., 2017.

BAKKER, R. H. *et al.* Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of the Total Environment*, vol. 425, p. 42-51. 2012.

BARBOSA, V. *Geração de energia eólica cresce 25% no Brasil em 2017*. Exame, 2017. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/economia/geracao-de-energia-eolica-cresce-25-no-brasil-em-2017/>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

BOWDLER, D.; LEVENTHALL, G. *Wind turbine noise*. 1^a ed. Essex: Multi-Science Publishing Co. Ltd, 2011. 215 p.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 462, de 24 de julho de 2014. *Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre, e dá outras providências*. Publicado no D.O.U. de 25 de julho de 2014.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA - CCEE. *Produção eólica cresce*

55% em 2016. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_386160>. Acesso em: 2 fev. 2018

CHAPMAN, S.; CRICHTON, FIONA. *Wind turbine syndrome: a communicated disease*. 1ª ed. Sydney: Sydney University Press, 2017. 364 p.

CUSTÓDIO, R. S. *Energia eólica para a produção de energia elétrica*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2013. 319 p.

DALMAZ, A. *Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina*. 2007. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

DIJKSTRA, P. *Rotor noise and aero-acoustic optimization of wind turbine airfoils*. TU Delft, Netherlands, 2015.

DO, T. *et al.* Numerical study of the effects of trailing-edge bluntness on highly turbulent hydro-foil flows. *ANZIAM Journal*, vol. 47, p. 822-839. 2005.

DOOLAN, C. J.; MOREAU, D. J.; BROOKS, L. A. Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. *Acoustics Australia*, vol. 40, p. 7-13. 2012.

EL-SHARKAWI, M. A. *Wind energy: an introduction*. 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 345 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). *Balanço energético nacional 2017: Ano base 2016*. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 292 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em 28 jan. 2018.

EASTON, R. L. *Fourier methods in imaging*. 1ª ed. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2010. 954 p.

FILHO, W. P. B.; AZEVEDO, A. C. S. *Impactos ambientais em usinas eólicas*. AGRENER GD 2013, Itajubá/MG, 2013. 17 p. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2013/ag-267.pdf>>. Acesso em 26 jan. 2018.

GAYO, J. L. P. *Acustica Ambiental*. 1ª ed. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2006. 154 p.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. *Global wind statistics*. Brussels, 2018. 4 p. Disponível em: <http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2018.

GUENA, A. M. O. *Avaliação ambiental de diferentes formas de geração de energia elétrica*. 2007. 146 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GUSTAVSON, M. R. Limits to wind power utilization. *Science*, vol. 204, p. 13-17. 1979.

INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. *Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos*. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613-1. *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. Genève, 26 p., 1993.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613-2. *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation*. Genève, 24 p., 1996.

KAFRUNI, S. *A força dos ventos: energia eólica supera a de outras usinas no nordeste*. Correio Braziliense, 2017. Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2017/10/08/internas_economia,632184/energia-eolica-no-nordeste.shtml>. Acesso em: 13 jan. 2018.

KNOPPER, L. D. Wind turbines and human health. *Frontiers in Public Health*, vol. 2, p. 1-20. 2014.

MAIA, D. S. N. *Ruído de parques eólicos: análise e caracterização*. 2010. 106. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2010.

MARQUES, I. O. M. *Estudo de métodos de simulação do ruído de geradores eólicos*. 2016. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MOREAU, D. J.; BROOKS, L. A.; DOOLAN, C. J. Broadband trailing edge noise from a sharp-edged strut. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, p. 2820-9. 2011.

NELSON, V. *Wind energy: renewable energy and the environment*. 1^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 308 p.

NESLEN, A. *Wind power is cheapest energy, EU analysis finds*. The Guardian, 2018. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2014/oct/13/wind-power-is-cheapest-energy-unpublished-eu-analysis-finds>>. Acesso em: 8 fev. 2018.

NISSENBAUM, M. A.; ARAMINI, J. J.; HANNING, C. D. Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise Health*, vol. 14, p. 237-243. 2012.

OTTINGER, R. L. *Environmental costs of electricity*. 1ª ed. New York: Oceana Publications, 1991. 769 p.

PEDERSEN, E.; WAYE, K. P. Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 64, p. 480-486. 2007.

PINTO, M. *Fundamentos de energia eólica*. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 392 p.

REGEN SW. *Residential buffer zones for wind turbines: the evidence*. Exeter, 2012. 17 p. Disponível em: <http://regensw.s3.amazonaws.com/residential_buffer_zones_for_wind_turbines_c7cb0ed0aa138678.pdf>. Acesso em 28 jan. 2018.

ROGERS, A. L.; MANWELL, J. F. *Wind turbine noise issues*. University of Massachusetts, 2002. 19 p. Disponível em: <<https://docs.wind-watch.org/windturbinenoiseiss.pdf>>. Acesso em 26 jan. 2018.

ROMIO, P. C. *Modelo para garantia da disponibilidade de turbinas eólicas*. 2016. 263 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SHEPERD, D. G. *Historical development of the windmill*. Ithaca, 1990. 46 p. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.656.3199&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 3 fev. 2018.

SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY - GAMESA. *General characteristics manual - GCM: G114 IIIA 2.0MW 50/60 Hz wind turbine noise curve and noise emission level*. Zamudio, 2014. 7 p.

STAUT, F. *O processo de implantação de parques eólicos no nordeste brasileiro*. 2011. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

THE NOISE ASSOCIATION. *Location, location, location: an investigation into wind farms and noise by The Noise Association*. 2006. Disponível em: <<http://www.countryguardian.net/>>

Location.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2018.

TONIN, R. Sources of wind turbine noise and sound propagation. *Acoustics Australia*, vol. 40, p. 20-27, 2012.

VÉR, I.L.; BERANEK, L. L. *Noise and vibration control engineering*. 2^a ed. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2006. 501 p.

WAGNER, S.; BAREIB, R.; GUIDATI, G. *Wind turbine noise*. 1^a ed. Berlim: Springer-Verlag, 1996, 215 p.

ZHU, W. J. *Modelling of noise from wind turbines*. Technical University of Denmark, Copenhagen, 2004. 105 p. Disponível em: <[http://www.mek.dtu.dk/ /media/Institutter/Mekanik/Sektioner/FVM/uddannelse/eksamensprojekt/mastertheses%20fm/wei_jun_zhu_mek_fm_ep_2004_01.ashx](http://www.mek.dtu.dk/media/Institutter/Mekanik/Sektioner/FVM/uddannelse/eksamensprojekt/mastertheses%20fm/wei_jun_zhu_mek_fm_ep_2004_01.ashx)> Acesso em: 3 fev. 2018.

Apêndices

APÊNDICE A - Algoritmo implementado pelo autor.

Corpo do algoritmo:

```
clc
clear

%Altura da fonte
prompt = 'Insira a altura da fonte em metros: ';
hs = input(prompt);
%hs = 80;

%Altura do receptor
prompt = 'Insira a altura do receptor em metros: ';
hr = input(prompt);
%hr = 4;

%Distância do receptor até a fonte
prompt = 'Insira a distância da fonte até o receptor em metros: ';
d = input(prompt);
%d = 1500;

%Solo na fonte
prompt = 'Insira, em relação a ISO 9613, a porosidade do solo em
porcentagem (0 a 100%) na fonte: ';
Gs = input(prompt)/100;
%Gs = 0;

%Solo no receptor
prompt = 'Insira, em relação a ISO 9613, a porosidade do solo em
porcentagem (0 a 100%) no receptor: ';
Gr = input(prompt)/100;
%Gr = 0;

%Solo entre ambos
if d <= 30*(hs+hr)
    q=0;
    Gm=0;
else
    q=1-(30*(hs+hr)/d);
    prompt = 'Insira, em relação a ISO 9613, a porosidade do solo
em porcentagem (0 a 100%) entre ambos: ';
    Gm = input(prompt)/100;
end

%Há barreiras
prompt = 'Há algum obstáculo que se enquadre nas normas da ISO 9613?
(y,n): ';
resp = input(prompt,'s');
%resp = 'n';

%Há barreiras
if strcmp(resp,'y')
    %Difração por cima ou ao redor
    prompt = 'A difração ocorre por cima do objeto ou ao redor do
objeto?: (cima, redor) ';
    dif1 = input(prompt,'s');
    %C2
    prompt = 'As reflexões relativas ao terreno foram levadas em
conta separadamente por imagens?: (y,n) ';
    img = input(prompt,'s');
    %Difração simples ou dupla
```

```

prompt = 'A difração é simples ou dupla?: (s,d) ';
dif2 = input(prompt, 's');
%e
    if strcmp(dif2, 'd')
        prompt = 'Qual a distância entre as duas bordas de
difração? ';
        e = input(prompt);
    else
        e = 0;
    end
    %z
    prompt = 'Qual a distância da fonte até a primeira borda da
barreira em metros? ';
    dss = input(prompt);
    prompt = 'Qual a distância da segunda borda da barreira até a
fonte em metros? ';
    dsr = input(prompt);
    prompt = 'Qual a distância paralela até o borda da barreira
entre a fonte e o receptor? ';
    a = input(prompt);
%Não há barreiras
    else
        resp = 0;
        dif1 = 0;
        img = 0;
        dif2 = 0;
        dss = 0;
        dsr = 0;
        a = 0;
        e = 0;
        lambda = 0;
    end

%Cálculo das atenuações
d0=1;
Adiv = 20*log10(d/d0)+11
disp(Adiv)
for i=1:8
    switch i
        case 1
            Lft63 =
banda63 (hs,hr,d,q,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
        case 2
            Lft125 =
banda125 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
        case 3
            Lft250 =
banda250 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
        case 4
            Lft500 =
banda500 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
        case 5
            Lft1000 =
banda1000 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
        case 6
            Lft2000 =
banda2000 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
        case 7
            Lft4000 =
banda4000 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
        case 8

```

```

        Lft8000 =
banda8000 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e);
    end
end

```

```

    Lfttotal = aweigh(hs,hr,d,Lft63, Lft125, Lft250, Lft500,
Lft1000, Lft2000, Lft4000, Lft8000);

```

```

    Print1 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 63 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft63),' dB'];
    Print2 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 125 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft125),' dB'];
    Print3 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 250 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft250),' dB'];
    Print4 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 500 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft500),' dB'];
    Print5 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 1000 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft1000),' dB'];
    Print6 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 2000 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft2000),' dB'];
    Print7 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 4000 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft4000),' dB'];
    Print8 = ['O nível de ruído sonoro na banda de 8000 Hz no
receptor é de: ',num2str(Lft8000),' dB'];
    Print9 = ['O nível de ruído sonoro total no receptor é de:
',num2str(Lfttotal),' dB'];

```

```

    disp(Print1)
    disp(Print2)
    disp(Print3)
    disp(Print4)
    disp(Print5)
    disp(Print6)
    disp(Print7)
    disp(Print8)
    disp(Print9)

```

Banda de 63 Hz:

```

function Lft=banda63(hs,hr,d,q,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)
    %Nível de pressão sonora na fonte
    %prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no
aerogerador a 63 Hz: ';
    %Lw = input(prompt);
    Lw = 118;

    %Absorção atmosférica - Aatm
    %prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: ';
    %alfa = input(prompt);
    alfa = 0.1;
    Aatm = alfa*d/1000

    %Efeito do Solo - Agr
    As = -1.5;
    Ar = -1.5;
    Am = -3*q;
    Agr = As+Ar+Am

    %Screening - Abar
    lambda = 343/63;

```

```

Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d)

%Nível de Pressão Sonora
Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;

end

```

Banda de 125 Hz:

```

function Lft =
banda125 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)
clc
%Nível de pressão sonora na fonte
    %prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no
aerogerador a 125 Hz: ';
    %Lw = input(prompt);
    Lw = 113;

    %Absorção atmosférica - Aatm
    %prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: ';
    %alfa = input(prompt);
    alfa = 0.4;
    Aatm = alfa*d/1000;

    %Efeito do Solo - Agr
    %Solo na fonte
    a1 = 1.5+3*exp(-0.12*(hs-5)^2)*(1-exp(-d/50))+5.7*exp(-
0.09*hs^2)*(1-exp(-2.8*1e-6*d^2));
    As = -1.5+Gs*a1;
    %Solo no receptor
    a2 = 1.5+3*exp(-0.12*(hr-5)^2)*(1-exp(-d/50))+5.7*exp(-
0.09*hr^2)*(1-exp(-2.8*1e-6*d^2));
    Ar = -1.5+Gr*a2;
    %Solo entre ambos
    Am = -3*q*(1-Gm);
    Agr = As+Ar+Am;

    %Screening - Abar
    lambda = 343/125;
    Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d);

    %Nível de Pressão Sonora
    Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;

end

```

Banda de 250 Hz:

```

function Lft =
banda250 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)
clc
%Nível de pressão sonora na fonte
    %prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no
aerogerador a 250 Hz: ';
    %Lw = input(prompt);
    Lw = 109;

    %Absorção atmosférica - Aatm
    %prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: ';
    %alfa = input(prompt);

```

```

alfa = 1;
Aatm = alfa*d/1000;

%Efeito do Solo - Agr
%Solo na fonte
b1 = 1.5+8.6*exp(-0.09*hs^2)*(1-exp(-d/50));
As = -1.5+Gs*b1;
%Solo no receptor
b2 = 1.5+8.6*exp(-0.09*hr^2)*(1-exp(-d/50));
Ar = -1.5+Gr*b2;
%Solo entre ambos
Am = -3*q*(1-Gm);
Agr = As+Ar+Am;

%Screening - Abar
lambda = 343/250;
Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d);

%Nível de Pressão Sonora
Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;
end

```

Banda de 500 Hz:

```

function Lft =
banda500(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)
clc
%Nível de pressão sonora na fonte
prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no
aerogerador a 500 Hz: ';
Lw = input(prompt);
Lw = 106;

%Absorção atmosférica - Aatm
prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: ';
alfa = input(prompt);
alfa = 1.9;
Aatm = alfa*d/1000;

%Efeito do Solo - Agr
%Solo na fonte
c1 = 1.5+14*exp(-0.46*hs^2)*(1-exp(-d/50));
As = -1.5+Gs*c1;
%Solo no receptor
c2 = 1.5+14*exp(-0.46*hr^2)*(1-exp(-d/50));
Ar = -1.5+Gr*c2;
%Solo entre ambos
Am = -3*q*(1-Gm);
Agr = As+Ar+Am;

%Screening - Abar
lambda = 343/500;
Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d);

%Nível de Pressão Sonora
Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;
end

```

Banda de 1.000 Hz:

```
function Lft =  
banda1000 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)  
clc  
%Nível de pressão sonora na fonte  
    %prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no  
aerogerador a 1000 Hz: '  
    %Lw = input(prompt);  
    Lw = 103;  
  
%Absorção atmosférica - Aatm  
%prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: '  
%alfa = input(prompt);  
alfa = 3.7;  
Aatm = alfa*d/1000;  
  
%Efeito do Solo - Agr  
%Solo na fonte  
d1 = 1.5+5*exp(-0.9*hs^2)*(1-exp(-d/50));  
As = -1.5+Gs*d1;  
%Solo no receptor  
d2 = 1.5+5*exp(-0.9*hr^2)*(1-exp(-d/50));  
Ar = -1.5+Gr*d2;  
%Solo entre ambos  
Am = -3*q*(1-Gm);  
Agr = As+Ar+Am;  
  
%Screening - Abar  
lambda = 343/1000;  
Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d);  
  
%Nível de Pressão Sonora  
Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;  
end
```

Banda de 2.000 Hz:

```
function Lft =  
banda2000 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)  
clc  
%Nível de pressão sonora na fonte  
    %prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no  
aerogerador a 2000 Hz: '  
    %Lw = input(prompt);  
    Lw = 99;  
  
%Absorção atmosférica - Aatm  
%prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: '  
%alfa = input(prompt);  
alfa = 9.7;  
Aatm = alfa*d/1000;  
  
%Efeito do Solo - Agr  
%Solo na fonte  
As = -1.5*(1-Gs);  
%Solo no receptor  
Ar = -1.5*(1-Gr);  
%Solo entre ambos
```

```

Am = -3*q*(1-Gm);
Agr = As+Ar+Am;

%Screening - Abar
lambda = 343/2000;
Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d);

%Nível de Pressão Sonora
Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;
end

```

Banda de 4.000 Hz:

```

function Lft =
banda4000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)
clc
%Nível de pressão sonora na fonte
    %prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no
aerogerador a 4000 Hz: ';
    %Lw = input(prompt);
    Lw = 92;

%Absorção atmosférica - Aatm
    %prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: ';
    %alfa = input(prompt);
    alfa = 32.8;
    Aatm = alfa*d/1000;

%Efeito do Solo - Agr
%Solo na fonte
As = -1.5*(1-Gs);
%Solo no receptor
Ar = -1.5*(1-Gr);
%Solo entre ambos
Am = -3*q*(1-Gm);
Agr = As+Ar+Am;

%Screening - Abar
lambda = 343/4000;
Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d);

%Nível de Pressão Sonora
Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;
end

```

Banda de 8.000 Hz:

```

function Lft =
banda8000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)
clc
%Nível de pressão sonora na fonte
    %prompt = 'Insira o valor do nível de pressão sonora no
aerogerador a 8000 Hz: ';
    %Lw = input(prompt);
    Lw = 82;

%Absorção atmosférica - Aatm
    %prompt = 'Insira o valor de alfa retirado da ISO 9613: ';

```

```

%alfa = input(prompt);
alfa = 117;
Aatm = alfa*d/1000;

%Efeito do Solo - Agr
%Solo na fonte
As = -1.5*(1-Gs);
%Solo no receptor
Ar = -1.5*(1-Gr);
%Solo entre ambos
Am = -3*q*(1-Gm);
Agr = As+Ar+Am;

%Screening - Abar
lambda = 343/8000;
Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d);

%Nível de Pressão Sonora
Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar;
end

```

Screening:

```

function Abar = screening(resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e,lambda,d)
%Screening - Abar
Dz = 0;
%Há barreiras
if strcmp(resp,'y')
    if strcmp(dif1,'cima')
        Agr = 0;
    end
    %C2
    if strcmp(img,'y')
        C2 = 40;
    else
        C2 = 20;
    end
    %Difração simples ou dupla
    if strcmp(dif2,'s')
    %C3
        C3 = 1;
    %z
        z = sqrt((dss+dsr)^2+a^2)-d;
    %Kmed
        if strcmp(dif1,'cima')
            Kmed = exp((-
(1/2000)*sqrt(dss*dsr*d/(2*z)))));
            if Kmed <= 0
                Kmed = 1;
            end
        else
            Kmed = 1;
        end
    else
    %C3
        C3 = (1+(5*lambda/e))^2/((1/3)+(5*lambda/e)^2);
    %z
        z = (((dss+dsr+e)^2+a^2)^(1/2))-d;
    %Kmed
        if strcmp(dif1,'cima')

```

```

        Kmed = exp((-
(1/2000)*sqrt(dss*dsr*d/(2*z)));
        if Kmed <= 0
            Kmed = 1;
        end
    else
        Kmed = 1;
    end
end
end
end
    %z
    %Kmet
    Abar = 10*log(3+(C2/lambda)*C3*z*Kmed);
    if Abar <= 0
        Abar = 0;
    end
    %Não há barreiras
    else
        Abar = 0;
    end
end
end

```

Ponderação em A:

```

function Lat = aweigh(hs,hr,d,Lft63, Lft125, Lft250, Lft500, Lft1000,
Lft2000, Lft4000, Lft8000)

```

```

aw = [-26.2    -16.1    -8.6    -3.2    0    1.2    1    1.1];

```

```

for i=1:8
    switch i
        case 1
            Lat63 = 10.^(0.1*(Lft63+aw(i)));
        case 2
            Lat125 = 10.^(0.1*(Lft125+aw(i)));
        case 3
            Lat250 = 10.^(0.1*(Lft250+aw(i)));
        case 4
            Lat500 = 10.^(0.1*(Lft500+aw(i)));
        case 5
            Lat1000 = 10.^(0.1*(Lft1000+aw(i)));
        case 6
            Lat2000 = 10.^(0.1*(Lft2000+aw(i)));
        case 7
            Lat4000 = 10.^(0.1*(Lft4000+aw(i)));
        case 8
            Lat8000 = 10.^(0.1*(Lft8000+aw(i)));
    end
end
end

```

```

    aux = Lat63 + Lat125 + Lat250 + Lat500 + Lat1000 + Lat2000 +
Lat4000 + Lat8000;
    Lat = 10*log10(aux);

```

```

    %Coeficiente meteorológico
    prompt = 'Insira o coeficiente meteorológico: ';
    C0 = input(prompt);

```

```

    if d <= 10*(hs+hr)
        Cmet = 0;
    else

```

```
Cmet = C0*(1-10*(hs+hr)/d);  
end
```

```
Latmet = Lat - Cmet;
```

```
end
```