

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Carlos Henrique Gasparetti

**A aeroacústica envolvida na geração de eletricidade por
meio de turbinas eólicas: um levantamento de estudos
associados com a temática e a sua relação com normas e
comunidades locais**

São Carlos

2024

Carlos Henrique Gasparetti

A aeroacústica envolvida na geração de eletricidade por meio de turbinas eólicas: um levantamento de estudos associados com a temática e a sua relação com normas e comunidades locais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Aeronáutica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Aeronáutico.

Orientador: Prof. Dr. James Rojas Waterhouse

**São Carlos
2024**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).




249a Gasparetti, Carlos Henrique
 A aeroacústica envolvida na geração de
eletricidade por meio de turbinas eólicas: um
levantamento de estudos associados com a temática e sua
relação com normas e comunidades locais / Carlos
Henrique Gasparetti; orientador James Rojas
Waterhouse. São Carlos, 2024.

 Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2024.


 1. Energia eólica. 2. Aeroacústica. 3. Ruídos de
turbinas eólicas. 4. Acústica. 5. Normas acústicas. 6.
Níveis de pressão sonora. 7. Impacto sonoro. 8. Parques
eólicos. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO
Approval sheet

Candidato / Student: Carlos Henrique Gasparetti
Título do TCC / Title : A aeroacústica envolvida na geração de eletricidade por meio de turbinas eólicas: um levantamento de estudos associados com a temática e a sua relação com normas e comunidades locais
Data de defesa / Date: 12/12/2024

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / result
Professor Doutor James Rojas Waterhouse 	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Professor Doutor Hernan Dario Cerón Muñoz 	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Professor Doutor João Paulo Eguea 	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee:



Professor Doutor James Rojas Waterhouse
(assinatura / signature)

Este trabalho é dedicado a meus pais e amigos, de dentro e fora da Universidade, que tiveram papel integrante na minha formação e neste momento de vida desafiador, porém recompensador.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus pais, que sempre me incentivaram nos estudos e despertaram em mim a sede de aprendizado que carrego até hoje; aos amigos e colegas de diversos cursos, que estiveram ao meu lado ao longo de toda a minha jornada universitária e em uma nova cidade; e aos professores e funcionários da USP, cujo esforço e dedicação impactaram não apenas minha formação, mas também serviram de exemplo de profissionais que almejo seguir.

Dou graças à meu Deus que me acompanhou durante todos os momentos dessa jornada de graduando e sempre esteve comigo.

RESUMO

GASPARETTI, C. H. **A aeroacústica envolvida na geração de eletricidade por meio de turbinas eólicas: um levantamento de estudos associados com a temática e a sua relação com normas e comunidades locais.** 2024. 108 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Os impactos da produção de energia em complexos eólicos na saúde e no conforto das comunidades locais são temas de discussões atuais. No que tange à questão sonora, os ruídos associados ao setor estão, em grande parte, relacionados ao comportamento aerodinâmico das pás que compõem os rotores das turbinas, cujas operações se assemelham ao funcionamento de uma asa de aeronave. Sendo uma tecnologia recém-empregada em escalas globais de produção e instalação, a geração de energia renovável por meio dos ventos ainda carece de um histórico robusto dos fenômenos associados. Diante desse cenário, as últimas décadas têm sido marcadas pela publicação de estudos e pesquisas que visam uma compreensão mais aprofundada da aeroacústica envolvida, possibilitando que profissionais da indústria adquiram um conhecimento mais detalhado do tema. Como consequência desse avanço técnico-científico, espera-se que tanto o mercado quanto as regulamentações acompanhem esses desenvolvimentos. Em vista destes pontos, o presente trabalho busca fornecer uma base abrangente dos conhecimentos existentes sobre a questão acústica associada à operação de aerogeradores, conforme documentado nas principais literaturas. Além disso, é feita uma análise das principais normas técnicas aplicadas ao setor, com o objetivo de servir como guia para pesquisadores e profissionais da indústria.

Palavras-chave: Energia eólica. Aeroacústica. Ruídos de turbinas eólicas. Acústica. Normas acústicas. Níveis de pressão sonora. Impacto sonoro. Parques eólicos.

ABSTRACT

GASPARETTI, C. H. **The aeroacoustics involved in the generation of electricity through wind turbines: a survey of studies associated with the topic and its relationship with standards and local communities.** 2024. 108 p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

The impacts of energy production in wind farms on the health and comfort of local communities are topics of current discussion. Regarding the sound issue, the noises associated with the sector are, to a large extent, related to the aerodynamic behavior of the blades that make up the turbine rotors, whose operations are similar to the functioning of an aircraft wing. As a technology recently used on global production and installation scales, the generation of renewable energy through winds still lacks a robust history of associated phenomena. Given this scenario, the last few decades have been marked by the publication of studies and research aimed at a more in-depth understanding of the aeroacoustics involved, enabling industry professionals to acquire more detailed knowledge of the topic. As a consequence of this technical-scientific advance, it is expected that both the market and regulations will follow these developments. In view of these points, the present work seeks to provide a comprehensive basis of existing knowledge on the acoustic issue associated with the operation of wind turbines, as documented in the main literature. In addition, an analysis of the main technical standards applied to the sector is made, with the aim of serving as a guide for researchers and industry professionals.

Keywords: Wind energy. Aeroacoustics. Wind turbine noises. Acoustics. Acoustic standards. Sound pressure levels. Sound impact. Wind farms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética mundial em 2021 (IEA, 2023; total em 2021: 618 milhões de TJ - TeraJoule)	32
Figura 2 – Matriz energética nacional em 2023 (BEN, 2024; total em 2023: 314 milhões de tep - tonelada-equivalente de petróleo)	32
Figura 3 – Comparativo em recursos energéticos consumidos no Brasil e no mundo em 2021	33
Figura 4 – Matriz elétrica mundial em 2021 (IEA, 2023; total em 2021: 28,5 milhões de GWh - GigaWatt-hora)	34
Figura 5 – Matriz elétrica nacional em 2023 (BEN, 2024; total em 2023: 708 TWh - TeraWatt-hora)	34
Figura 6 – Comparativo em recursos utilizados para a produzir eletricidade no Brasil e no mundo em 2021	35
Figura 7 – Moinho de farinha do século XVII reconstruído pela Acciona no parque eólico Guerinda, Navarra, Espanha.	36
Figura 8 – Principais partes que integram uma central eólica	38
Figura 9 – Exemplos de configuração de aerogeradores do tipo HAWT e VAWT	39
Figura 10 – Tamanhos, alturas e diâmetros de rotores representativos de turbinas eólicas	40
Figura 11 – Turbinas do tipo Savonius, Darrieus e rotor-H	41
Figura 12 – Exemplo de aerogerador do tipo Darrieus-Savonius	41
Figura 13 – Configurações <i>upwind</i> e <i>downwind</i> de aerogeradores	42
Figura 14 – Turbina MOD-2 da Boeing	43
Figura 15 – Máquina de duas pás do WindFlow. Do folheto Windflow, www.windflow.co.nz	44
Figura 16 – Parque eólico da Califórnia (National Renewable Energy Laboratory)	45
Figura 17 – Variações sazonais da velocidade de vento em médias mensais (Hiester e Pennell, 1981)	46
Figura 18 – Variações típica da velocidade de vento em função do tempo para períodos de curta duração	47
Figura 19 – Esquemático de LiDAR com sistema de escaneamento cônico	48
Figura 20 – Exemplo de estudo de campo quanto à influência da esteira entre turbinas eólicas de um mesmo parque eólico	49
Figura 21 – Partes elétricas de um gerador eólico	50
Figura 22 – Controle de <i>pitch</i>	50
Figura 23 – Controle de guinada (<i>yaw</i>)	51
Figura 24 – Exemplos de aerofólios	54

Figura 25 – Principais parâmetros geométricos de um aerofólio	54
Figura 26 – Forças e momentos aplicados em uma seção de aerofólio, com α sendo o ângulo de ataque e c , a corda	55
Figura 27 – Efeitos de gradientes favoráveis (decrecentes) e adversos (crescentes) de pressão em uma camada limite (Miley, 1982)	57
Figura 28 – Decaimento da intensidade sonora para diferentes frequências em relação a distâncias inferiores à 1 km	62
Figura 29 – Exemplo de espectro de frequência do som de uma turbina eólica (Madsen and Pedersen, 2010)	65
Figura 30 – Escalas ponderadas de frequência, segundo Jacobsen <i>et al.</i> (2011) . . .	67
Figura 31 – Escalas ponderadas de frequência (IEC 61672:2003 - Escalas A e C; IEC 7196:1995 - Escala G)	67
Figura 32 – Limiares da audição humana (ISO 389:2004; Watanabe e Møller, 1990; Kurakata e Mizunami, 2008)	68
Figura 33 – Designações de sons total, específico e residual (ISO 1996-1:2003) . . .	70
Figura 34 – Comparação entre nível de pressão sonora e pressão sonora	72
Figura 35 – Níveis de potência sonora de turbinas eólicas em função de suas potências nominais (Møller and Pedersen, 2011; Møller et al., 2011)	81
Figura 36 – Quão barulhenta é uma turbina eólica? (GE Global Research; National Institute of Deafness and Other Communication Disorders - NIDCD part of NIH)	82
Figura 37 – Espectros sonoros previstos em várias distâncias de uma turbina eólica (Søndergaard, 2011; Multi-Science Publishing Company)	83
Figura 38 – Medições de nível de pressão sonora não ponderada de banda de um terço de oitava de cerca de 29 instalações eólicas no Japão (Tachibana et al., 2014 and INCE/USA)	85
Figura 39 – Ruídos de turbinas eólicas (Oerlemans; Sijtsma; López, 2007)	88
Figura 40 – Contribuição das fontes individuais de ruído de uma turbina eólica (Wagner; Bareiß; Guidati, 2012)	89
Figura 41 – Ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)	91
Figura 42 – Ruído de ponta das pás devido à formação de vórtice (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)	91
Figura 43 – Ruído de estol/separação (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)	92
Figura 44 – Ruído de desprendimento de vórtice em camada limite laminar (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)	93
Figura 45 – Ruído de desprendimento de vórtice devido ao bordo de fuga espesso (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)	93

Figura 46 – Métricas sonoras ponderadas pela escala A para uma turbina eólica durante um período de 10 segundos (Kaliski, 2014 and RSG, Inc.) . . . 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências centrais e limites de bandas em oitavas	64
Tabela 2 – Frequências centrais e limites de bandas em terças de oitavas	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Designações de agentes em um contexto típico de ruído	60
Quadro 2 – Designações de níveis sonoros	63
Quadro 3 – Principais designações de som	69
Quadro 4 – Principais designações de tempo	73
Quadro 5 – Equações referentes aos principais parâmetros de níveis de pressão sonora	74
Quadro 6 – Símbolos para níveis de pressão sonora	77
Quadro 7 – Limites de níveis de pressão sonora em função dos tipos de áreas habitadas e do período	78
Quadro 8 – Ruído de Perfil Aerodinâmico (Airfoil Self-Noise)	89
Quadro 9 – Ruído de Turbulência de Entrada (Inflow Turbulence Noise)	90
Quadro 10 – Modulação em Amplitude (MA)	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Modulação em Amplitude (<i>Amplitude Modulation</i>)
AWEA	Associação Americana de Energia Eólica (<i>American Wind Energy Association</i>)
CCA	Conselho de Academias Canadenses (<i>Council of Canadian Academies</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
HAWT	Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (<i>Horizontal Axis Wind Turbines</i>)
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável (<i>International Renewable Energy Agency</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
LiDAR	Detecção e Alcance de Luz (<i>Light Detection and Ranging</i>)
LFN	Ruído de Baixa Frequência (<i>Low Frequency Noise</i>)
NAM	Modulação em Amplitude Normal (<i>Normal Amplitude Modulation</i>)
NBR	Norma Brasileira
OAM	Outra Modulação em Amplitude (<i>Other Amplitude Modulation</i>)
SoDAR	Detecção e Alcance de Som (<i>Sound Detection and Ranging</i>)
spl	nível de pressão sonora (<i>sound pressure level</i>)
SPL/SWL	Nível de Potência Sonora (<i>Sound Power Level</i>)
TBL-TEN	Ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga (<i>Turbulent Boundary Layer - Trailing Edge Noise</i>)
VAWT	Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (<i>Vertical Axis Wind Turbines</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coefficiente de absorção sonora
μPa	microPascal (10^{-6} Pa)
C_d	Coefficiente de arrasto
C_l	Coefficiente de sustentação
dB	decibel
GW	GigaWatt
Hz	Hertz
kHz	kiloHertz
km	kilometro (quilômetro)
kW	kiloWatt
$L_{Aeq,T}$	Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em "A"
L_{Af}	Nível de pressão sonora ponderado em "A" e em "F"
L_{AFmax}	Nível máximo de pressão sonora ponderado em "A" e em "F"
L_{As}	Nível de pressão sonora ponderado em "A" e em "S"
L_{Asmax}	Nível máximo de pressão sonora ponderado em "A" e em "S"
L_{eq}	Nível de pressão sonora equivalente
$L_{eq,T}$	Nível de pressão sonora contínuo equivalente integrado em T
L_p	Nível de pressão sonora
L_{WA}	Nível de potência sonora
$L_{Zeq,T,f,Hz(1/1)}$	Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em "Z", em banda proporcional de frequência de oitava integrado em T
$L_{Zeq,T,f,Hz(1/3)}$	Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em "Z", em banda proporcional de frequência de 1/3 de oitava integrado em T
m	metro

m/s	metros por segundo
MW	MegaWatt
p	pressão sonora
Pa	Pascal
Re	Número de Reynolds
RL_{Aeq}	Limite de nível de pressão sonora
s	segundo
T	Tempo de integração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Panorama econômico do setor eólico	31
2.1.1	Crescimento global das energias renováveis	31
2.1.2	Comparativo entre os cenários nacional e internacional	31
2.1.2.1	Produção de energia	31
2.1.2.2	Geração elétrica	33
2.1.3	Perspectivas futuras	35
2.2	A evolução das turbinas eólicas	36
2.2.1	Contexto histórico	36
2.2.1.1	Breve resumo da história da energia eólica	36
2.2.1.2	Caracterização geral dos aerogeradores e de seus princípios de funcionamento	37
2.2.2	Configurações de aerogeradores	38
2.2.2.1	Configurações HAWT e VAWT	38
2.2.2.2	Demais categorizações	42
2.3	A influência da condição de vento em um projeto eólico	45
2.3.1	Métricas de caracterização das condições de vento	45
2.3.1.1	Importância das condições de vento no planejamento de parques eólicos	45
2.3.1.2	Análise das características do vento e efeitos relacionados	46
2.3.2	Mecanismos de controle e segurança em condições variáveis de vento	49
2.3.2.1	Controle de operação em condições normais de vento	49
2.3.2.2	Mecanismos de proteção em ventos extremos	51
2.4	A aerodinâmica de uma pá eólica	53
2.4.1	Introdução geral	53
2.4.2	Perfil aerodinâmico	53
2.4.2.1	Forças aerodinâmicas	53
2.4.2.2	Geometria do aerofólio	54
2.4.2.3	Comportamento aerodinâmico e ângulo de ataque	55
2.4.3	Parâmetros adimensionais	56
2.4.3.1	Número de Reynolds	56
2.4.3.2	Coeficientes de força e momento	56
2.4.4	Camada limite e separação de fluxo	56
2.4.4.1	Princípios da camada limite	56
2.4.4.2	Separação de fluxo e controle de estol	57
2.4.5	Efeitos tridimensionais e vórtices de ponta	58

2.5	Metodologia base adotada para estudos acústicos	59
2.5.1	Fundamentos da acústica	59
2.5.1.1	Caracterização geral	59
2.5.1.2	Conceitos e terminologia essencial em acústica	59
2.5.2	Fenômenos acústicos e seus agentes	59
2.5.3	Medição sonora	60
2.5.3.1	Conceitos de medidas sonoras	60
2.5.3.1.1	Intensidade e nível sonoro	60
2.5.3.1.2	Relação entre intensidade e frequência	61
2.5.3.1.3	Espectro de frequência	62
2.5.3.1.4	Escalas ponderadas	66
2.5.3.1.5	Tipos sonoros	69
2.5.3.2	Parâmetros de medição sonora	71
2.5.3.2.1	Níveis de pressão sonora (<i>spl - sound pressure level</i>)	71
2.5.3.2.2	Níveis de potência sonora (<i>SPL - Sound Power Level</i>)	74
2.5.4	Normas acústicas e limitações técnicas	76
2.5.4.1	Principais normas e contextualização	76
2.5.4.2	Normas para instrumentos de medição e calibração	76
2.5.4.3	Métodos de medição e controle acústico	77
2.5.4.4	Impacto social e sustentabilidade	79
2.6	Ruídos dos aerogeradores	80
2.6.1	Descrição do padrão acústico de geradores eólicos	80
2.6.1.1	Importância do ruído na indústria eólica	80
2.6.1.2	Tipos de ruído gerados por turbinas eólicas	80
2.6.1.3	Níveis sonoros de geradores eólicos e comparação com outras fontes de ruído	80
2.6.1.4	Distribuição sonora ao longo do espectro de frequências	83
2.6.1.5	Fatores que aumentam o impacto acústico	86
2.6.2	Classificação e caracterização das fontes de ruído em turbinas eólicas	87
2.6.2.1	Ruído mecânico e aerodinâmico: Fontes e Mecanismos	87
2.6.2.2	Principais fontes de ruído aerodinâmico em turbinas eólicas	88
2.6.3	Análise dos mecanismos de ruído aerodinâmico em turbinas eólicas	90
2.6.3.1	Análise dos ruídos de perfil aerodinâmico (<i>airfoil self-noise</i>)	90
2.6.3.1.1	Ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga (<i>TBL-TEN - Turbulent Boundary Layer - Trailing Edge Noise</i>)	90
2.6.3.1.2	Ruído de ponta (<i>tip noise</i>)	91
2.6.3.1.3	Ruído de estol/separação (<i>stall noise</i>)	92
2.6.3.1.4	Ruído de camada limite laminar (<i>laminar boundary layer noise</i>)	92
2.6.3.1.5	Ruído de bordo de fuga espesso (<i>blunt trailing edge noise</i>)	93
2.6.3.1.6	Ruído de fluxo sobre buracos, fendas e intrusões	94

2.6.3.2	Análise do ruído de turbulência de entrada (<i>turbulent inflow noise</i>)	94
2.6.3.3	Análise do ruído por modulação em amplitude (AM - <i>Amplitude Modulation</i>)	95
3	IMPACTO, PERCEPÇÃO E GESTÃO DO RUÍDO EM TURBINAS EÓLICAS	97
3.1	Desafios e inovações na gestão e medição do ruído em turbinas eólicas	97
3.1.1	Avanços no design das pás para redução de ruído	97
3.1.2	Desafios na modelagem e normatização do ruído em turbinas eólicas	97
3.1.2.1	Normas vigentes e limitações na avaliação do ruído	97
3.1.2.2	Aspectos críticos da caracterização técnica do ruído	98
3.1.2.3	Perspectivas para o aprimoramento de normas e modelagem do ruído	98
3.2	Impacto do ruído das turbinas eólicas nas comunidades e percepção social	99
3.2.1	Efeitos do ruído nas comunidades próximas a parques eólicos	99
3.2.2	Análises científicas sobre ruído e seus efeitos na saúde e bem-estar	99
3.2.2.1	Avaliação da relação causal entre ruído de turbinas e efeitos na saúde	99
3.2.2.2	Fatores externos ao incômodo acústico para comunidades próximas às turbinas	99
3.2.3	Integração de fatores contextuais e ambientais na experiência sonora	100
3.3	Estratégias integradas para mitigação do ruído de turbinas eólicas .	101
4	CONCLUSÃO	103
	REFERÊNCIAS	105

1 INTRODUÇÃO

O século XXI trouxe à tona debates urgentes sobre questões anteriormente negligenciadas, mas que hoje são essenciais para o desenvolvimento sustentável e a preservação do planeta. A transição para fontes de energia renováveis é um desses temas, sendo amplamente discutida em âmbitos internacionais e diplomáticos, com impacto direto na infraestrutura e na política energética de diversos países.

Entre as alternativas de geração de energia considerada limpa, a produção por meio de geradores eólicos destaca-se pelo menor impacto ambiental, especialmente em comparação a outras fontes renováveis. A tecnologia eólica evita a emissão de poluentes e a produção de resíduos físicos, fatores que reforçam sua natureza sustentável. No entanto, com o crescimento acelerado dessa indústria nas últimas décadas, têm-se intensificado as discussões sobre outros potenciais impactos na sociedade, sobretudo em comunidades locais próximas aos parques eólicos. Dentre essas questões, o ruído gerado pelas turbinas é um dos principais pontos de atenção.

Neste contexto, o presente estudo busca reunir e sintetizar, com base em diferentes fontes bibliográficas, as principais causas dos ruídos associados aos aerogeradores, explorando os fatores aeroacústicos e os fenômenos aerodinâmicos que contribuem para sua emissão sonora. Além disso, serão identificados e classificados os tipos de ruído específicos dessa indústria, relacionando-os aos fenômenos correspondentes e analisando as regulamentações aplicáveis à questão. Com ênfase em normas brasileiras e internacionais, pretende-se apontar possíveis inconsistências ou lacunas nas diretrizes, propondo uma visão crítica sobre a adequação dessas normas ao contexto atual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama econômico do setor eólico

2.1.1 Crescimento global das energias renováveis

De acordo com o relatório de Estatísticas de Capacidade Renovável de 2023, publicado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), as fontes de energia renovável, particularmente solar e eólica, mantêm um ritmo acelerado de expansão no cenário global. Em 2022, a capacidade global de geração renovável alcançou 3.372 GW, com um crescimento recorde de 295 GW em relação ao ano anterior, o que representa uma taxa de crescimento de 9,6 %. Aproximadamente 83 % da nova capacidade instalada foi proveniente de fontes renováveis, consolidando a relevância dessas tecnologias no contexto mundial de transição energética (IRENA, 2023).

Embora a hidrelétrica continue dominando a produção de energia renovável, o setor solar registrou um crescimento de 22 %, enquanto a capacidade instalada de energia eólica aumentou em 75 GW, representando um acréscimo de 9 % em relação ao ano anterior. Essas fontes foram destacadas como as duas alternativas de energia que mais cresceram, segundo os índices atuais. Ressalta-se, no entanto, conforme o relatório da IRENA alerta, observa-se uma tendência de desaceleração no crescimento da energia eólica nos últimos dois anos, indicando a necessidade de superar desafios significativos no médio prazo.

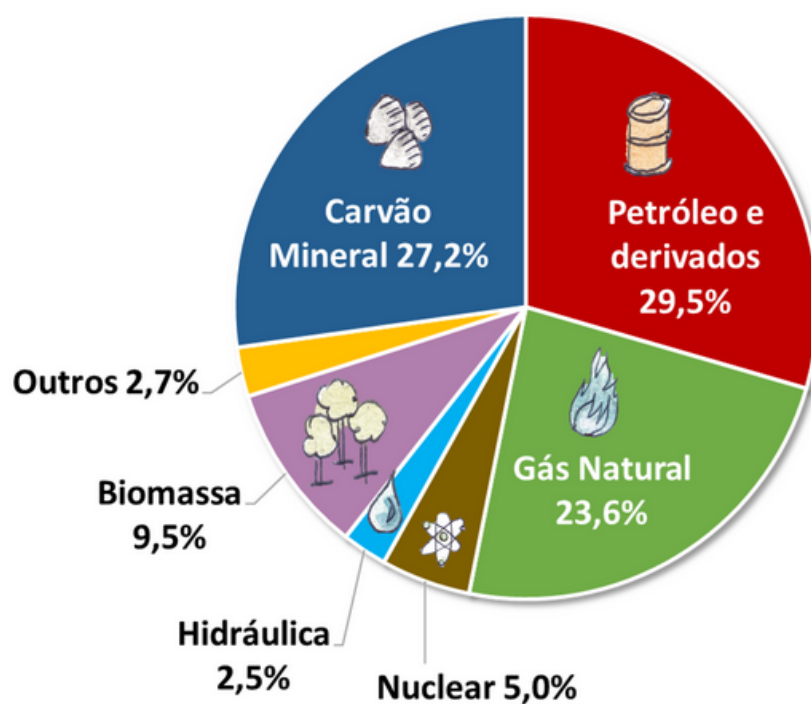
2.1.2 Comparativo entre os cenários nacional e internacional

2.1.2.1 Produção de energia

As regiões da Europa, Ásia e Estados Unidos lideram o crescimento das energias renováveis no cenário global. Embora em um ritmo mais moderado, a América do Sul também apresentou avanço, com um acréscimo de 18,2 GW em 2022 proveniente dessas fontes (IRENA, 2023). Para uma análise mais detalhada, é essencial avaliar a composição atual das matrizes de energia e eletricidade, a fim de realizar de projeções futuras.

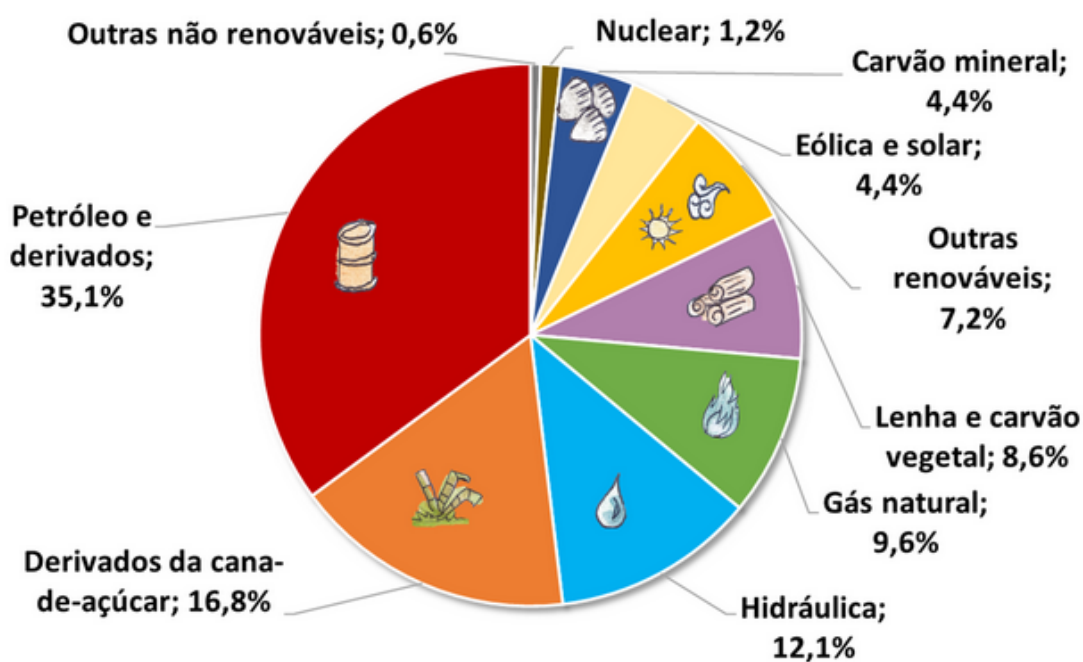
Para a análise do caso particular do Brasil, a Figura 1 ilustra a composição da matriz energética global em 2021, enquanto a Figura 2 apresenta a matriz energética brasileira em 2023. Como evidenciado, o país destaca-se por uma matriz energética consideravelmente mais diversificada e uma proporção de energias renováveis superior à média mundial (EPE, 2023).

Figura 1 – Matriz energética mundial em 2021 (IEA, 2023; total em 2021: 618 milhões de TJ - TeraJoule)



Fonte: EPE (2023)

Figura 2 – Matriz energética nacional em 2023 (BEN, 2024; total em 2023: 314 milhões de tep - tonelada-equivalente de petróleo)

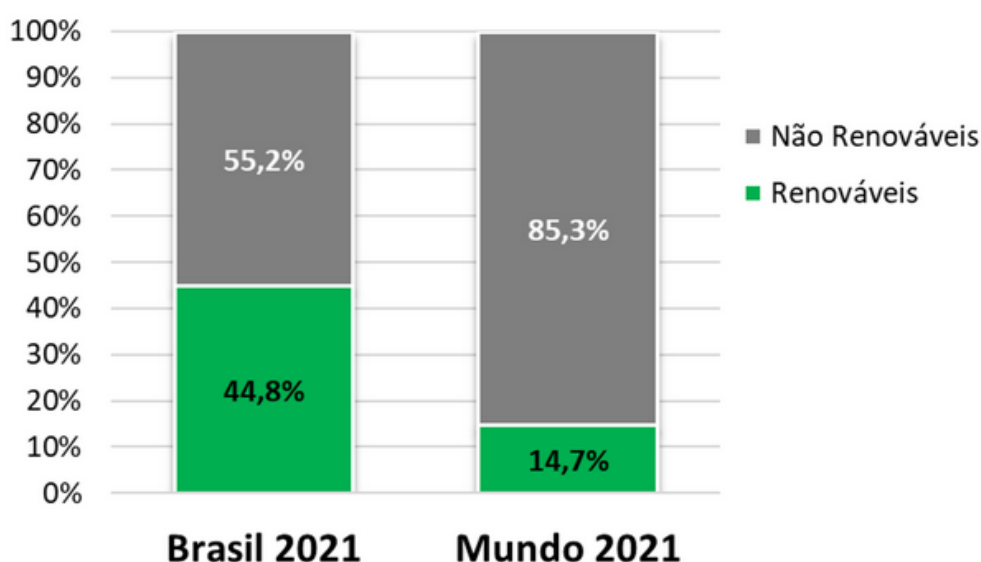


Fonte: EPE (2023)

A comparação entre as matrizes revela que, globalmente, fontes como solar, eólica e geotérmica (que compõe a faixa denominada por "Outros" na Figura 1), somadas à participação da energia hidráulica e da biomassa, representam menos de 15 % da matriz energética mundial, enquanto no Brasil esse percentual chega a quase metade de sua matriz.

Esse contraste pode ser novamente observado pela Figura 3, relativa ao consumo energético no ano de 2021, no qual as proporções de energias renováveis tendem às mesmas faixas frente ao valor de consumo total - inferior a 15 % da energia consumida mundialmente, enquanto no Brasil se aproxima de 45 % (EPE, 2023).

Figura 3 – Comparativo em recursos energéticos consumidos no Brasil e no mundo em 2021



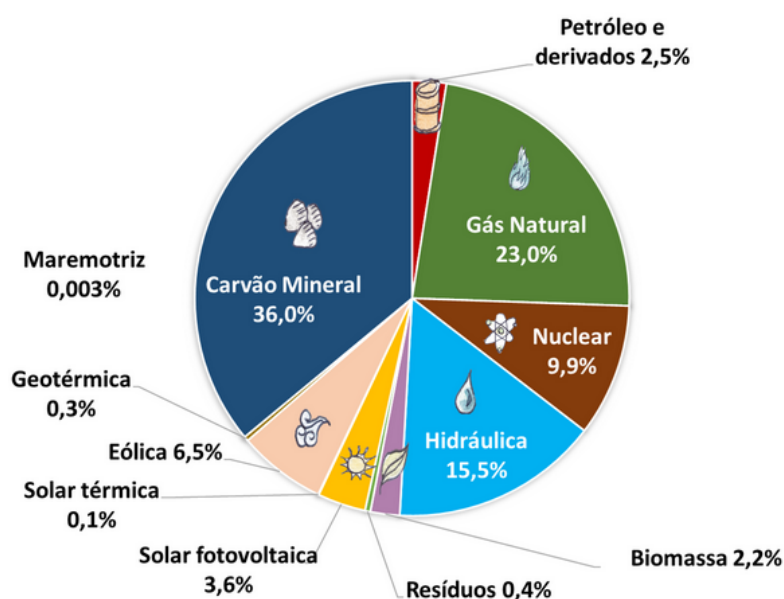
Fonte: EPE (2023)

Ainda assim, analisando exclusivamente as energias solar e eólica, é possível verificar sua participação reduzida em termos percentuais, representando 4,4 % da produção de energia em níveis nacionais e menos de 2,7 % em níveis globais.

2.1.2.2 Geração elétrica

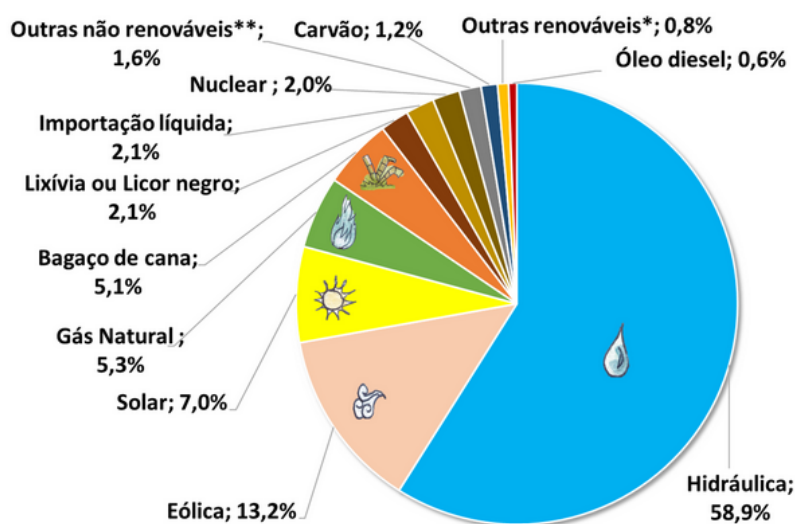
No que diz respeito exclusivamente à geração de eletricidade, as diferenças entre a matriz global e a brasileira tornam-se ainda mais marcantes. Como ilustrado na Figura 4, globalmente, as energias renováveis contribuem com menos de 40 % da matriz elétrica. No Brasil, essa parcela ultrapassa 85 %, impulsionada pelos recursos hídricos e pelo crescimento das indústrias solar e eólica (Figura 5).

Figura 4 – Matriz elétrica mundial em 2021 (IEA, 2023; total em 2021: 28,5 milhões de GWh - GigaWatt-hora)



Fonte: EPE (2023)

Figura 5 – Matriz elétrica nacional em 2023 (BEN, 2024; total em 2023: 708 TWh - TeraWatt-hora)



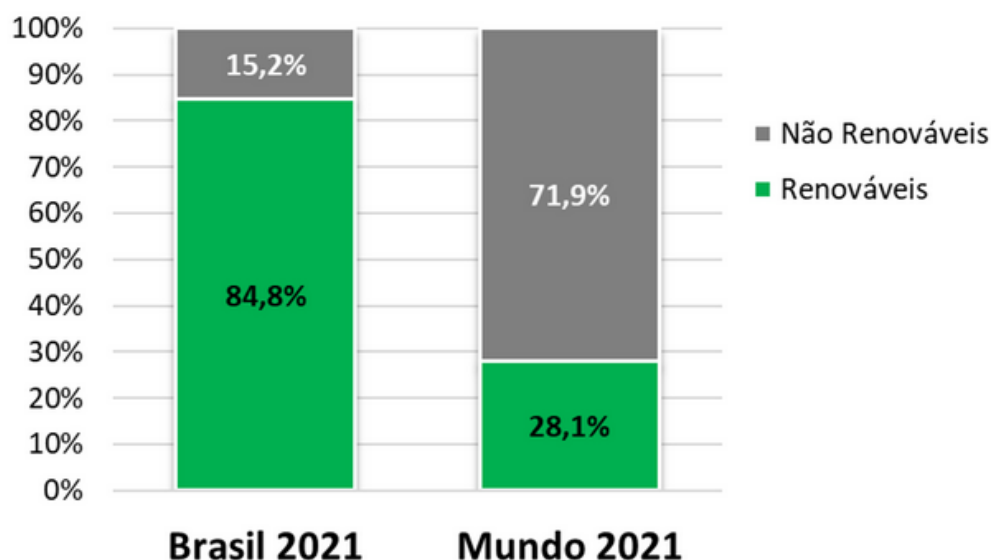
Fonte: EPE (2023)

Nota: *incluindo lenha, biodiesel e outras renováveis;

**incluindo óleo combustível, gás de coque, outras secundárias e outras não renováveis;
Lixívia ou Licor negro: fluido proveniente do processo de cozimento da madeira no processo de extração de celulose e que é utilizado como combustível em termelétricas

Essa tendência é novamente similar ao ilustrado pelo consumo elétrico de 2021, mostrado na Figura 6, porém com razões ainda menos expressivas para o caso global. Verifica-se que os recursos renováveis representam cerca de 28 % do consumo mundial, enquanto no Brasil essa parcela está em torno de 85 % (EPE, 2023).

Figura 6 – Comparativo em recursos utilizados para a produzir eletricidade no Brasil e no mundo em 2021



Fonte: EPE (2023)

Diante dos gráficos das matrizes de eletricidade, torna-se evidente a maior participação da energia eólica em âmbito nacional, com uma composição percentual aproximadamente duas vezes superior à média global (13 % contra 6,5 %). Dessa forma, apesar de não registrar as maiores taxas de crescimento, o setor eólico nacional destaca-se como uma parte essencial na transição energética.

2.1.3 Perspectivas futuras

Francesco La Camera, Diretor-Geral da IRENA, destaca que o crescimento contínuo e anual das energias renováveis tem sido sustentado por fortes argumentos comerciais e políticas de incentivo. Contudo, ele alerta que, para limitar o aquecimento global a 1,5°C, será necessário triplicar a taxa de expansão anual de renováveis até 2030 (IRENA, 2023). O cenário exige urgência na aceleração da transição energética, com prioridade para uma matriz mais limpa e sustentável, contexto que qualifica a expansão do setor eólico.

Embora o Brasil se encontre em uma posição vantajosa, com uma matriz energética diversificada e rica em recursos renováveis, alcançar os objetivos globais de mitigação climática exigirá políticas de incentivo mais robustas, investimentos em tecnologias inovadoras e a intensificação da cooperação internacional para facilitar trocas de conhecimentos.

2.2 A evolução das turbinas eólicas

2.2.1 Contexto histórico

2.2.1.1 Breve resumo da história da energia eólica

O aproveitamento da energia dos ventos remonta há séculos, com tecnologias como moinhos de vento e barcos à vela que utilizam a força do vento para realizar tarefas práticas, como moer grãos, bombear água e adquirir propulsão (Eriksson; Bernhoff; Leijon, 2008). Contudo, a geração de eletricidade a partir do vento começou apenas no final do século XIX, com o desenvolvimento das primeiras turbinas eólicas. Desde então, as turbinas evoluíram significativamente, passando de estruturas simples a sistemas altamente sofisticados, conhecidas hoje como aerogeradores modernos. Esse avanço permitiu o uso em larga escala para geração de eletricidade, suprimindo as crescentes demandas energéticas.

A Figura 7 ilustra a reconstrução de um moinho de farinha em um parque eólico moderno, representando a evolução desde os moinhos tradicionais até as turbinas contemporâneas.

Figura 7 – Moinho de farinha do século XVII reconstruído pela Acciona no parque eólico Guerinda, Navarra, Espanha.



Fonte: Stavrakakis e Sayigh (2012)

Diferentes filosofias de design surgiram com a evolução do aerogerador, cada uma com suas características específicas. A compreensão do contexto histórico no qual tais diferenças se desenvolveram ajuda a entender melhor as suas particularidades.

2.2.1.2 Caracterização geral dos aerogeradores e de seus princípios de funcionamento

Geradores eólicos são equipamentos capazes de converter a energia cinética do vento em eletricidade. Esses maquinários possuem sistemas mecânicos projetados para maximizar a eficiência na conversão dessa energia. O processo inicia-se com a movimentação de partes móveis expostas ao vento, que rotacionam o eixo principal. O acoplamento deste eixo a mecanismos adicionais permite que o movimento seja acelerado e transferido ao gerador, que converte a energia mecânica em elétrica (Stavrakakis; Sayigh, 2012; Energy, 2023a).

Os primeiros projetos de turbinas eólicas obtinham sua força-motriz a partir da desaceleração do vento local. Essa abordagem, semelhante à utilizada pelos barcos à vela, relaciona-se à força aerodinâmica conhecida como arrasto. No entanto, já nas décadas iniciais do século XX, turbinas que buscavam utilizar a força de sustentação aerodinâmica em detrimento da primeira ganharam destaque em campos de pesquisa e no mercado. Essa mudança de paradigma visava aumentar a produção de eletricidade, oferecendo maior eficiência energética.

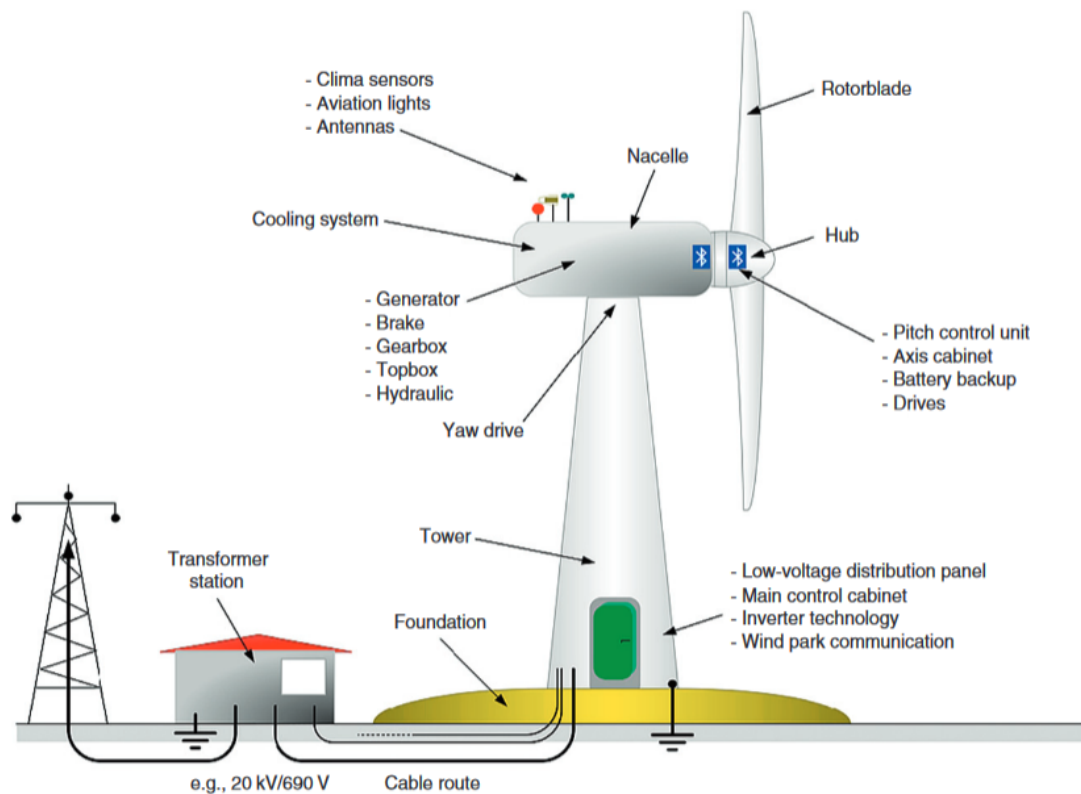
A partir da década de 1970, a crise energética causada pela alta do petróleo impulsionou a busca por fontes renováveis. Gipe (2004) argumenta que esse período marcou o renascimento da geração de eletricidade a partir do vento, consolidando a energia eólica como uma das indústrias de energia renovável mais importantes. A evolução dos aerogeradores, desde então, possibilitou que estes gerassem eletricidade suficiente para abastecer desde pequenas comunidades até grandes centros urbanos. Atualmente, os aerogeradores modernos apresentam um padrão comum na indústria, tanto a partir de seu princípio de funcionamento quanto de sua estrutura física, sendo comumente comparados a um grande cata-vento.

Tradicionalmente, como exposto por Stavrakakis e Sayigh (2012) e Energy (2023a), as turbinas eólicas são constituídas por três estruturas fundamentais: a torre, a nacelle e o rotor. A torre sustenta o conjunto em uma altura projetada; a nacelle abriga componentes mecânicos, como o alternador e a caixa de engrenagens; e o rotor, composto por cubo e pás, é impulsionado pelo vento, transferindo seu movimento para o eixo principal.

Além dessas estruturas, uma central eólica inclui uma fundação robusta que garante a estabilidade da torre, especialmente em grandes alturas. A estação transformadora, localizada na base da torre ou em áreas próximas, eleva a tensão da eletricidade gerada para facilitar sua transmissão à rede elétrica. Por fim, a subestação é responsável por conectar a central à rede elétrica nacional, ajustando a energia gerada às especificações da rede.

As principais partes que compõem uma turbina eólica são ilustradas na Figura 8, incluindo a torre, a nacelle e o rotor, além de outros componentes essenciais que integram seus sistemas mecânicos e elétricos.

Figura 8 – Principais partes que integram uma central eólica



Fonte: Stavrakakis e Sayigh (2012)

2.2.2 Configurações de aerogeradores

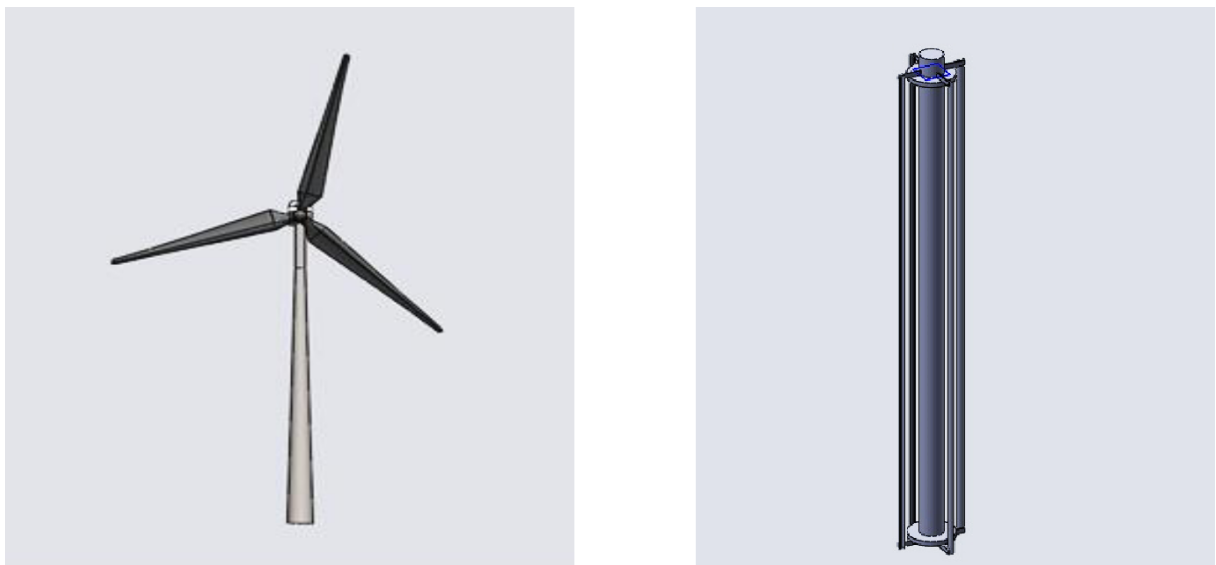
2.2.2.1 Configurações HAWT e VAWT

Essencialmente, um aerogerador movido à arrasto necessita de uma configuração estrutural que maximize sua área transversal ao vento, permitindo que seu eixo central atinja velocidades de rotação adequadas. Assim, uma disposição em que seu eixo está voltado à vertical demonstra ser benéfica, uma vez que permite que a captura de ventos seja omnidirecional, ou seja, em quaisquer direções de propagação (Eriksson; Bernhoff; Leijon, 2008).

As turbinas de eixo vertical, também denominadas de VAWT (*Vertical Axis Wind Turbines*), portanto, são ideais para essa filosofia, pois posiciona seu eixo principal transversalmente ao vento e perpendicularmente ao solo (Vivek *et al.*, 2017). Esses equipamentos foram amplamente adotados durante o desenvolvimento inicial da indústria, devido à simplicidade de seu design, gerando uma associação entre essa configuração e o funcionamento baseado na componente aerodinâmica de arrasto. Este vínculo, no entanto, não se mostra verdadeiro para todos os casos, especialmente em projetos modernos de turbinas de eixo vertical.

Em contrapartida, as turbinas de eixo horizontal, ou HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbines*), têm seu eixo disposto de maneira paralela ao solo. Diferentemente das turbinas de eixo vertical, as HAWT necessitam de um alinhamento específico com a direção do vento para maximizar sua eficiência. Vivek *et al.* (2017) destaca que esse tipo de aerogerador, embora exija um projeto mais elaborado e custoso, apresenta a vantagem de reduzir perdas energéticas ao permitir que o movimento de rotação ocorra paralelamente ao vento. A Figura 9 exemplifica turbinas HAWT, à esquerda da imagem, e VAWT, à direita da imagem.

Figura 9 – Exemplos de configuração de aerogeradores do tipo HAWT e VAWT



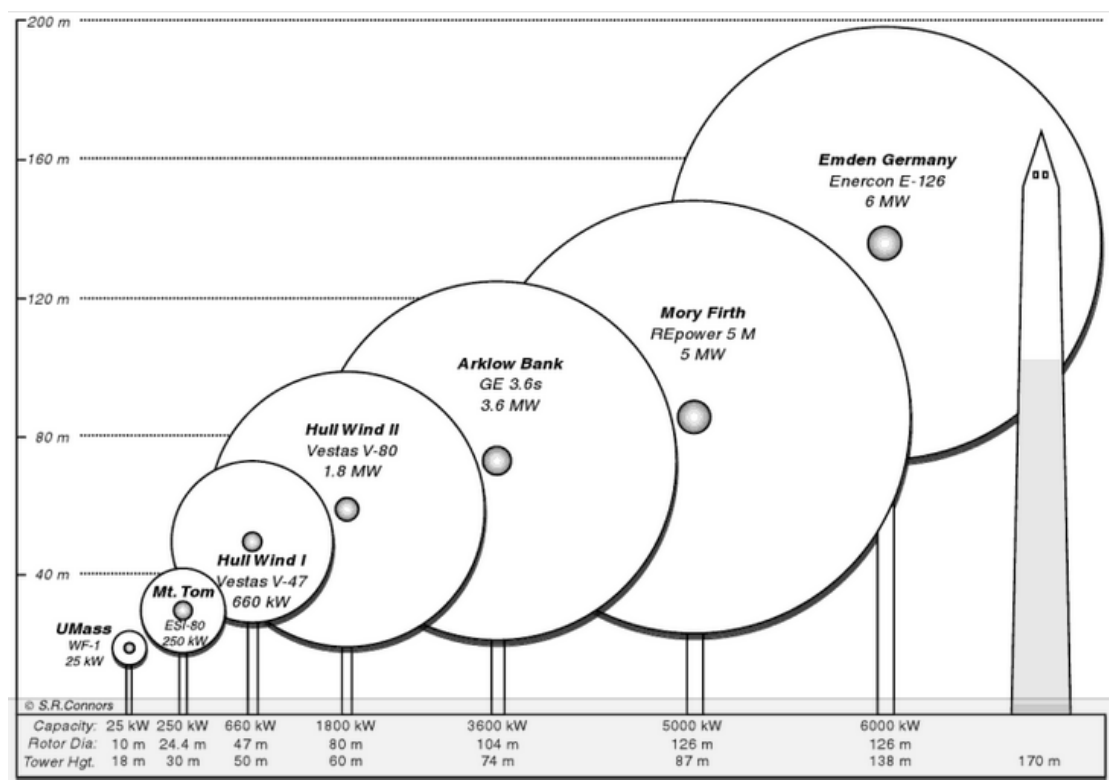
Fonte: Vivek *et al.* (2017)

Dado os princípios dinâmicos que regem essas duas configurações, as VAWT (turbinas de eixo vertical) apresentam maior viabilidade em pequenas alturas, pois, ao estarem próximas ao solo, estão sujeitas a ventos mais turbulentos e provenientes de diferentes direções. Já as HAWT (turbinas de eixo horizontal) são mais eficientes em maiores altitudes, capturando ventos mais constantes e unidirecionais.

Eriksson, Bernhoff e Leijon (2008) expressam que, devido ao aumento das demandas energéticas, as turbinas eólicas tiveram que crescer em escala e capacidade para acompanhar o consumo. Esse desenvolvimento foi essencial para aumentar a eficiência energética e reduzir os custos associados à geração de eletricidade em maior escala. Porém, embora ainda viáveis em menor escala devido ao seu custo mais baixo, as VAWT tornaram-se menos eficientes para grandes projetos, o que favoreceu o uso das turbinas de eixo horizontal em larga escala. Como resultado, as turbinas de eixo horizontal dominaram o mercado eólico, sendo comumente designadas na indústria por "aerogeradores modernos".

A Figura 10 apresenta uma comparação dos tamanhos, alturas e diâmetros de rotores de diferentes turbinas eólicas. É importante observar suas dimensões e potências associadas.

Figura 10 – Tamanhos, alturas e diâmetros de rotores representativos de turbinas eólicas

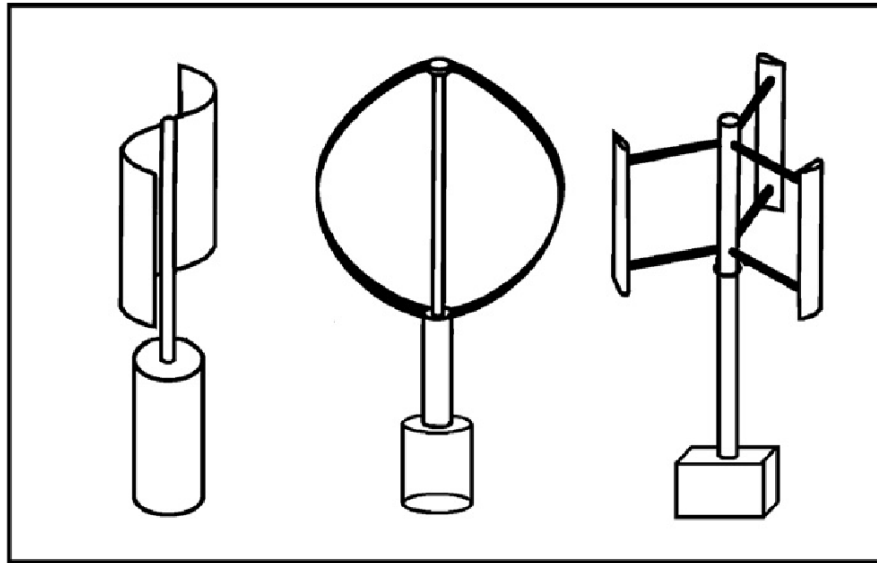


Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

Mesmo com a predominância das HAWT, novas tecnologias de turbinas eólicas, principalmente de pequeno porte, estão sendo desenvolvidas como alternativas promissoras para atender às crescentes demandas locais de energia (Nemati, 2020). Essas turbinas têm a vantagem de poderem ser instaladas próximas ao consumidor final, reduzindo assim as perdas energéticas e custos de infraestrutura. Turbinas de eixo vertical, por exemplo, são particularmente adequadas para ambientes urbanos, onde o vento é mais turbulento e instável devido à presença de edifícios. Além disso, esses sistemas podem ser instalados em espaços compactos e requerem alturas menores para operar, sendo uma solução eficiente para esses centros.

Na Figura 11 é possível observar exemplos de turbinas de eixo vertical em destaque nas últimas décadas. Da direita para a esquerda, são apresentadas os geradores dos tipos Savonius, Darrieus e de rotor-H (uma variante famosa do conceito de Darrieus). O primeiro modelo utiliza o arrasto como principal força de propulsão, enquanto os outros dois empregam perfis aerodinâmicos para gerar sustentação. Este aspecto pode ser facilmente identificado pelas filosofias de design adotadas (Eriksson; Bernhoff; Leijon, 2008).

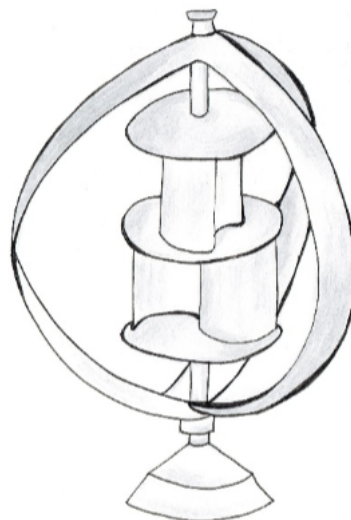
Figura 11 – Turbinas do tipo Savonius, Darrieus e rotor-H



Fonte: Eriksson, Bernhoff e Leijon (2008)

As configurações híbridas Darrieus-Savonius, estudadas por Nemati (2020), Zagubień e Wolniewicz (2022), mostram-se ainda mais promissoras, ao combinar características específicas de aerogeradores de arrasto e de sustentação, como a omnidirecionalidade e a maior eficiência energética. Logo, esses modelos demonstram ser ideais onde os ventos são mais imprevisíveis, a exemplo de uma aplicação urbana. Uma configuração típica de uma turbina Darrieus-Savonius está presente na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de aerogerador do tipo Darrieus-Savonius



Fonte: Zagubień e Wolniewicz (2022)

2.2.2.2 Demais categorizações

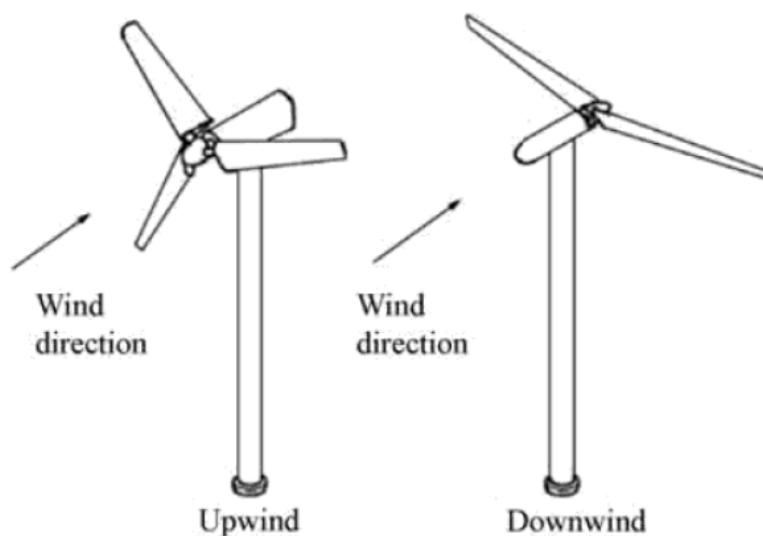
Conforme destacado anteriormente, o termo "aerogerador moderno" geralmente se refere a um gerador eólico com eixo horizontal. Esse tipo de gerador pode ser classificado em diferentes subcategorias com base em seu arranjo estrutural. Uma distinção fundamental está no posicionamento do rotor em relação à torre, resultando em duas configurações principais: *upwind* e *downwind*.

Na configuração *downwind*, a torre é posicionada à frente do rotor, ficando diretamente exposta ao vento. Esse arranjo permite o alinhamento passivo das pás com o vento, em que o próprio rotor guia a nacela em direção ao vento, dispensando mecanismos adicionais de orientação que aumentariam a complexidade do sistema. Em condições de vento enviesado, a força exercida sobre a área varrida pelo rotor gera um momento de guinada em torno do eixo vertical (eixo z), auxiliando na orientação automática do rotor. Contudo, essa disposição apresenta uma desvantagem significativa: a torre interfere no fluxo de ar antes que ele alcance o rotor, criando maior turbulência. Essa turbulência pode comprometer a eficiência energética da turbina (Wang; Tian; Hu, 2018).

Por outro lado, na configuração *upwind*, o rotor está voltado contra o vento, de modo que este atinge as pás antes de chegar à torre. Como descrito por Wang, Tian e Hu (2018), embora essa configuração ofereça maior eficiência aerodinâmica, ela exige um sistema de controle ativo para manter o rotor corretamente alinhado à direção do vento. Esse controle é realizado por sistemas que ajustam a orientação do rotor, maximizando o desempenho da turbina.

As disposições *upwind* e *downwind* podem ser visualizadas na Figura 13.

Figura 13 – Configurações *upwind* e *downwind* de aerogeradores



Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

As turbinas eólicas modernas geralmente utilizam a configuração *upwind*, tornando-se assim o modelo de aerogerador mais amplamente adotado atualmente, que será o principal foco deste estudo.

Além do posicionamento do rotor, outro fator que influencia o design das turbinas HAWT é o número de pás. A configuração mais comum na indústria é a de três pás (tripá), embora turbinas com duas, quatro ou até mesmo uma única pá também sejam utilizadas.

Figura 14 – Turbina MOD-2 da Boeing



Fonte: Stavrakakis e Sayigh (2012)

Turbinas de duas pás, como mostradas nas Figuras 14 e 15, são mais econômicas, especialmente em termos de fabricação e manutenção, uma vez que utilizam menos material e demandam menos recursos. Entretanto, essas turbinas tendem a ser mais suscetíveis a instabilidades, como vibrações excessivas, o que pode comprometer seu desempenho e reduzir sua vida útil. Esse desafio é ainda mais acentuado em turbinas de uma única pá, que requerem soluções complexas de balanceamento estrutural e aerodinâmico, o que muitas vezes inviabiliza sua aplicação em larga escala (Adeyeye *et al.*, 2021).

Figura 15 – Máquina de duas pás do WindFlow. Do folheto Windflow, www.windflow.co.nz



Fonte: Stavrakakis e Sayigh (2012)

Por outro lado, Adeyeye *et al.* (2021) destacam que turbinas com quatro ou mais pás oferecem maior estabilidade devido à distribuição uniforme das forças aerodinâmicas ao longo do ciclo de rotação. Contudo, essa configuração vem acompanhada de custos operacionais e de fabricação mais elevados, além de uma redução na eficiência aerodinâmica. Isso ocorre porque a adição de mais pás aumenta a resistência ao vento, diminuindo a velocidade de rotação e, conseqüentemente, a capacidade de gerar energia de forma eficiente. Porém, ressalta-se que, em teoria, a redução na velocidade de rotação leva a uma diminuição do ruído gerado. Assim, é necessário equilibrar vantagens e desvantagens para definir a configuração ideal de uma turbina eólica.

Considerando os fatores elucidados, a configuração de três pás se destaca como a opção ideal, proporcionando o melhor equilíbrio entre eficiência aerodinâmica, estabilidade estrutural e custo-benefício. Por esse motivo, ela é a mais amplamente utilizada em aerogeradores modernos.

2.3 A influência da condição de vento em um projeto eólico

2.3.1 Métricas de caracterização das condições de vento

2.3.1.1 Importância das condições de vento no planejamento de parques eólicos

As condições de vento são um fator essencial na viabilidade e desempenho de parques eólicos, influenciando desde a seleção dos componentes das turbinas até o dimensionamento dos equipamentos e o layout do parque. A variabilidade do vento em um local específico impacta diretamente a escolha do tipo de aerogerador e as configurações de projeto, de modo a otimizar o aproveitamento da energia eólica e garantir a durabilidade do sistema. Um projeto eficaz deve não só otimizar as características da turbina, mas também adaptá-las ao regime de vento predominante no local de instalação. Este regime de vento envolve parâmetros como a velocidade média, a variação temporal e a direção predominante do vento. A análise de comportamento dessas características é crucial para definir o sucesso do projeto, maximizar a produção energética e garantir a longevidade do equipamento.

A Figura 16 mostra um parque eólico operando sob ventos intensos, exemplificando as demandas de projeto em ambientes de alta variabilidade.

Figura 16 – Parque eólico da California (National Renewable Energy Laboratory)



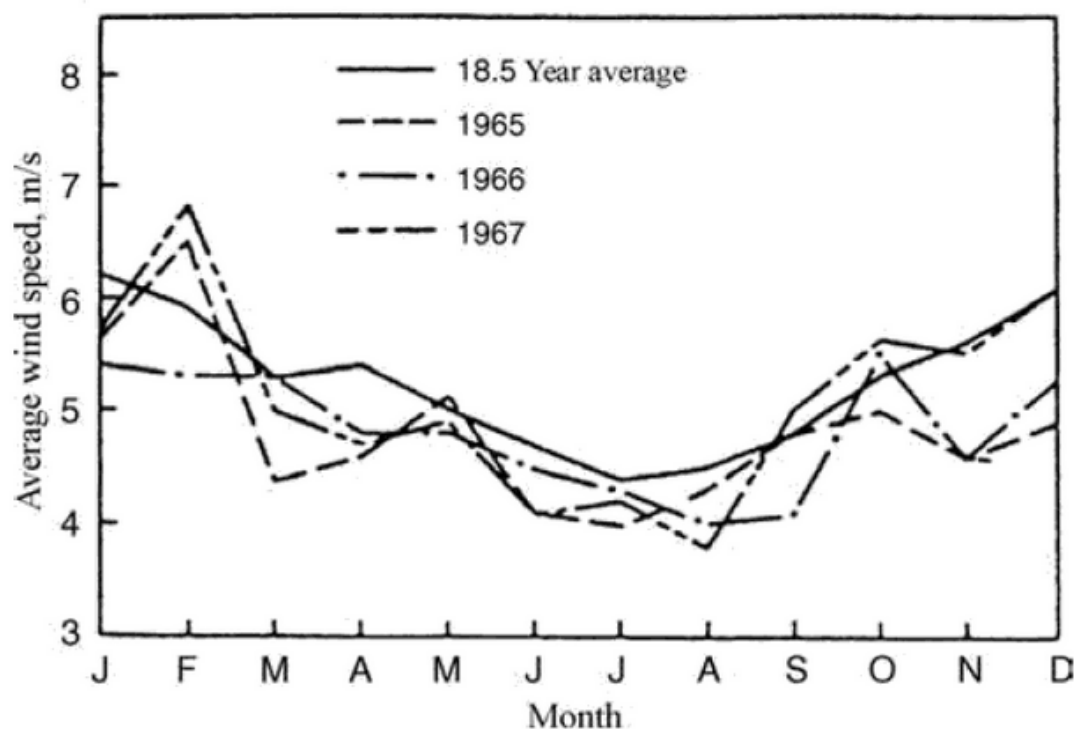
Além disso, fenômenos adversos como o efeito de esteira e a interação entre turbinas em parques eólicos devem ser considerados. Dependendo da configuração da turbina, conforme detalhado na subseção 2.2.2, diferentes tipos de aerogeradores apresentam melhor desempenho em contextos variados — desde regiões com ventos constantes até áreas com rajadas irregulares (Burton *et al.*, 2011).

2.3.1.2 Análise das características do vento e efeitos relacionados

Diversos fatores influenciam a qualidade do vento, como altitude, relevo, vegetação e condições climáticas. Esses fatores afetam o comportamento do ar e, consequentemente, o potencial eólico de uma região. Estudos detalhados das condições do vento — desde medições da velocidade média até variações diárias, sazonais e anuais — são indispensáveis para determinar a viabilidade de um parque eólico. Avaliar as tendências históricas de vento também é fundamental. Previsões estatísticas baseadas nesses dados ajudam a estimar o desempenho do parque eólico ao longo de sua vida útil, que pode durar várias décadas (Burton *et al.*, 2011; Manwell; McGowan; Rogers, 2010).

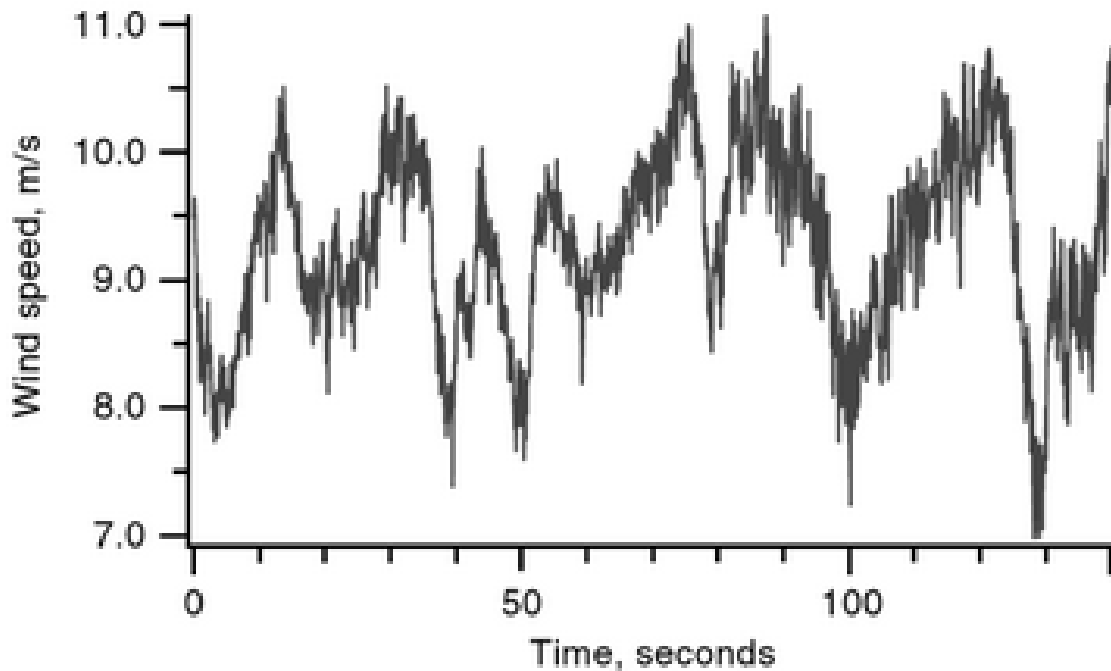
Um exemplo de variação anual do vento pode ser observado na Figura 17, enquanto a Figura 18 ilustra uma variação típica de velocidade em períodos de curta duração.

Figura 17 – Variações sazonais da velocidade de vento em médias mensais (Hiester e Pennell, 1981)



Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

Figura 18 – Variações típica da velocidade de vento em função do tempo para períodos de curta duração

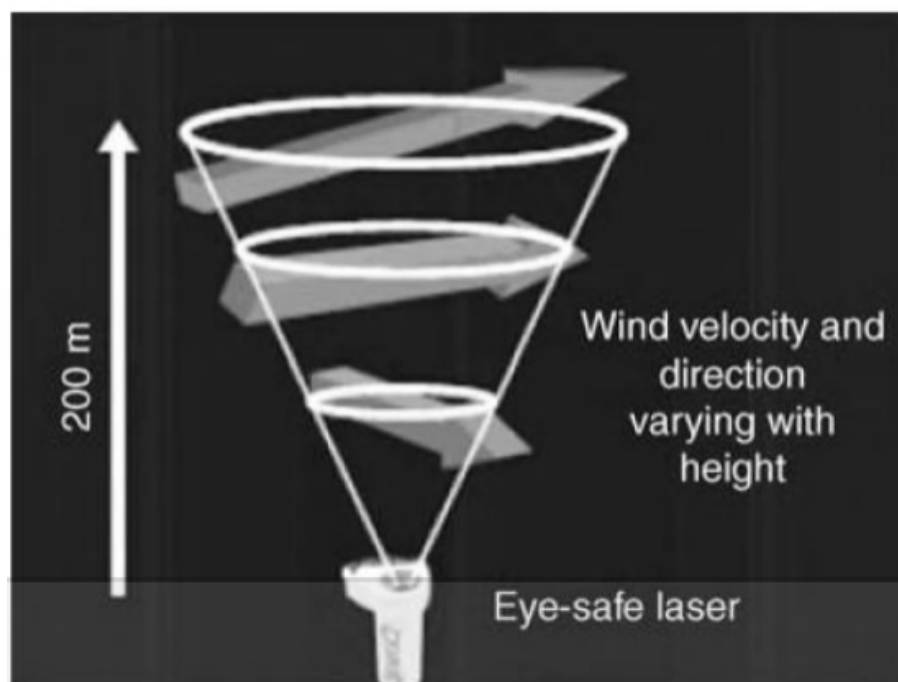


Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

A medição da qualidade do vento envolve o uso de tecnologias como torres anemométricas, que registram a velocidade e a direção do vento em diferentes alturas. Sistemas mais avançados, como LiDAR (Light Detection and Ranging) e SoDAR (Sound Detection and Ranging), estudados por Banta *et al.* (2015), permitem uma medição tridimensional do comportamento do vento. Essas tecnologias são cada vez mais utilizadas em parques eólicos, especialmente em áreas offshore, onde o comportamento do vento é altamente variável e imprevisível. Estudos com LiDAR têm mostrado que essa tecnologia pode prever o comportamento do vento em diferentes níveis da atmosfera, melhorando as estimativas de produção energética. Um esquemático de LiDAR com escaneamento cônico pode ser visualizado na Figura 19.

As análises do fluxo de ar incluem, além da média de velocidade, flutuações rápidas e caóticas na intensidade do vento, comportamento que recebe o nome de "turbulência". Esse fenômeno é causado por variações locais de temperatura e pressão em curtos intervalos de tempo, podendo ser de minutos ou até segundos. A turbulência pode impactar a eficiência das turbinas ao causar forças instáveis sobre as pás, o que reduz a captura de energia (Manwell; McGowan; Rogers, 2010). A intensidade da turbulência, medida por variação e desvio padrão da velocidade do vento, auxilia na avaliação precisa das condições locais (Burton *et al.*, 2011).

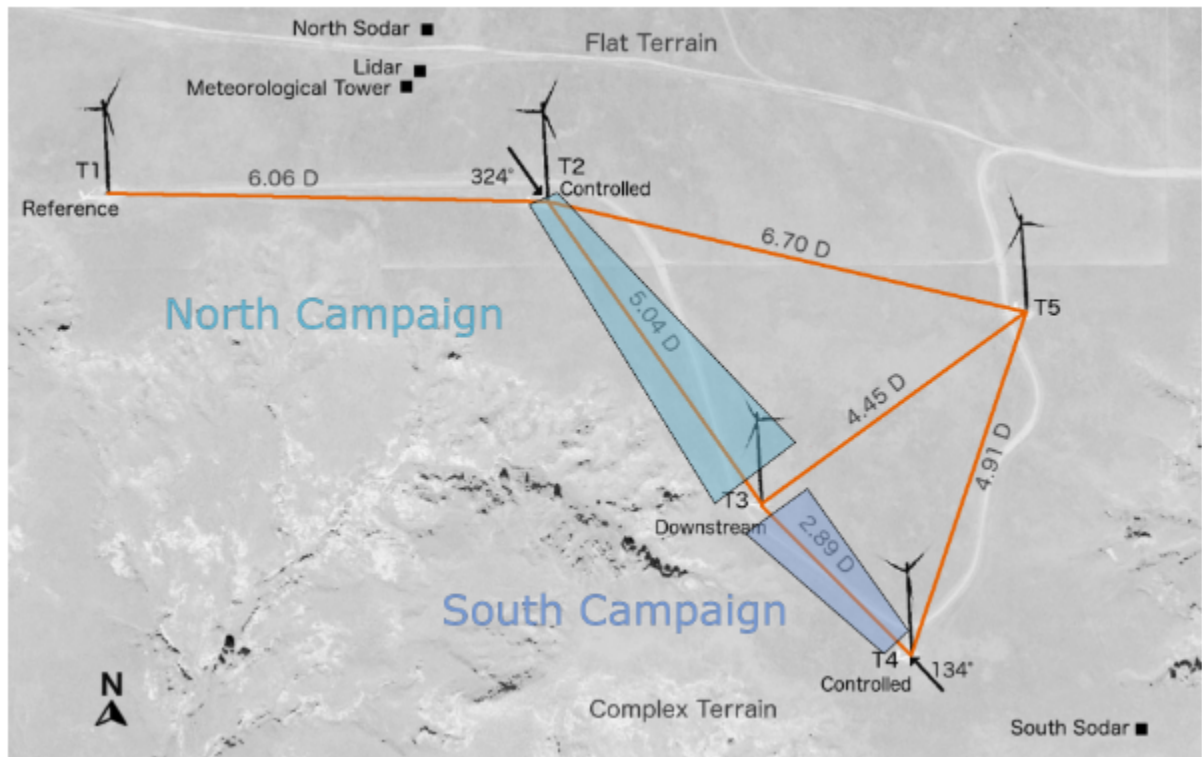
Figura 19 – Esquemático de LiDAR com sistema de escaneamento cônico



Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

Outro fenômeno relevante é o efeito de esteira, que ocorre quando o ar desacelera e se torna mais turbulento após passar pelas turbinas. Esse efeito afeta negativamente as turbinas localizadas a jusante, ou seja, atrás da turbina inicial, e pode reduzir significativamente sua produção de energia. Para mitigar esse impacto, estudos de espaçamento entre turbinas e a análise da geometria do parque são essenciais. Em aerogeradores do tipo HAWT, esse impacto é mais significativo devido à maneira como o fluxo de ar se reorganiza após passar pelas pás (Eriksson; Bernhoff; Leijon, 2008). Estudos recentes, como o realizado por Fleming *et al.* (2020) e ilustrado pela Figura 20, mostram que o uso de espaçamentos adequados pode reduzir os efeitos de esteira e aumentar a eficiência geral do parque eólico.

Figura 20 – Exemplo de estudo de campo quanto à influência da esteira entre turbinas eólicas de um mesmo parque eólico



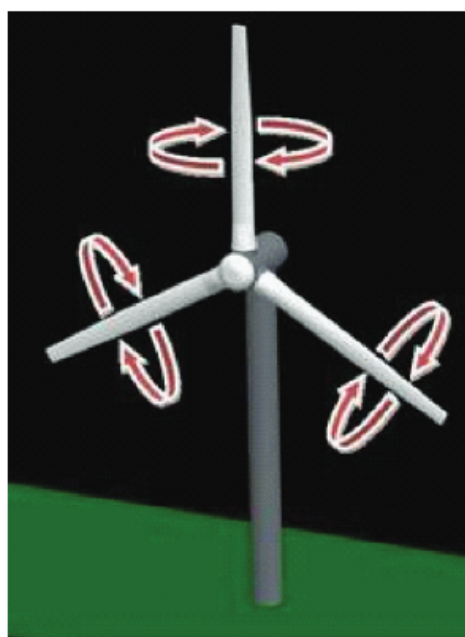
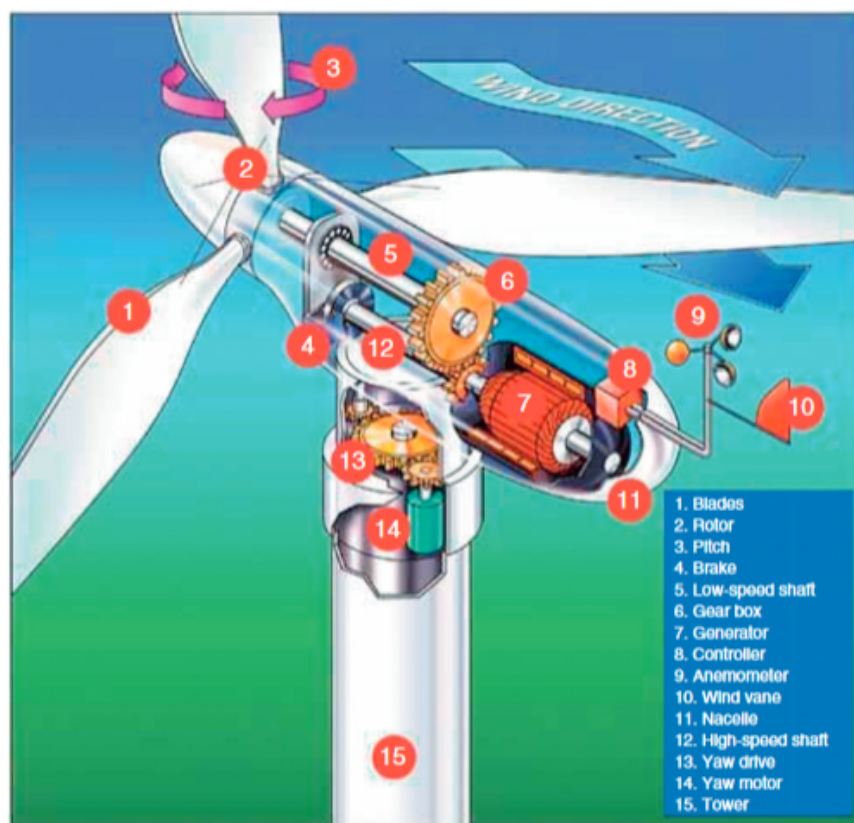
Fonte: Fleming *et al.* (2020)

2.3.2 Mecanismos de controle e segurança em condições variáveis de vento

2.3.2.1 Controle de operação em condições normais de vento

Aerogeradores modernos, especialmente do tipo *upwind*, utilizam controles ativos para otimizar a operação e garantir a segurança. Sensores e atuadores ajustam o rotor em função da velocidade e direção do vento, regulando as cargas estruturais (Manwell; McGowan; Rogers, 2010). Esses sistemas, juntamente com outros componentes elétricos, estão representados na Figura 21.

O ajuste do ângulo de *pitch* é um dos mecanismos mais importantes para a operação de uma turbina eólica moderna em condições ideais. Ao inclinar as pás em relação ao vento, o sistema ajusta automaticamente a turbina para otimizar a captação de energia conforme a intensidade do vento varia. Através da regulação das forças aerodinâmicas, o sistema também ajuda a manter as cargas estruturais dentro dos limites operacionais. Segundo Stavrakakis e Sayigh (2012), o controle de *pitch* é fundamental para maximizar a eficiência e minimizar o risco de danos. Um esquema ilustrativo da operação desse mecanismo está apresentado na Figura 22.



Outro mecanismo de ajuste essencial é o controle da guinada (*yaw*). Esse sistema orienta o rotor da maneira mais eficiente possível, independentemente da variabilidade na direção do vento. Como mencionado no tópico 2.2.2.2, aerogeradores *upwind*, que têm o rotor voltado para o vento, dependem fortemente desse ajuste para evitar sobrecarga em situações de rajadas ou ventos fora do ângulo ideal. O funcionamento do mecanismo de controle de guinada é demonstrado na Figura 23.

Figura 23 – Controle de guinada (*yaw*)



Fonte: Stavrakakis e Sayigh (2012)

2.3.2.2 Mecanismos de proteção em ventos extremos

Quando o vento excede a velocidade ideal de operação, alguns dos aerogeradores modernos utilizam o estol aerodinâmico como medida de proteção. O controle de estol interrompe o fluxo de ar sobre as pás de forma controlada, reduzindo as forças sobre as pás e evitando sobrecarga estrutural. Stavrakakis e Sayigh (2012) também menciona que o estol é uma estratégia empregada para garantir a segurança operacional das turbinas em condições extremas.

Outra solução, amplamente utilizada, é o embandeiramento das pás, que reduz a resistência do rotor ao vento, diminuindo as cargas estruturais em condições extremas. Além disso, os sistemas de freio garantem que a rotação do rotor não ultrapasse o limite máximo seguro. Em casos severos, o freio pode parar completamente a turbina, evitando a ocorrência de danos estruturais, até que as condições climáticas se estabilizem (Manwell; McGowan; Rogers, 2010).

Dessa forma, esses mecanismos de controle não só garantem a eficiência das turbinas, mas também são vitais para prolongar a vida útil dos equipamentos e assegurar a segurança operacional de parques eólicos, especialmente em regiões onde a variabilidade do vento é alta.

2.4 A aerodinâmica de uma pá eólica

2.4.1 Introdução geral

Como destacado na seção 2.2, a operação de uma turbina eólica está diretamente ligada à interação do vento com as pás, resultando na geração de forças aerodinâmicas. O fluxo de ar, ou escoamento, ao longo das pás cria forças de reação conhecidas como "resultantes aerodinâmicas", que podem ser divididas em duas componentes principais: sustentação e arrasto. Essas forças são responsáveis por impulsionar o rotor e, consequentemente, o gerador de eletricidade (Burton *et al.*, 2011).

Esse comportamento aerodinâmico é análogo ao de uma asa de aeronave, cuja interação com o vento permite que uma estrutura de toneladas possa se deslocar por milhares de quilômetros em altitudes elevadíssimas. A otimização do design das pás, tal como de uma asa, juntamente com a compreensão detalhada do escoamento ao longo de suas superfícies, é essencial para maximizar a eficiência energética da turbina (Manwell; McGowan; Rogers, 2010).

2.4.2 Perfil aerodinâmico

2.4.2.1 Forças aerodinâmicas

A interação do vento com a pá eólica gera duas forças principais: sustentação e arrasto, ambas diretamente influenciadas pela geometria do aerofólio da pá. A sustentação atua perpendicularmente ao escoamento do vento, sendo responsável pela geração de movimento rotacional em turbinas eólicas modernas. Ela ocorre devido à diferença de pressão entre o extradorso (superfície convexa) e o intradorso (superfície côncava) das pás. No contexto da indústria eólica, essas superfícies são frequentemente denominadas como "lado de sucção" e "lado de pressão", respectivamente.

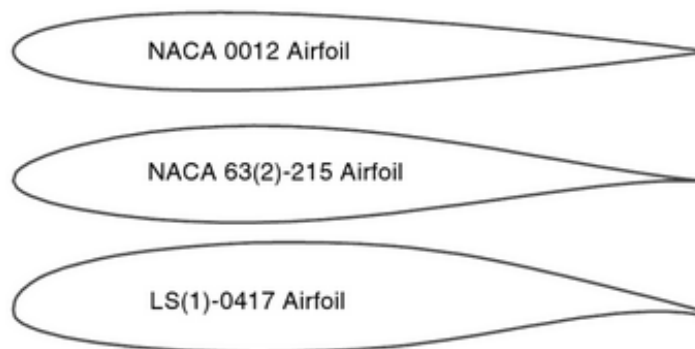
O lado de sucção é caracterizado por uma menor pressão devido às maiores velocidades do escoamento sobre essa região, de acordo com o princípio de Bernoulli. Em contraste, a superfície inferior da pá, ou lado de pressão, está sujeita a ventos de menor velocidade, resultando em uma área de maior pressão. Quanto maior for esse gradiente de pressão, maior será a força de sustentação gerada. O design aerodinâmico das pás é cuidadosamente planejado para maximizar essa força sem incorrer em estol precoce, que pode comprometer a eficiência operacional da turbina (Manwell; McGowan; Rogers, 2010).

Já o arrasto, que atua na direção oposta ao escoamento, gera uma resistência ao movimento da pá. Ele se divide em arrasto de pressão, que decorre do desequilíbrio de pressão ao longo da pá, e arrasto de fricção, devido às forças viscosas presentes na superfície da pá (Manwell; McGowan; Rogers, 2010). Essas duas componentes do arrasto são fatores cruciais no projeto de turbinas eólicas, e seu controle adequado permite capturar mais energia do vento, aumentando a eficiência geral do sistema.

2.4.2.2 Geometria do aerofólio

O aerofólio, presente na seção transversal de pás de geradores modernos, é projetado para otimizar a sustentação e minimizar o arrasto, essencial para garantir a eficiência da turbina. Os elementos geométricos principais incluem o bordo de ataque (local de contato inicial do escoamento), o bordo de fuga (onde o fluxo de ar se desprende), a linha de corda (reta que conecta o bordo de ataque ao de fuga), e a linha de camber (curvatura média do aerofólio) (Manwell; McGowan; Rogers, 2010). A Figura 24 apresenta alguns exemplos de perfis de aerofólios.

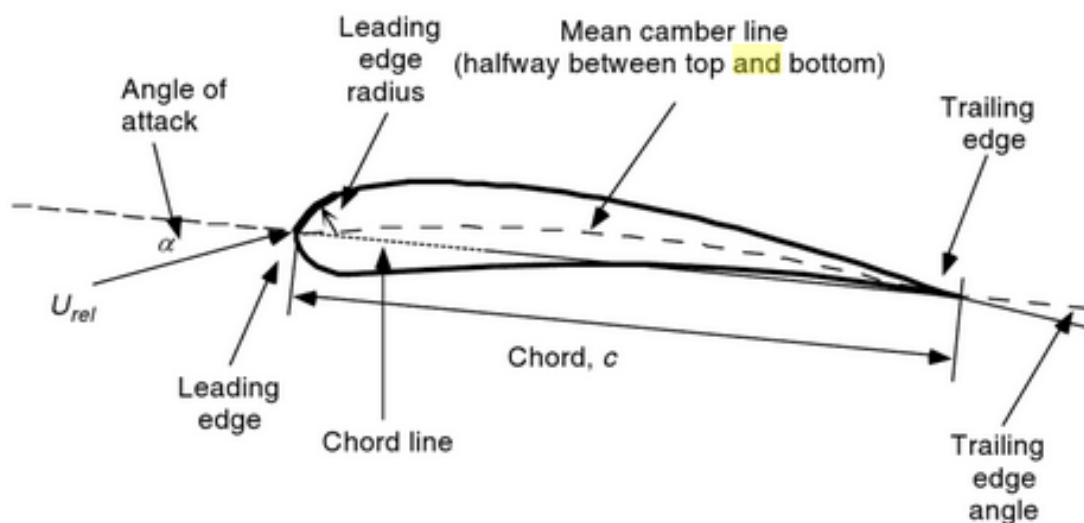
Figura 24 – Exemplos de aerofólios



Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

As principais nomenclaturas associadas a um aerofólio são ilustradas na Figura 25.

Figura 25 – Principais parâmetros geométricos de um aerofólio



Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

A partir desses elementos, derivam-se parâmetros essenciais para caracterizar o perfil da pá, como: a corda, que é o comprimento da linha de corda; a espessura do aerofólio, que é a distância entre o lado de sucção e o lado de pressão, medida perpendicularmente à linha de corda; e o camber máximo, que se refere à curvatura máxima da linha de camber.

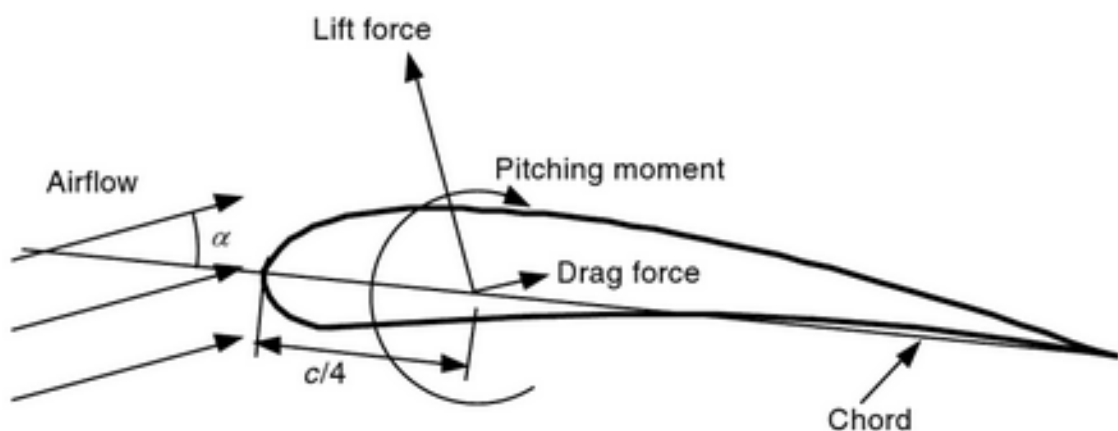
Esses parâmetros geométricos são decisivos para as características aerodinâmicas da pá. Em especial, o camber e o ângulo de ataque influenciam diretamente o gradiente de pressão e, conseqüentemente, a geração de sustentação e arrasto (Burton *et al.*, 2011) - como será demonstrado no tópico 2.4.2.3.

2.4.2.3 Comportamento aerodinâmico e ângulo de ataque

O ângulo de ataque, definido como o ângulo entre a linha de corda e a direção do escoamento, é um fator crucial para o controle aerodinâmico. Sua variação promove a otimização das forças de sustentação e arrasto. Um aumento no ângulo de ataque pode aumentar a sustentação até certo ponto, mas também pode levar ao estol aerodinâmico quando excede um limite crítico, o qual é conhecido por "ponto de estol". Nesse momento há uma separação do escoamento que resulta em perda de sustentação e aumento no arrasto. O controle preciso desse ângulo é essencial para otimizar a operação da turbina, evitando a perda de eficiência e possíveis danos ao sistema (Burton *et al.*, 2011).

As forças e momentos atuam em um perfil de aerofólio típico, conforme pode ser visto na Figura 26. É importante observar como essas componentes são aplicadas ao longo da linha de corda, em uma posição a um quarto da corda a partir do bordo de ataque, ponto este conhecido como centro aerodinâmico do perfil (CA).

Figura 26 – Forças e momentos aplicados em uma seção de aerofólio, com α sendo o ângulo de ataque e c , a corda



Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

2.4.3 Parâmetros adimensionais

2.4.3.1 Número de Reynolds

Como destacado por Manwell, McGowan e Rogers (2010), os problemas de escoamento podem ser caracterizados de maneira eficiente a partir de parâmetros adimensionais. O número de Reynolds (Re) é uma grandeza adimensional que relaciona as forças inerciais e viscosas no escoamento, sendo diretamente proporcional à velocidade do vento e à dimensão da pá. Em uma turbina, o número de Reynolds varia ao longo da envergadura devido às variações nas velocidades e dimensões locais. Essa variação influencia o comportamento aerodinâmico nas diferentes seções da pá, e, por isso, o design do aerofólio é ajustado para atender a essas variações (Manwell; McGowan; Rogers, 2010). Devido à redução da velocidade local do vento ser proporcionalmente mais relevante do que o aumento das dimensões da pá, as seções próximas à raiz da pá apresentam números de Reynolds menores, enquanto nas extremidades esse parâmetro assume valores maiores.

2.4.3.2 Coeficientes de força e momento

Forças e momentos também são analisados de maneira adimensional, sendo seus respectivos coeficientes resultados de sua relação com características geométricas da pá e parâmetros dinâmicos do escoamento. Os coeficientes de sustentação (C_l) e arrasto (C_d) quantificam a eficiência aerodinâmica. Idealmente, o C_l aumenta linearmente com o ângulo de ataque até o estol, enquanto o C_d cresce lentamente para ângulos baixos, mas aumenta acentuadamente no estol (Burton *et al.*, 2011). Em geral, projetos aerodinâmicos buscam maximizar a razão C_l/C_d , garantindo maior sustentação com menor resistência ao movimento.

2.4.4 Camada limite e separação de fluxo

2.4.4.1 Princípios da camada limite

Manwell, McGowan e Rogers (2010) atribui ao arrasto o surgimento de duas regiões distintas no escoamento: uma que está suficientemente distante da superfície do aerofólio, onde os efeitos de atrito podem ser desprezados, e outra localizada imediatamente próxima às superfícies, denominada "camada limite".

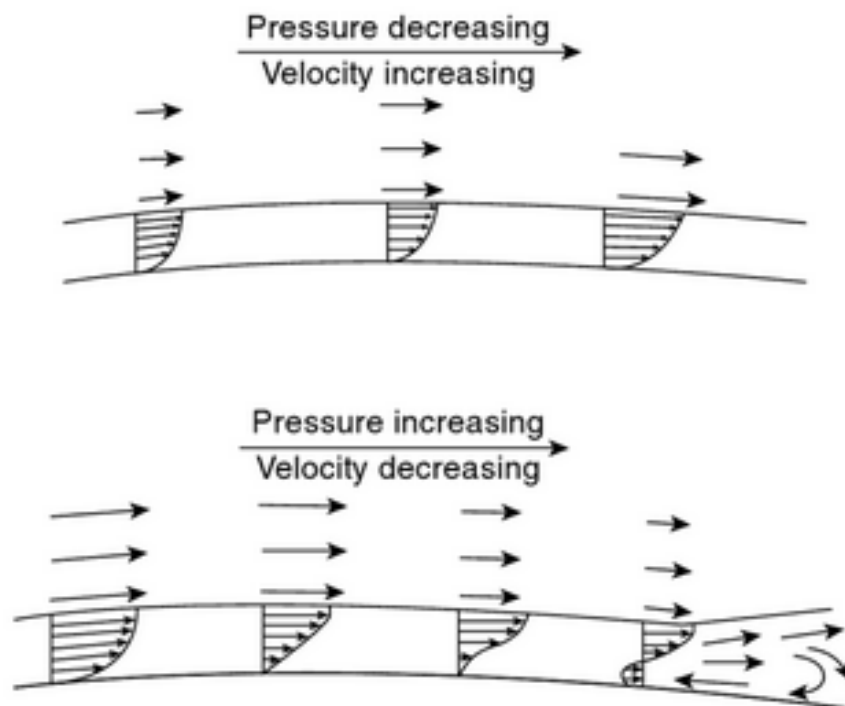
A camada limite é a região do escoamento próxima à superfície da pá onde as forças viscosas prevalecem, diminuindo a velocidade do ar (Manwell; McGowan; Rogers, 2010). Na superfície do corpo, a velocidade do ar é nula, e essa camada se estende até que a velocidade do escoamento atinja aproximadamente 99 % da velocidade do escoamento longe da influência do corpo, conhecido como "escoamento livre".

À medida que o ar flui sobre a superfície do aerofólio, a camada limite pode ser laminar ou turbulenta, dependendo da geometria da pá e das condições do escoamento

(Manwell; McGowan; Rogers, 2010). A transição entre esses dois regimes de escoamento influencia diretamente a eficiência da turbina e o surgimento do estol, que ocorre quando a camada limite se separa da superfície do aerofólio.

O efeito dos gradientes favoráveis e desfavoráveis em uma camada limite é ilustrado na Figura 27. Na última representação, observa-se a formação de condições que, ao final, levam ao estol, evidenciado pela ocorrência de fluxo reverso próximo à superfície.

Figura 27 – Efeitos de gradientes favoráveis (decrecentes) e adversos (crescentes) de pressão em uma camada limite (Miley, 1982)



Fonte: Manwell, McGowan e Rogers (2010)

2.4.4.2 Separação de fluxo e controle de estol

O estol ocorre quando o escoamento se separa da superfície da pá. Esse fenômeno é geralmente observado em ângulos de ataque elevados, quando esse parâmetro ultrapassa um ponto crítico, e a camada limite não consegue mais seguir a superfície do aerofólio. Isso resulta em uma queda drástica na sustentação e um aumento significativo no arrasto (Hansen, 2008).

Uma vez atingida essa condição, a perda de sustentação pode se manifestar de diferentes formas, dependendo do design aerodinâmico. Como discutido no tópico 2.3.2.2, turbinas eólicas modernas empregam o estol de forma controlada para limitar a produção de energia em condições de vento extremo.

No entanto, esse fenômeno também pode representar um risco de sobrecarga estrutural, especialmente se as cargas resultantes forem aplicadas de forma abrupta. Por isso, os mecanismos de controle ativo são cruciais para gerenciar a variação de cargas durante o estol, otimizando a operação da turbina e minimizando efeitos adversos. Assim, o estol, apesar de ser um fenômeno crítico, pode ser utilizado estrategicamente nas turbinas eólicas para garantir tanto a segurança estrutural quanto a eficiência energética.

2.4.5 Efeitos tridimensionais e vórtices de ponta

Em uma pá de turbina, os fenômenos tridimensionais adicionam complexidade ao comportamento aerodinâmico, sendo mais notáveis em turbinas de grande porte. Um exemplo clássico desses efeitos são os vórtices de ponta. Os vórtices de ponta surgem devido à diferença de pressão entre o lado de sucção e o lado de pressão nas extremidades das pás. Esses vórtices provocam arrasto induzido, o que reduz a eficiência geral da turbina eólica (Burton *et al.*, 2011).

Para mitigar o arrasto induzido, projetos modernos de pás utilizam winglets ou outros dispositivos nas extremidades das pás. Essas inovações ajudam a reduzir a intensidade dos vórtices, resultando em uma melhora significativa na captação de energia do vento e na eficiência aerodinâmica da turbina. A utilização desses componentes pode, portanto, ser considerada uma alternativa para aprimorar o desempenho energético e acústico de uma turbina eólica (como pode ser inferido a partir do tópico 2.6.3.1.2).

2.5 Metodologia base adotada para estudos acústicos

2.5.1 Fundamentos da acústica

2.5.1.1 Caracterização geral

A acústica é a ciência que estuda o som e suas propriedades, abrangendo desde a geração, propagação e recepção das ondas sonoras até a sua influência no ambiente e nos seres vivos. O som está presente em diversas situações cotidianas, como momentos de lazer, reuniões de trabalho e estudos. Ele tem a capacidade de influenciar o estado emocional e até mesmo a saúde das pessoas, além de evocar memórias. Contudo, problemas acústicos têm se tornado uma fonte crescente de desconforto e discordância.

Embora o som faça parte da vida moderna, especialmente em áreas urbanas e industriais, ele pode interferir no bem-estar e no desempenho das atividades humanas, dependendo de como é percebido. A análise acústica, portanto, é essencial para compreender as características do som e identificar quando ele se torna uma fonte de conforto ou incômodo.

2.5.1.2 Conceitos e terminologia essencial em acústica

Conceitos fundamentais sobre acústica são definidos pela norma brasileira NBR 16313, que está alinhada a padrões internacionais da ISO (*International Organization for Standardization*) e da IEC (*International Electrotechnical Commission*). Segundo essa norma, o "som" é definido como flutuações de pressão em torno da pressão ambiente, dentro da faixa audível de 20 *Hz* a 20 *kHz*. Ainda que "som" e "ruído" sejam tecnicamente semelhantes, o termo "ruído" tende a ser associado a sons indesejáveis, especialmente quando capazes de gerar desconforto (ABNT, 2014).

Em relação à subjetividade do ruído, a American Wind Energy Association ressalta que a percepção do som é altamente variável, dependendo do ambiente e do contexto. Sons que alguns consideram agradáveis podem ser incômodos para outros (AWEA, 2000). O som de uma turbina eólica, por exemplo, pode ser percebido de formas muito distintas em áreas rurais e industriais, tornando a análise contextual um ponto chave para entender a percepção do ruído.

2.5.2 Fenômenos acústicos e seus agentes

A análise de um fenômeno acústico pode ser organizada em torno de três agentes principais: o emissor, o campo sonoro (ou meio de propagação) e o receptor. Esses elementos são fundamentais para definir qualquer evento sonoro e compreender a maneira como o som se desloca e é percebido no ambiente. O Quadro 1 resume as definições desses agentes, apresentadas pela NBR 16313, em um contexto típico de ruído.

Quadro 1 – Designações de agentes em um contexto típico de ruído

Termo	Definição
Emissor	Local de origem de um som.
Receptor	Local onde um som é avaliado (medido).
Campo sonoro	Região na qual ocorre a propagação da onda sonora.
Campo sonoro livre	Campo idealizado onde a propagação das ondas sonoras ocorre sem reflexões.

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 16313 (ABNT, 2014).

O emissor, ou fonte sonora, é o responsável pela geração de som, através de vibrações mecânicas. Ele define características fundamentais do som, como intensidade, frequência e timbre. Em turbinas eólicas, por exemplo, o emissor é o próprio equipamento em operação, que gera sons a partir de vibrações mecânicas e da interação com o vento.

O meio onde o som se propaga, denominado campo sonoro, é o espaço no qual a onda sonora viaja. Suas propriedades são influenciadas pelo ambiente e pelas condições atmosféricas, afetando tanto a intensidade quanto a qualidade do som percebido. Em um "campo sonoro livre", a propagação ocorre sem barreiras; no entanto, em condições reais, fenômenos como reflexão, dispersão e absorção impactam significativamente o som. A intensidade sonora decai com a distância, segundo a lei do inverso do quadrado, o que significa que, ao dobrar a distância entre o emissor e o receptor, a intensidade do som reduz-se a um quarto do valor original.

Já o receptor é quem recebe e interpreta o som, podendo ser uma pessoa, um equipamento de medição ou uma estrutura física. No caso humano, a percepção é afetada pela sensibilidade do ouvido a diferentes frequências, além de experiências e fatores contextuais, que podem transformar o som em algo agradável ou incômodo.

2.5.3 Medição sonora

2.5.3.1 Conceitos de medidas sonoras

2.5.3.1.1 Intensidade e nível sonoro

Para analisar um som, especialmente em estudos de ruído, é necessário medi-lo de forma objetiva. A intensidade sonora, frequentemente chamada de "volume", refere-se à energia transmitida por uma onda sonora. No entanto, devido à vasta gama de intensidades perceptíveis ao ouvido humano, as grandezas acústicas são geralmente expressas em escalas logarítmicas, que condensam essa ampla faixa de variação em uma escala mais gerenciável. Esse novo parâmetro é conhecido como "nível sonoro".

Conforme descrito na NBR 16313 (ABNT, 2014), o nível sonoro é uma representação adimensional de uma grandeza sonora em escala logarítmica, expressa em decibel (dB).

O uso dessa metodologia permite quantificar o som de maneira precisa e comunicável, facilitando comparações entre diferentes tipos sonoros em variados contextos e aplicações de projeto.

Embora essa abordagem forneça uma análise quantitativa e padronizada da intensidade sonora, é fundamental reconhecer que a percepção do som também é influenciada por aspectos subjetivos. O incômodo causado por um som varia de acordo com a experiência individual do ouvinte, conforme evidenciado por AWEA (2000). Assim, não é possível caracterizar de forma totalmente objetiva e imparcial o grau de incômodo que um som pode causar, tornando o equilíbrio entre dados técnicos e a experiência humana uma consideração essencial em estudos acústicos.

2.5.3.1.2 Relação entre intensidade e frequência

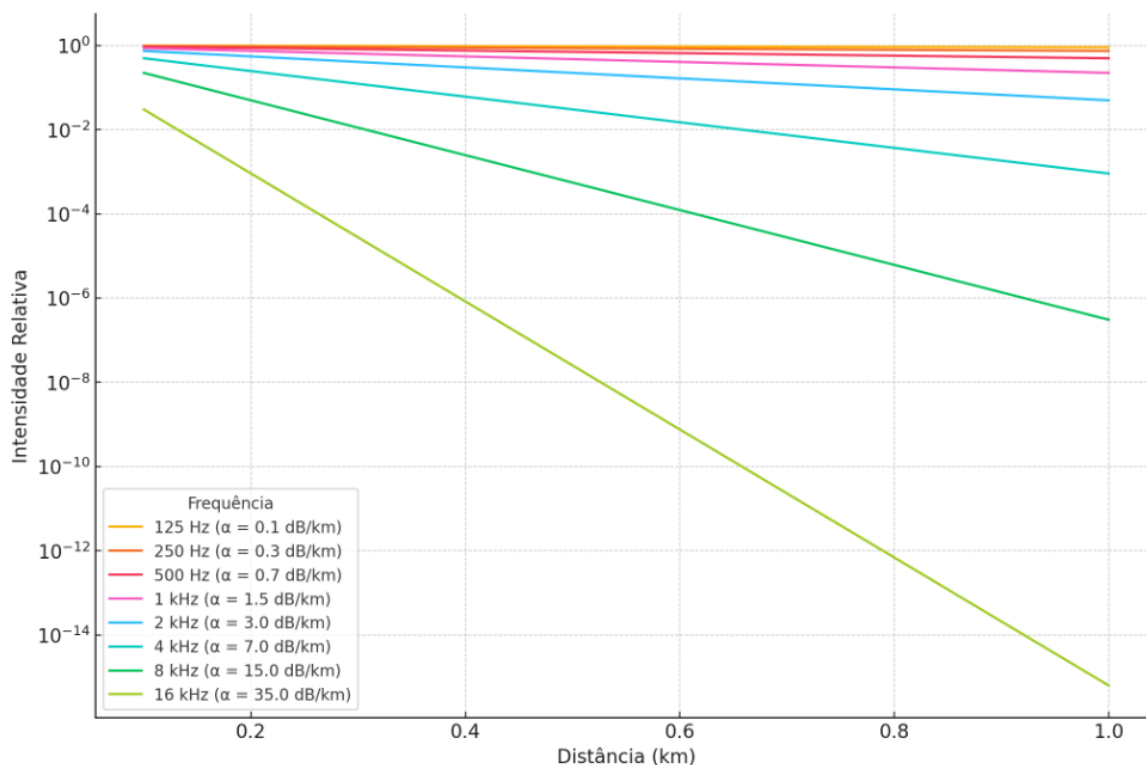
A percepção e o comportamento da propagação sonora são influenciados pela interação entre frequência e intensidade do som. Sons de baixa frequência, embora transportem menos energia, podem ser percebidos à longa distância devido à sua menor atenuação. Em contraste, altas frequências sofrem maior dissipação, especialmente ao interagir com o ar e obstáculos, sendo mais rapidamente atenuadas.

A grandeza responsável por mensurar essa atenuação acústica é o coeficiente de absorção sonora (α), que se relaciona em níveis exponenciais ao princípio do inverso do quadrado da distância. Com isso, o decaimento energético é ainda mais pronunciável para a faixa das altas frequências. De acordo com a NBR 16313 (ABNT, 2014), o coeficiente de absorção sonora é definido como a razão entre a energia sonora absorvida por um material e a energia sonora incidente sobre ele. Esse coeficiente é diretamente relacionado com as propriedades físicas do material e com a frequência sonora, refletindo como diferentes materiais podem impactar a absorção de som. Este coeficiente é um valor adimensional, variando entre 0 e 1, onde 1 representa máxima absorção.

Para uma condição ambiente típica, com temperaturas em torno de $20^{\circ}C$ e umidade relativa do ar de 50 %, é possível encontrar valores de atenuação sonora conforme a metodologia que consta no site da Universidade Estadual da Pensilvânia (Drussell, 2016). A Figura 28 ilustra a dissipação dos níveis de intensidade relativa para diferentes frequências, assumindo condições de meio de propagação semelhantes.

A partir desses dados, observa-se que frequências em torno de 8 kHz , por exemplo, apresentam uma atenuação aproximadamente 1.500 vezes maior em relação à faixa de 250 Hz em uma distância de 500 m da fonte. Esse diferencial de atenuação pode chegar à ordem de 10^6 para distâncias de 1 km .

Figura 28 – Decaimento da intensidade sonora para diferentes frequências em relação a distâncias inferiores à 1 km



Fonte: Drussell (2016)

2.5.3.1.3 Espectro de frequência

O espectro de frequências de um som descreve como a energia sonora está distribuída ao longo das diversas frequências. A análise do espectro é crucial para identificar quais frequências predominam em um determinado som e como elas influenciam sua percepção. Ela é frequentemente utilizada em estudos de ruído, já que permite decompor o som em suas componentes individuais, facilitando a identificação de características específicas de cada frequência.

O espectro audível humano abrange de 20 Hz a 20 kHz , intervalo que normalmente é subdividido para análises mais detalhadas. Essas subdivisões, denominadas "bandas de frequência", são amplamente utilizadas em medições acústicas, especialmente quando se deseja avaliar com precisão a intensidade do som em intervalos específicos. O som captado pode ser analisado com mais precisão ao avaliar os níveis sonoros em cada banda específica do espectro, permitindo, por exemplo, identificar ruídos tonais ou variações de amplitude que podem causar desconforto auditivo. Essas bandas facilitam a comparação dos níveis sonoros em diferentes faixas de frequência e são padronizadas por normas internacionais, como a IEC 61260 (IEC, 2014).

No Quadro 2, são apresentados os termos e definições relacionados às diferentes formas de avaliação do espectro.

Quadro 2 – Designações de níveis sonoros

Termo	Definição
Nível sonoro global	Nível sonoro que abrange todo o espectro audível.
Nível sonoro em bandas proporcionais ¹	Nível sonoro referente a uma faixa do espectro audível, especificada pela sua frequência central e com largura proporcional a essa frequência central, com coeficiente de proporcionalidade determinado pela fração de oitava considerada.

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 16313 (ABNT, 2014).

Nota: 1. As bandas de largura proporcional são estabelecidas pela IEC 61260. As mais comuns são bandas de oitava e bandas de um terço de oitava.

O nível sonoro global refere-se à soma de todas as frequências do espectro audível, enquanto o nível sonoro em bandas proporcionais descreve a intensidade sonora em uma faixa específica de frequência. Essas bandas são definidas por sua frequência central e têm larguras proporcionais a ela. Esse método de subdivisão, com base na relação entre a frequência central e sua largura, segue normas como a NBR 16313 (ABNT, 2014) e é comum em estudos de ruído industrial e ambiental.

As divisões em bandas de oitava ou de terças de oitava são as mais utilizadas. Cada oitava representa um intervalo de frequência em que a frequência superior é o dobro da inferior. Já as bandas de terço de oitava são subdivisões das bandas de oitava, sendo cada uma delas composta por três bandas de terço de oitava. As Tabelas 1 e 2 permitem visualizar como se qualificam, respectivamente, algumas das divisões de oitava e das subdivisões em terças de oitava, ao longo do espectro padronizado de frequências.

Tabela 1 – Frequências centrais e limites de bandas em oitavas

Freq. central exata	Freq. central nominal	Freq. mínima de banda	Freq. máxima de banda
31,25 Hz	31,5 Hz	22,10 Hz	44,19 Hz
62,5 Hz	63 Hz	44,19 Hz	88,39 Hz
125 Hz	125 Hz	88,39 Hz	176,8 Hz
250 Hz	250 Hz	176,8 Hz	353,6 Hz
500 Hz	500 Hz	353,6 Hz	707,1 Hz
1000 Hz	1000 Hz	707,1 Hz	1414 Hz
2000 Hz	2000 Hz	1414 Hz	2828 Hz
4000 Hz	4000 Hz	2828 Hz	5657 Hz
8000 Hz	8000 Hz	5657 Hz	11314 Hz
16000 Hz	16000 Hz	11314 Hz	22627 Hz

Fonte: Elaborada pelo autor com base em ProAudio (2022).

Tabela 2 – Frequências centrais e limites de bandas em terças de oitavas

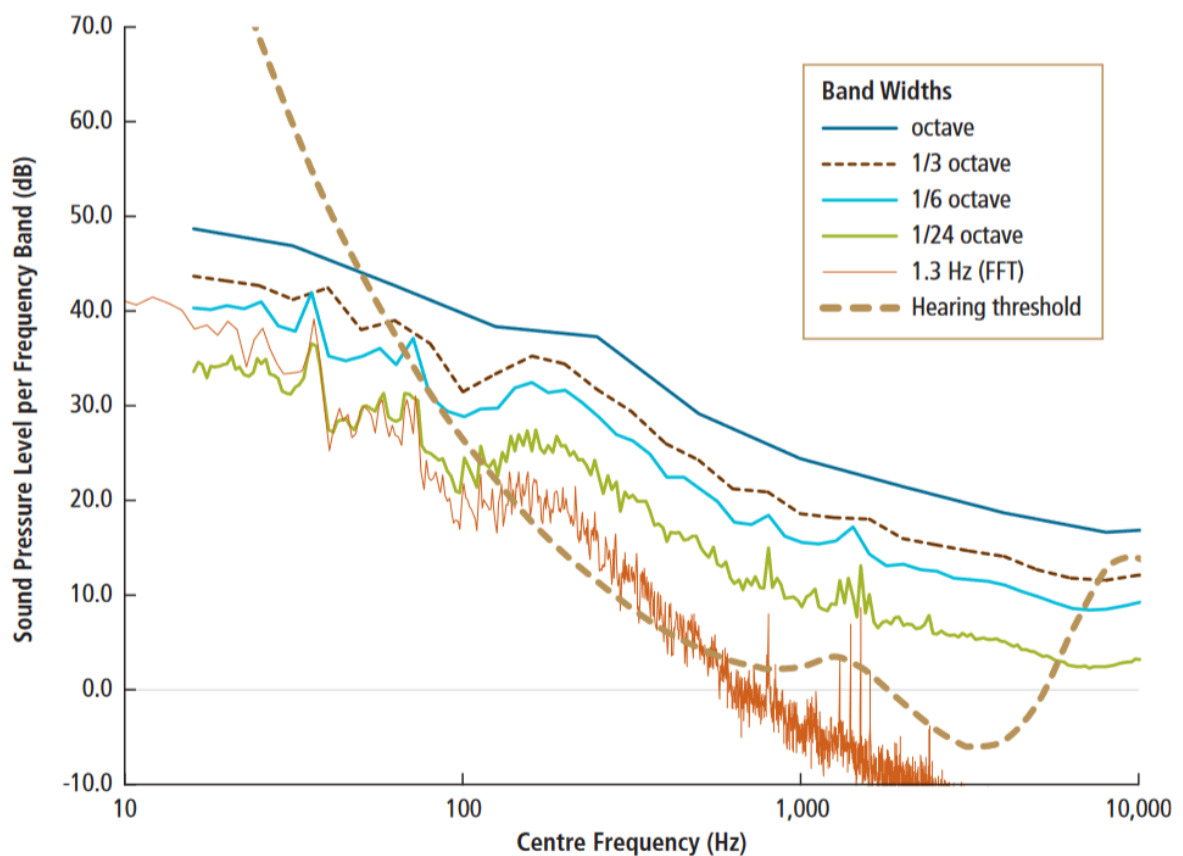
Freq. central exata	Freq. central nominal	Freq. mínima de banda	Freq. máxima de banda
19,69 Hz	20 Hz	17,54 Hz	22,10 Hz
24,80 Hz	25 Hz	22,10 Hz	27,84 Hz
31,25 Hz	31,5 Hz	27,84 Hz	35,08 Hz
39,37 Hz	40 Hz	35,08 Hz	44,19 Hz
49,61 Hz	50 Hz	44,19 Hz	55,68 Hz
62,50 Hz	63 Hz	55,68 Hz	70,15 Hz
78,75 Hz	80 Hz	70,15 Hz	88,39 Hz

Fonte: Elaborada pelo autor com base em ProAudio (2022).

Denota-se tais bandas através de suas frequências centrais; por exemplo, a oitava centrada em 1.000 Hz está compreendida entre as frequências de 707 e 1.414 Hz .

Como destaca o Conselho de Academias Canadenses (CCA, 2015), bandas de frequência mais estreitas, como as de um terço de oitava em comparação com as de uma oitava, permitem uma análise mais detalhada dos componentes de frequência de um som, embora capturem menos energia acústica em cada banda. À medida que um espectro representativo de um sinal é dividido em bandas menores, o nível de pressão sonora em cada uma tende a ser inferior ao das bandas mais largas com a mesma frequência central, conforme ilustrado na Figura 29. Os picos visíveis em um espectro de bandas estreitas indicam possíveis tonais presentes nessas frequências.

Figura 29 – Exemplo de espectro de frequência do som de uma turbina eólica (Madsen and Pedersen, 2010)



Fonte: CCA (2015)

Os espectros apresentados nesta imagem foram gerados a partir do som de uma turbina eólica de 1,3 MW, medida a uma distância de 70 metros. Ao contrário da escala logarítmica utilizada para bandas de oitava, o espectro de 1,3 Hz mantém uma largura consistente ao longo de toda a faixa de frequência, empregando uma técnica de análise conhecida como Transformada Rápida de Fourier (FFT), que fornece dados de alta resolução (CCA, 2015).

Além do espectro audível, é importante mencionar outras faixas de frequência que vão além dos 20 Hz a 20 kHz , como o infrassom (frequências inferiores a 20 Hz) e o ultrassom (frequências superiores a 20 kHz). Embora essas faixas estejam fora da percepção auditiva humana direta, elas têm relevância em diversos contextos industriais, médicos e ambientais. O infrassom, por exemplo, é tema central de diferentes estudos em análises de ruído gerado por grandes turbinas eólicas, que podem produzir frequências muito baixas, às vezes percebidas como vibrações. Já o ultrassom é amplamente utilizado em equipamentos médicos e de inspeção industrial.

2.5.3.1.4 Escalas ponderadas

Para a avaliação de medições de níveis sonoros ao longo do espectro de frequência, é essencial focar em aspectos específicos dos dados, de acordo com os objetivos do estudo. Isso requer a aplicação de filtros ponderados, que priorizam determinadas frequências e tempos de resposta para adequar a análise às características sonoras mais relevantes.

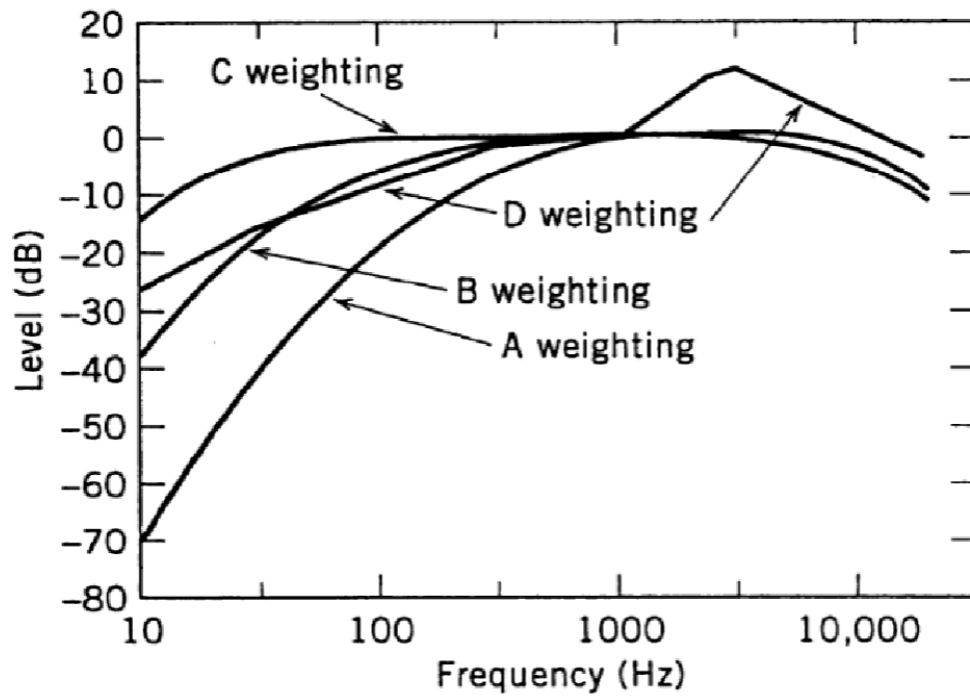
As ponderações em frequência e em tempo são amplamente utilizadas para ajustar a resposta dos instrumentos de medição. A ponderação temporal regula o tempo de resposta: a ponderação "F" (0,125 s) é usada para sons de rápida variação, enquanto a ponderação "S" (1 s) é aplicada a sinais mais estáveis.

No caso das ponderações em frequência, o ajuste é feito para refletir a sensibilidade auditiva humana. A escala ponderada "A" é a mais comum, já que ela corrige os dados para refletir como os humanos percebem diferentes frequências, sendo menos sensível a sons de baixa frequência. Entretanto, essa escala não reflete a intensidade sonora real, mas sim a percepção subjetiva. Outras escalas, como as "B", "C", "D" e "Z", são aplicadas em contextos específicos: a ponderação "Z", por exemplo, não realiza ajustes e reflete os níveis de pressão sonora reais.

As Figuras 30 e 31 ilustram as correções aplicadas pelas escalas de ponderação ao longo do espectro de frequência. Nessas curvas, valores negativos indicam menor sensibilidade acústica, enquanto valores positivos correspondem a frequências onde o som é mais facilmente percebido.

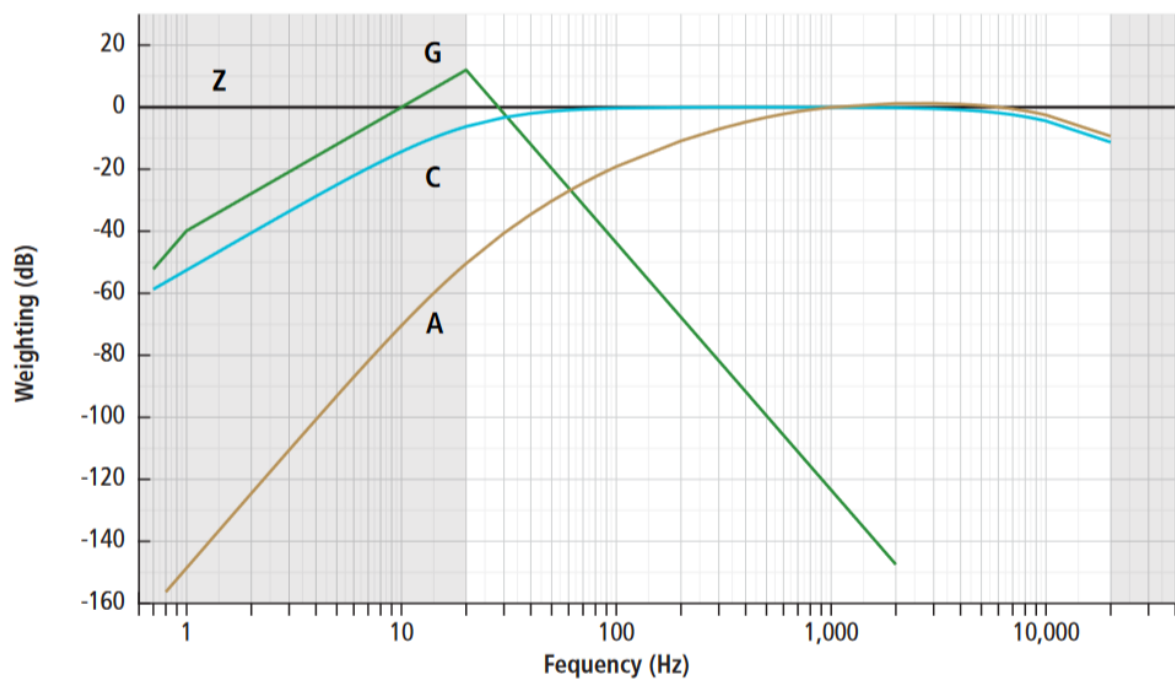
As escalas ponderadas mostram menor sensibilidade a frequências baixas, especialmente no caso da ponderação "A", que reflete a resposta natural do ouvido humano. Com isso, entende-se que sons de baixa frequência, ainda que tenham a mesma pressão sonora de sons de alta frequência, são percebidos de forma menos intensa em comparação a sons em uma faixa de frequências mais intermediária, por exemplo, entre 600 Hz e 10 kHz .

Figura 30 – Escalas ponderadas de frequência, segundo Jacobsen *et al.* (2011)



Fonte: Jacobsen *et al.* (2011)

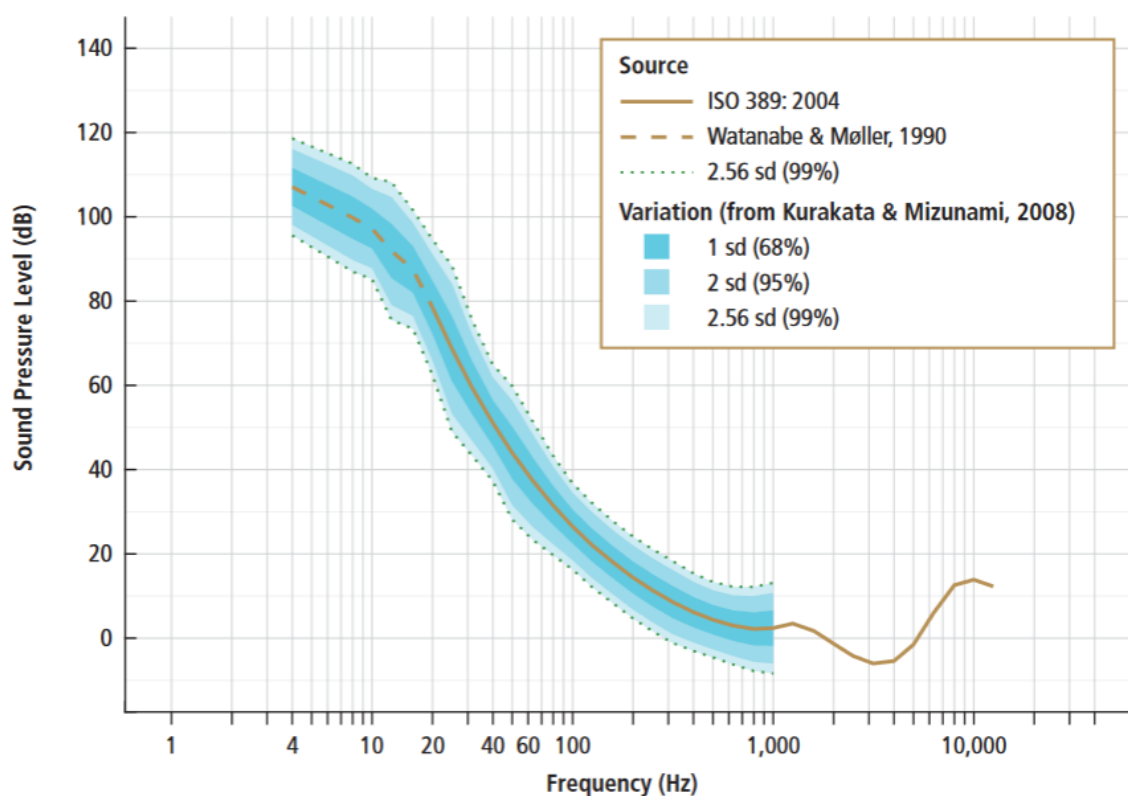
Figura 31 – Escalas ponderadas de frequência (IEC 61672:2003 - Escalas A e C; IEC 7196:1995 - Escala G)



Fonte: CCA (2015)

A Figura 32 apresenta os limiares da audição humana ao longo do espectro de frequência, os quais podem ser interpretados como uma inversão da curva de ponderação "A". Essa abordagem justifica a aplicação de correções para representar de maneira mais precisa a percepção auditiva. É importante destacar que os limiares auditivos apresentados são baseados em medições realizadas com tons puros e variam entre os indivíduos, refletindo uma média padronizada da população. Assim, componentes de frequência acima dessa linha não são necessariamente audíveis, assim como aqueles situados logo abaixo dela não são automaticamente inaudíveis (Tachibana *et al.*, 2014).

Figura 32 – Limiares da audição humana (ISO 389:2004; Watanabe e Møller, 1990; Kurakata e Mizunami, 2008)



Fonte: CCA (2015)

O uso de filtros ponderados requer análise cuidadosa, pois a aplicação de ponderações pode introduzir vieses, priorizando certas frequências em detrimento de outras. A escolha da ponderação apropriada depende das características a serem destacadas na análise, já que diferentes ponderações influenciam a interpretação dos resultados. Enquanto a escala A é indicada para avaliar impactos de natureza humana, ela pode distorcer análises focadas em exposições a infrassom, levando a dados de medição irrelevantes. Nesses casos, filtros como o tipo G ou, para uma análise mais abrangente ao longo do espectro, o filtro C são alternativas adequadas.

2.5.3.1.5 Tipos sonoros

A caracterização precisa dos diferentes tipos de som é fundamental para a análise acústica, seja para fins de monitoramento ambiental, controle de ruído ou impactos na saúde humana. A NBR 16313 (ABNT, 2014) estabelece uma terminologia técnica detalhada para classificar sons, o que facilita a identificação de características acústicas e a aplicação de metodologias adequadas de medição e análise. As principais designações de som estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Principais designações de som

Termo	Definição
Som Total	Som existente em uma dada situação e instante, resultante da contribuição de todas as fontes sonoras.
Som Específico	Parcela do som total que pode ser identificada e associada a uma determinada fonte.
Som Residual ¹	Som remanescente do som total em uma dada posição e situação quando são suprimidos os sons específicos em consideração.
Som Intrusivo	Interferência sonora alheia ao objeto de medição.
Som Impulsivo	Som caracterizado por impulsos de pressão sonora com duração inferior a 1 s.
Som Intermitente	Som que ocorre em intervalos de tempo, regulares ou não, com duração superior a 1 s.
Som Contínuo	Som presente durante todo o período de observação e que não é intermitente nem impulsivo.
Som Tonal	Som caracterizado por uma única componente de frequência ou por componentes de banda estreita que se destacam em relação às demais.

Fonte: Elaborada pelo autor com base na ABNT 16313.

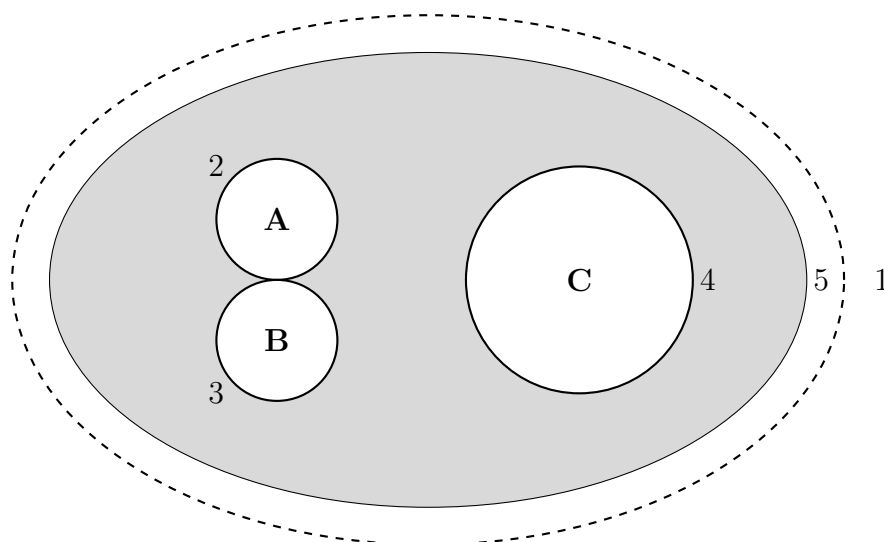
Nota: 1. O menor nível de som residual é obtido quando todos os sons específicos são suprimidos.

A distinção entre os conceitos de som total, específico e residual pode ser visualizada por meio da Figura 33, que ilustra dois cenários de sons específicos e suas respectivas influências no som residual. Neles, são visualizadas três fontes de sons específicos: "A", "B" e "C". A eliminação dessas fontes gera diferentes cenários de som residual. No primeiro diagrama, todos os sons específicos são eliminados, enquanto no segundo, apenas "A" e "B" são suprimidos, deixando "C" como parte do som residual.

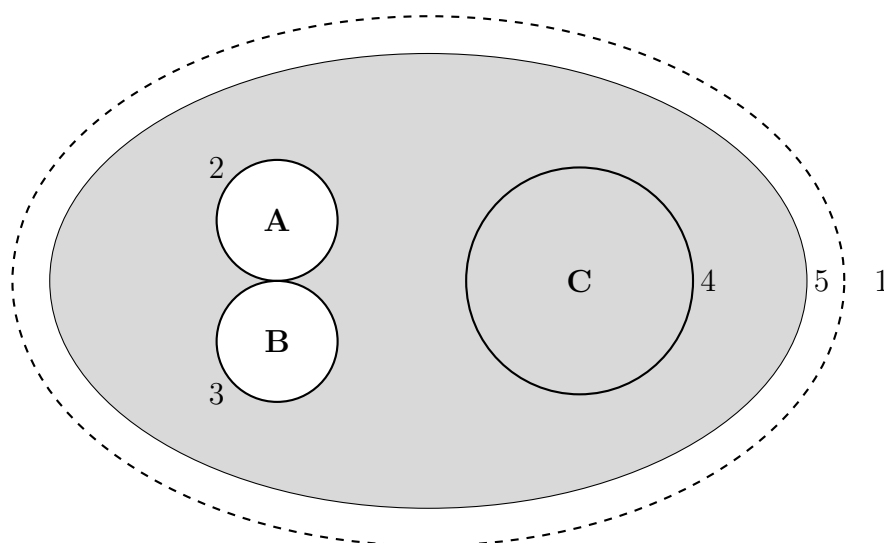
O conceito de som específico também está relacionado à métrica de "nível sonoro corrigido", definida pela ABNT (2014) como qualquer nível sonoro medido ou calculado com a adição de uma correção, seja ela constante ou variável. Essa designação é normalmente atribuída ao verificar, em termos relativos, qual seria a real contribuição de um som específico frente ao nível do som residual no ambiente (IEC, 2012).

Figura 33 – Designações de sons total, específico e residual (ISO 1996-1:2003)

a) Três sons específicos em consideração, som residual e som total



b) Dois sons específicos em consideração, som residual e som total



Legenda

- 1: som total
- 2: som específico A
- 3: som específico B
- 4: som específico C
- 5: som residual

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 16313 (ABNT, 2014).

Nota: 1. O menor nível de som residual é obtido quando todos os sons específicos são suprimidos.
2. Na primeira figura, a área sombreada indica o som residual quando os sons específicos A, B e C são suprimidos.
3. Na segunda figura, o som residual inclui o som específico C, dado que este não se encontra em consideração.

Em complemento às definições apresentadas no Quadro 3, exemplos específicos ajudam a diferenciar os tipos de ruído. Um som intrusivo, por exemplo, pode ser um ruído inesperado que interfere na medição de um som específico, como o barulho de um carro em uma medição ao ar livre. Já um som impulsivo, caracterizado por picos de pressão sonora de curta duração, pode ser exemplificado pelo som de uma explosão ou de batidas de martelo. Sons intermitentes, como o de uma sirene ou de uma máquina que liga e desliga periodicamente, apresentam variações que podem ser regulares no tempo, enquanto o som contínuo, como o ruído constante de uma turbina eólica, mantém-se ininterrupto por longos períodos. Por fim, o som tonal destaca-se por uma ou mais frequências dominantes, como o zumbido emitido por um transformador ou ventilador.

Outras classificações relevantes incluem o ruído de banda larga e a modulação em amplitude. Ruídos de banda larga são sons compostos por uma ampla gama de frequências, sem predominância de uma específica. Exemplos incluem o som do vento nas árvores ou o ruído do mar. Ao contrário de sons tonais, os ruídos de banda larga são difusos e frequentemente percebidos como "ruído branco", som constante e suave que contém todas as frequências audíveis distribuídas de maneira uniforme.

Um som com modulação em amplitude ocorre quando sua intensidade varia periodicamente, muitas vezes causada por interações com o ambiente, como o vento ou obstáculos. Diferente de um som impulsivo, que é abrupto e de curta duração, a modulação em amplitude resulta em um som pulsante, com flutuações mais suaves e contínuas. Embora seja menos pronunciada que os picos de um som impulsivo, a modulação em amplitude pode causar desconforto auditivo dependendo da intensidade e da frequência dessas variações. Essas flutuações podem ser avaliadas com técnicas como análise de espectro temporal.

Essas classificações são fundamentais para definir a metodologia correta de medição e análise de ruídos em diferentes ambientes, sejam urbanos, industriais ou naturais. Além disso, são úteis na identificação de sons prejudiciais à saúde, como os sons impulsivos e intermitentes, que podem causar desconforto ou danos auditivos se não forem adequadamente controlados.

2.5.3.2 Parâmetros de medição sonora

2.5.3.2.1 Níveis de pressão sonora (spl - *sound pressure level*)

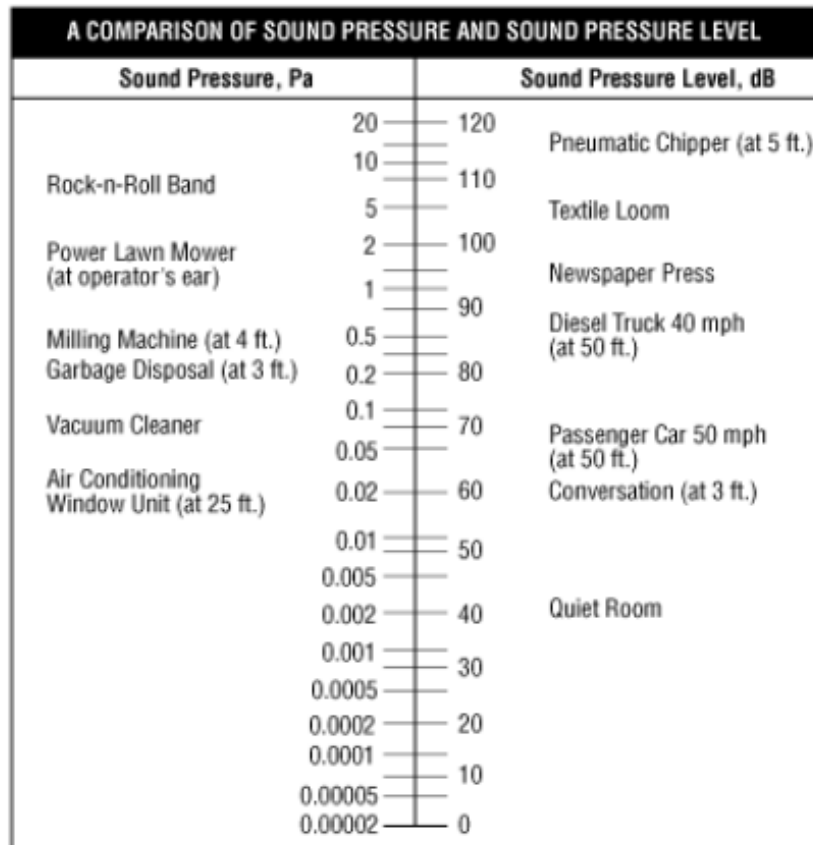
Como mencionado anteriormente, o som resulta de perturbações na pressão do ambiente, o que justifica associar essa variável a uma escala de nível sonoro. A pressão sonora, relacionada à variação da pressão do ar, é expressa em Pascal (Pa) e é fundamental para a análise acústica, pois afeta a percepção sonora em diferentes ambientes (ABNT, 2014). O nível sonoro associado a essa grandeza, denominado "nível de pressão sonora" (*sound pressure level* - spl), é o principal parâmetro nos estudos acústicos.

O nível de pressão sonora é uma medida logarítmica da pressão sonora em relação a um valor de referência, geralmente $20 \mu Pa$, que corresponde ao limiar de audição para a maioria dos humanos. Este parâmetro representa a percepção acústica de um indivíduo em determinada localidade, considerando as diferentes fontes sonoras presentes. A grandeza, no entanto, depende das características físicas do ambiente, incluindo a distância da fonte sonora, as propriedades do meio de propagação e a presença de barreiras ou superfícies refletoras.

Além de sua medição pontual, o nível de pressão sonora pode ser avaliado em diferentes faixas de frequência, geralmente organizadas em bandas de oitavas ou terços de oitavas, para fornecer uma análise mais detalhada da composição espectral do som.

A Figura 34 ilustra a relação entre a pressão sonora (em Pascal) e o nível de pressão sonora (em decibel), utilizando exemplos de fontes sonoras comuns. A faixa de pressão sonora varia de $2 \times 10^{-5} Pa$ a $20 Pa$, correspondendo a níveis de pressão sonora entre $0 dB$ e $120 dB$. A imagem também evidencia as distâncias associadas às medições, mostrando a relação entre a distância da fonte sonora e a intensidade do som percebido.

Figura 34 – Comparação entre nível de pressão sonora e pressão sonora



O "ponto de medição" — onde o microfone do instrumento acústico é posicionado (ABNT, 2014) — é crucial para definir a verdadeira intensidade percebida por um dado ouvinte em determinada posição. Logo, para realizar a medição do nível de pressão sonora, a posição do microfone acústico deve ser estrategicamente definida para garantir que os resultados representem fielmente o local analisado.

Além disso, o planejamento das medições sonoras inclui a escolha de intervalos de tempo adequados para caracterizar corretamente o ruído. O Quadro 4 descreve os principais intervalos de tempo usados nessas medições.

Quadro 4 – Principais designações de tempo

Termo	Definição
Tempo de integração	Tempo durante o qual é efetuada a integração do nível sonoro.
Tempo de medição	Tempo correspondente à soma dos tempos de integração durante uma medição.

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 16313 (ABNT, 2014).

Fontes bibliográficas que pertencem ao escopo da análise sonora costumam utilizar níveis de pressão sonora equivalentes para suas análises. Esses níveis representam a média da energia acústica ao longo de um intervalo de tempo, que pode variar de frações de segundo até dias inteiros, conhecido como "tempo de integração".

O Quadro 5 descreve as equações utilizadas para calcular as principais grandezas relacionadas aos níveis de pressão sonora. Nessa tabela, p representa a pressão sonora medida em um instante de tempo, e T refere-se ao tempo de integração relacionado à medição equivalente. Vale destacar que, em muitos casos, os instrumentos acústicos modernos realizam essas medições de forma automatizada, dispensando cálculos manuais.

Quadro 5 – Equações referentes aos principais parâmetros de níveis de pressão sonora

Termo	Equação associada
Nível de pressão sonora ¹	$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (\text{dB})$
Nível de pressão sonora contínuo equivalente	$L_{\text{eq},T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (\text{dB})$
Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A ^{2,3,4}	$L_{A\text{eq},T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (\text{dB})$

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 16313 (ABNT, 2014).

Nota: 1. A pressão sonora de referência, p_0 , é usualmente adotada como $20 \mu\text{Pa}$.

2. Se for aplicada uma ponderação em frequência, como especificado na IEC 61672-1, ou no caso de uma banda de frequência específica, a indicação é feita pelo subscrito apropriado. Por exemplo, L_A expressa um valor de nível de pressão sonora ponderado em “A”.

3. A IEC 61672-1 estabelece as ponderações nas frequências A, C e Z e, no tempo, F (0,125 s) e S (1 s).

4. Adaptado da ISO 1996-1:2003.

2.5.3.2.2 Níveis de potência sonora (SPL - *Sound Power Level*)

Conforme mencionado na Seção 2.5.2, o fenômeno acústico envolve três agentes principais: a fonte, o meio de propagação e o receptor. Esses agentes interagem de maneira interdependente, o que torna difícil isolar a contribuição específica de cada um sem o auxílio de métodos avançados de controle. Uma abordagem indireta, porém amplamente utilizada para quantificar a contribuição sonora de uma fonte específica, é a medição do nível de potência sonora (*Sound Power Level* - SPL, também denominado por SWL em algumas literaturas).

O nível de potência sonora, também denominado por nível de potência sonora aparente, se refere à quantidade total de energia acústica emitida por uma fonte por unidade de tempo, sendo uma medida intrínseca da capacidade de uma fonte gerar som. Assim como o nível de pressão sonora, esse parâmetro também é expresso em decibel (dB), porém, ao contrário do nível de pressão, ele é independente de variáveis como a distância entre a fonte e o receptor, a presença de outras fontes sonoras ou as características do meio de propagação. Isso torna o nível de potência sonora um parâmetro de referência fundamental para comparações objetivas de ruído emitido por diferentes equipamentos, independentemente do ambiente onde se encontram.

Em ambientes industriais, a obtenção do nível de potência sonora geralmente é realizada de forma indireta, a partir de medições do nível de pressão sonora. Esses dados são processados de acordo com normas como a ISO 3746 (ISO, 2010) e a IEC 61400-11 (IEC, 2012), que estabelecem metodologias padronizadas para a conversão de níveis de pressão sonora em potência sonora. Essas normas também recomendam que as medições sejam feitas em condições controladas ou com ajustes que permitam minimizar as variáveis externas. Tipicamente, o SWL é padronizado para uma distância de referência de um metro (1 *m*) da fonte sonora, possibilitando assim a comparação direta entre diferentes equipamentos e situações operacionais.

O nível de potência sonora padronizado é um parâmetro essencial para avaliações de conformidade em relação a normas de ruído ocupacional, além de ser uma ferramenta vital no processo de seleção de equipamentos, auxiliando na escolha de dispositivos que atendam aos requisitos de controle de ruído e ao conforto acústico de ambientes industriais e urbanos.

2.5.4 Normas acústicas e limitações técnicas

2.5.4.1 Principais normas e contextualização

As normas acústicas são cruciais para regular o ruído e estabelecer métodos precisos de medição, garantindo saúde e conforto. Instituições como a Organização Internacional de Normalização (ISO) e a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), juntamente com a Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), fornecem diretrizes para medir os níveis de pressão e potência sonora em diversos contextos.

Normas internacionais, como a ISO 3746 (ISO, 2010), que orienta medições de ruído de máquinas, e a ISO 1996-1 (ISO, 2016), voltada ao ruído ambiental, desempenham papéis críticos. No Brasil, a NBR 10151 (ABNT, 2019) regula os níveis de pressão sonora em áreas urbanas e rurais, enquanto a NBR 10152 (ABNT, 2017) foca no conforto acústico de ambientes internos, como residências e escritórios. Essas normas oferecem uma base técnica para a fiscalização e medidas mitigadoras de ruído em diferentes ambientes.

2.5.4.2 Normas para instrumentos de medição e calibração

A precisão das medições acústicas depende da qualidade dos instrumentos utilizados, que devem seguir normas específicas para assegurar a confiabilidade. Os instrumentos de medição sonora - também chamados de sonômetros, por exemplo, são regulamentados pela IEC 61672 (IEC, 2013), que estabelece requisitos de desempenho para medições em ambientes industriais e ambientais, classificando-os em classe 1 e classe 2.

Para medições rigorosas, como ruído de turbinas eólicas, recomenda-se o uso de sonômetros de classe 1, que cobrem uma faixa de frequências mais ampla (16 Hz a 16 kHz) e operam em temperaturas de $-10^{\circ}C$ a $50^{\circ}C$. Por outro lado, os sonômetros de classe 2 têm uma faixa de frequências mais restrita (20 Hz a 8 kHz) e operam em um intervalo de temperaturas entre $0^{\circ}C$ e $40^{\circ}C$, sendo mais adequados para ambientes internos e medições menos exigentes.

A calibração dos instrumentos é crucial para manter a precisão, sendo realizada com um calibrador de som, como o especificado na IEC 60942 (IEC, 2017), para garantir que o equipamento esteja ajustado aos níveis de pressão sonora corretos. A calibração é recomendada antes e após cada série de medições, especialmente em estudos de longa duração, e deve ser verificada em laboratório com certa regularidade.

A combinação dessas normas oferece uma base sólida para garantir que os resultados sejam confiáveis e reproduzíveis, principalmente em condições ambientais desafiadoras.

2.5.4.3 Métodos de medição e controle acústico

Diversos métodos de medição acústica são prescritos nas normas, dependendo do tipo de fonte de ruído e do contexto. Como comentado nos tópicos 2.5.3.1.4 e 2.5.3.2.1, a ponderação de frequência "A" é amplamente utilizada por refletir melhor a percepção humana. Já a ponderação "Z" é aplicada em certas medições de ruído específico. Entre os parâmetros de medição mais comuns está o nível de pressão sonora equivalente (L_{Aeq}), que representa um valor médio ponderado ao longo do tempo, particularmente relevante para ruídos contínuos. As normas também consideram ponderações temporais "F" (Fast) e "S" (Slow), de acordo com as características do ruído.

O Quadro 6 exemplifica as grandezas acústicas utilizadas conforme a NBR 10151 (ABNT, 2019).

Quadro 6 – Símbolos para níveis de pressão sonora

Grandeza	Símbolo
Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A e integrado em um intervalo de tempo T	$L_{Aeq,T}$
Nível máximo de pressão sonora ponderado em A e em F	L_{AFmax}
Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em Z, em banda proporcional de frequência nominal f Hz, de oitava e integrado em um intervalo de tempo T	$L_{Zeq,T,f,Hz(1/1)}$
Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em Z, em banda proporcional de frequência nominal f Hz, de 1/3 de oitava e integrado em um intervalo de tempo T	$L_{Zeq,T,f,Hz(1/3)}$
Exemplos de Notação	
$L_{Aeq,30s} = 45,6 \text{ dB}$, quando $T = 30 \text{ s}$ $L_{AFmax} = 45,6 \text{ dB}$ $L_{Zeq,30s,8kHz(1/1)} = 45,6 \text{ dB}$, onde $f = 8 \text{ kHz}$ em banda de 1/1 de oitava e $T = 30 \text{ s}$ $L_{Zeq,30s,8kHz(1/3)} = 45,6 \text{ dB}$, onde $f = 8 \text{ kHz}$ em banda de 1/3 de oitava e $T = 30 \text{ s}$	

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 10151 (ABNT, 2019).

Tomando como exemplo essa documentação, sua metodologia padrão envolve a análise de eventos tonais presentes em uma medição sonora. A abordagem utiliza o nível de pressão sonora equivalente em ponderação "Z" para cada banda em terça de oitava, verificando se os valores de uma banda específica excedem os das bandas adjacentes acima de um critério limite.

Em situações corriqueiras, o uso do nível de pressão sonora em seu valor único (estatístico) é o mais aplicável, sendo este avaliado conforme o contexto. A NBR 10151 define limites de níveis sonoros específicos para diferentes zonas (residenciais, comerciais e industriais), considerando tanto o período do dia quanto o uso do solo, como ilustrado no Quadro 7.

Quadro 7 – 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 (dB)	
	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 administrativas	60	55
Área mista com predominância de atividades culturais, lazer e turismo	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: Elaborada pelo autor com base na NBR 10151 (ABNT, 2019).

Os limites de níveis sonoros (RL_{Aeq}) são comparados aos valores obtidos de nível de pressão sonora equivalente em escala "A", considerando um período integrativo representativo. Eventos completos ou exposições prolongadas são utilizados como base. Em certas situações, fatores punitivos podem ser aplicados ao valor medido, como quando são detectadas características tonais ou impulsivas, adicionando-se 5 *dB* ao nível de ruído para compensar o maior impacto percebido.

No caso específico de turbinas eólicas, a norma IEC 61400-11 (IEC, 2012) estabelece métodos padronizados para a medição de ruído acústico, garantindo consistência nos dados, independentemente das condições meteorológicas ou de operação. A aplicação dessa norma é essencial para assegurar que os ruídos gerados por turbinas eólicas, sejam eles tonais ou de banda larga, fiquem dentro dos limites aceitáveis, minimizando o impacto em áreas urbanas e rurais.

A adoção dessas normas garante que os níveis de ruído sejam adequadamente controlados, permitindo que medidas corretivas sejam implementadas caso os limites sejam excedidos. Esses limites não são apenas números; representam o compromisso com a qualidade de vida das pessoas que residem perto de fontes de ruído. Por isso, engenheiros e profissionais da acústica devem integrar essas diretrizes em seus projetos e avaliações de impacto.

2.5.4.4 Impacto social e sustentabilidade

O cumprimento das normas acústicas é vital para mitigar os efeitos nocivos do ruído sobre a saúde e o bem-estar da população. No Brasil, a NBR 10151 (ABNT, 2019) e a NBR 10152 (ABNT, 2017) são frequentemente incorporadas às legislações municipais, como na Lei do Silêncio, regulando os níveis de ruído em áreas habitadas. Essas normas servem como base técnica para investigações e sanções legais, protegendo as comunidades de níveis excessivos de ruído.

Além de proteger a saúde, as normas acústicas promovem práticas industriais mais responsáveis. A incorporação de soluções de controle de ruído, tanto em projetos novos quanto em instalações existentes, minimiza os impactos adversos nas comunidades locais e no meio ambiente. Dessa forma, as normas acústicas não apenas definem limites técnicos para medição e controle do ruído, mas também promovem a sustentabilidade e a qualidade de vida, contribuindo para o bem-estar da sociedade e a preservação ambiental.

2.6 Ruídos dos aerogeradores

2.6.1 Descrição do padrão acústico de geradores eólicos

2.6.1.1 Importância do ruído na indústria eólica

Historicamente, o ruído tem representado um desafio significativo para a indústria de energia eólica. Nos anos 1980, os primeiros aerogeradores modernos eram notoriamente barulhentos, emitindo sons audíveis a mais de um quilômetro de distância, o que causava incômodos consideráveis nas comunidades vizinhas. Esse problema foi prontamente reconhecido pela indústria, que iniciou esforços para mitigar o ruído, especialmente na Europa, onde as turbinas frequentemente estão localizadas perto de áreas residenciais (AWEA, 2000).

Com a expansão global da energia eólica, a questão do ruído tornou-se ainda mais pertinente. Embora os avanços tecnológicos tenham reduzido consideravelmente o ruído gerado pelas turbinas ao longo dos anos, essa preocupação persiste, particularmente em áreas rurais, onde o silêncio é um valor apreciado. Comunidades próximas a parques eólicos frequentemente relatam desconforto devido ao ruído contínuo das turbinas, associando-o a distúrbios do sono, estresse e até problemas de saúde mental.

2.6.1.2 Tipos de ruído gerados por turbinas eólicas

O ruído produzido por aerogeradores pode ser classificado com base em sua origem e características. O tipo mais comum é o ruído de banda larga, que corresponde ao som contínuo emitido durante a operação normal das turbinas. Em alguns casos, ocorre o ruído tonal, geralmente associado a problemas mecânicos ou aerodinâmicos específicos (AWEA, 2000). Além disso, pesquisas recentes têm se concentrado no fenômeno da modulação de amplitude, caracterizado por variações rítmicas na intensidade do som ao longo do tempo, resultando em sons que podem ser descritos como um “assobio” ou “batida”, dependendo das frequências sonoras predominantes (CCA, 2015).

2.6.1.3 Níveis sonoros de geradores eólicos e comparação com outras fontes de ruído

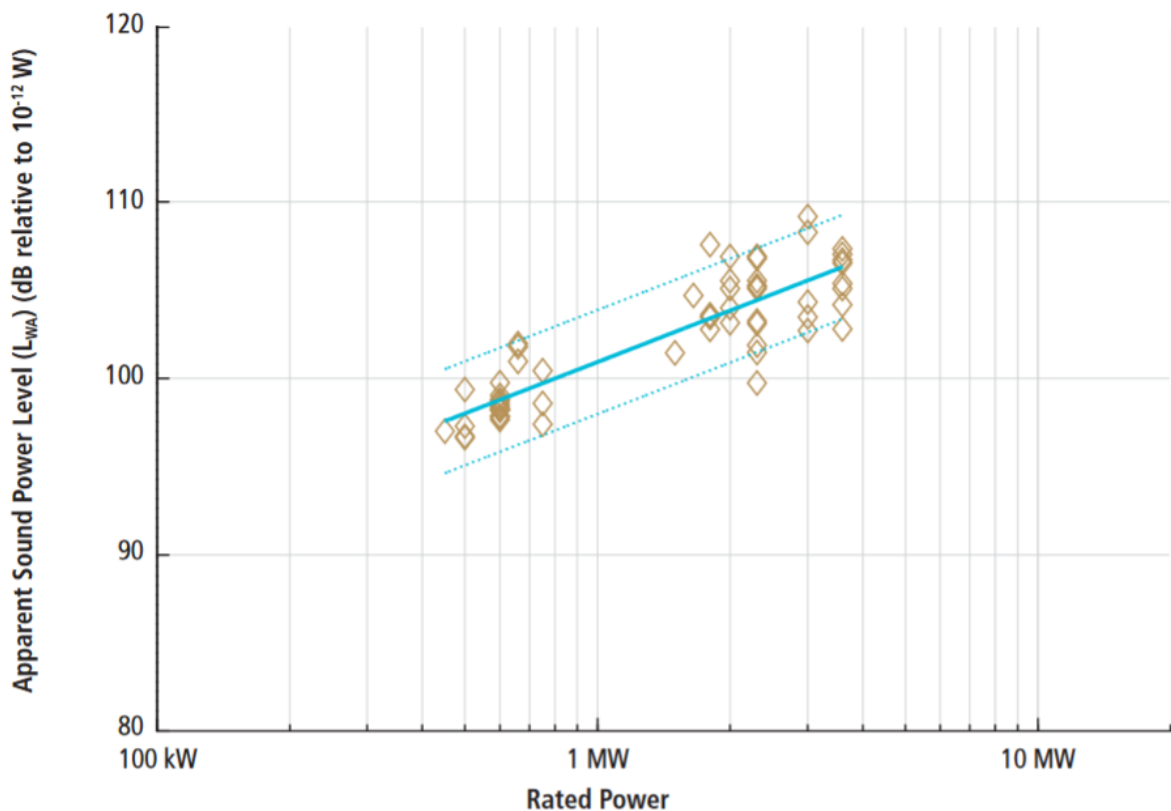
Os níveis de ruído emitidos pelas turbinas variam de acordo com o tamanho e a localização das unidades. Em geral, turbinas eólicas bem projetadas operam de maneira relativamente silenciosa em comparação com outras fontes de ruído, como tráfego rodoviário, ferrovias e aeronaves. No entanto, parques eólicos são frequentemente instalados em áreas rurais, onde o ruído de fundo tende a ser significativamente menor do que em regiões urbanas. Essa diferença de ambiente acústico pode tornar o som das turbinas mais perceptível para as comunidades locais (AWEA, 2000).

Diversas fontes indicam que, durante a operação normal, turbinas eólicas produzem níveis de pressão sonora entre 40 e 45 *dB* a uma distância de aproximadamente 300 metros,

considerada a distância mínima segura para a proximidade de residências - por exemplo, Electric (2023) e Energy (2023b).

Em relação ao nível de potência sonora aparente, a publicação do Conselho de Academias Canadenses (CCA, 2015) apresenta valores típicos para turbinas eólicas modernas, baseados em dados de 61 modelos operando a uma velocidade de vento de aproximadamente 8 m/s . Uma regressão linear com 90 % de confiabilidade foi realizada para estimar o nível de potência sonora em função da potência nominal de cada turbina, conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35 – Níveis de potência sonora de turbinas eólicas em função de suas potências nominais (Møller and Pedersen, 2011; Møller et al., 2011)



Fonte: CCA (2015)

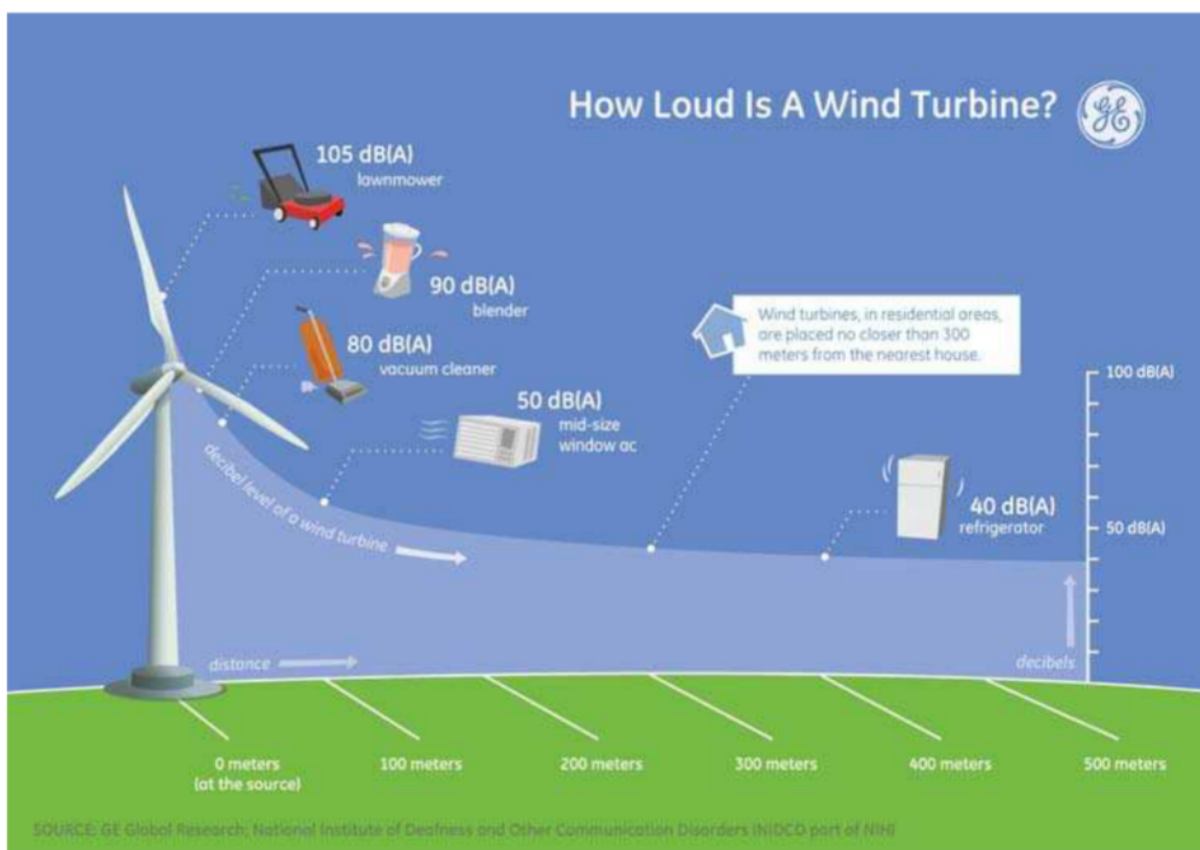
Portanto, turbinas menores, com potências nominais entre 500 kW e 1 MW , emitem níveis de potência sonora entre 97 dB e 102 dB , enquanto turbinas maiores geram níveis entre 99 dB e 110 dB . A relação entre a potência elétrica gerada e a produção acústica pode ser explicada pelo fato de que turbinas de maior potência geralmente possuem pás maiores, resultando em velocidades de vento mais altas nas extremidades, o que, como será discutido na subseção 2.6.2, está associado a níveis acústicos mais elevados.

Os níveis de potência sonora encontrados permitem estimar indiretamente os níveis

de pressão sonora, usando a metodologia da Equação 26 da norma IEC 61400-11 (IEC, 2012). Ao inverter a relação entre nível de potência sonora e distância, obtém-se níveis de pressão sonora entre 42 e 48 dB para turbinas menores e entre 44 e 56 dB para turbinas maiores, a 300 metros de distância. Esses resultados são consistentes com dados de outras fontes literárias.

A Figura 36 ilustra a evolução dos níveis de pressão sonora de uma turbina eólica à medida que a distância em relação à fonte aumenta. A imagem compara o som da turbina com o de equipamentos e situações cotidianas, oferecendo uma interpretação didática dos dados (Cummings, 2012). Embora a comparação direta entre níveis de pressão sonora e potência sonora tenha limitações técnicas, ela fornece uma perspectiva prática da percepção do ruído.

Figura 36 – Quão barulhenta é uma turbina eólica? (GE Global Research; National Institute of Deafness and Other Communication Disorders - NIDCD part of NIH)



Fonte: Cummings (2012)

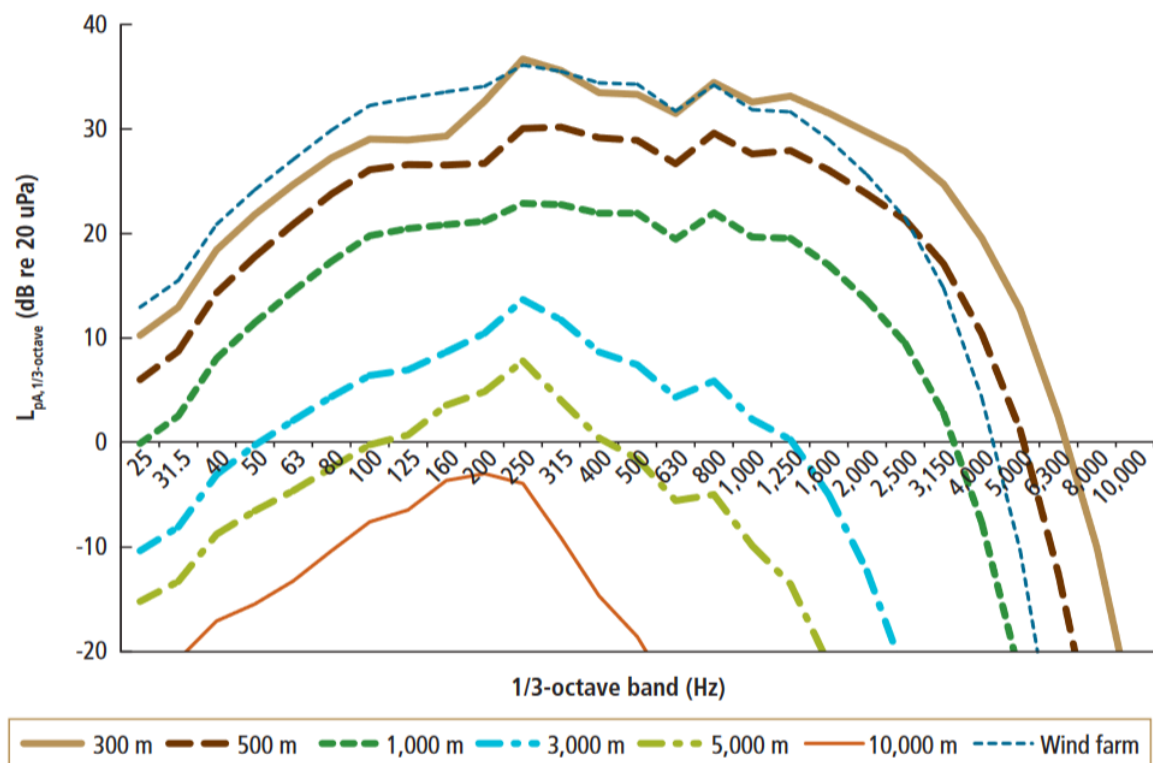
Considerando os níveis para a distância mínima padronizada - de 300 metros da fonte, o som associado às turbinas eólicas é comparável ao ruído de um refrigerador e de um ar-condicionado de médio porte, conforme os exemplos ilustrados na imagem.

2.6.1.4 Distribuição sonora ao longo do espectro de frequências

O ruído das turbinas eólicas, por apresentar um comportamento típico de banda larga, se distribui ao longo de diferentes frequências. Contudo, a propagação sonora para frequências audíveis gera um impacto variável, dependendo da distância e das condições atmosféricas locais.

A Figura 37 exibe curvas de ruído de uma turbina eólica típica, avaliadas em diferentes distâncias do receptor, com espectros de frequências em terças de oitava e aplicando ponderação do tipo “A”. Esses espectros foram obtidos a partir de um modelo Nord2000, com altura de cubo de 90 metros, operando em terreno agrícola plano com vento a 8 m/s, utilizando um nível de pressão sonora de referência de 45 dB medido a 300 metros da turbina, representado pela linha sólida espessa na imagem. A linha pontilhada rotulada como “Wind farm” representa o cenário de um parque eólico com múltiplas turbinas, também com o nível de 45 dB (CCA, 2015).

Figura 37 – Espectros sonoros previstos em várias distâncias de uma turbina eólica (Søndergaard, 2011; Multi-Science Publishing Company)



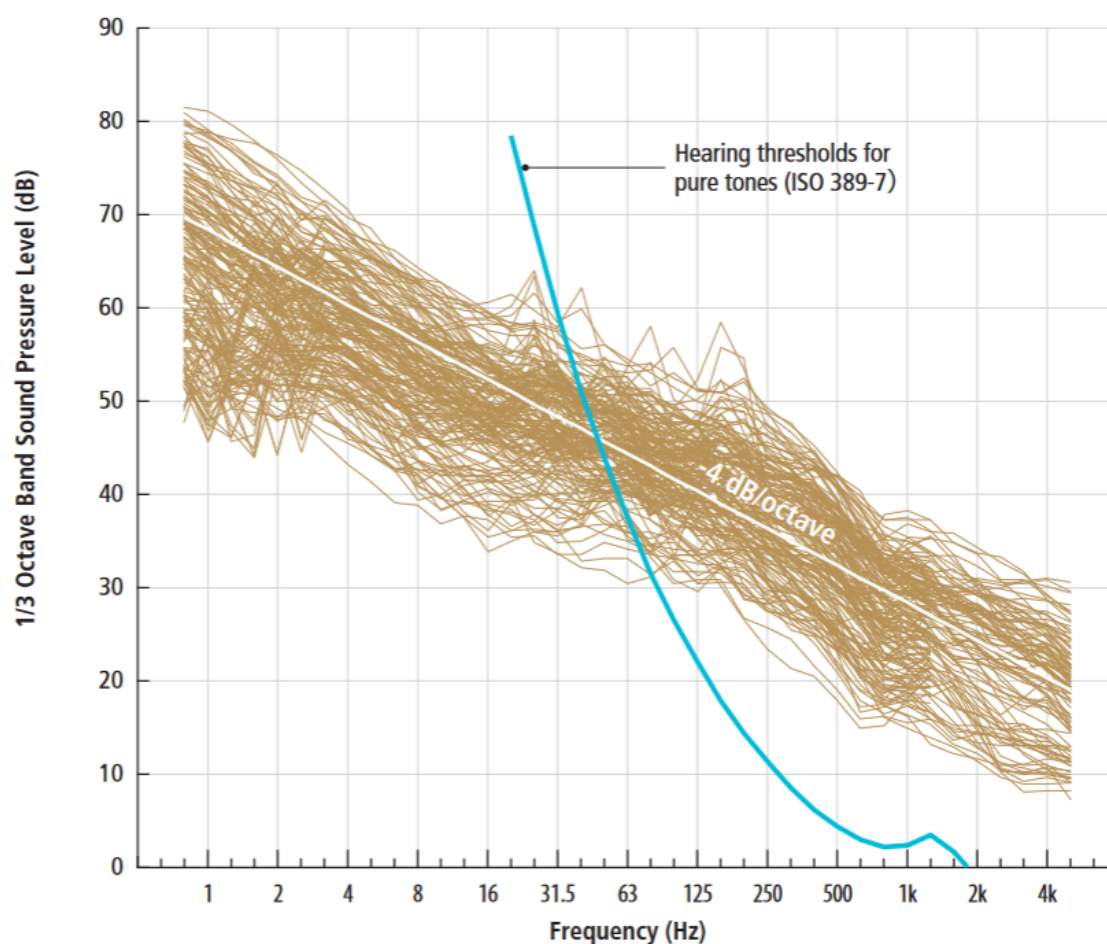
Fonte: CCA (2015)

Na imagem, observa-se que, além do padrão típico de banda larga nos sons emitidos pela turbina, o aumento da distância resulta no deslocamento das frequências dominantes para valores mais baixos e em uma redução geral do nível de pressão sonora. No entanto,

conforme discutido na subseção 2.5.3, a sensibilidade acústica humana às frequências baixas torna a análise de ruídos, especialmente em frequências inferiores a 250 Hz , uma tarefa complexa.

Medições realizadas por Tachibana *et al.* (2014) em 29 instalações eólicas, com distâncias variando entre 100 e 1.000 metros, mostram uma tendência de atenuação sonora à medida que a frequência aumenta. Os dados apresentados na Figura 38 correspondem aos níveis de pressão sonora verificados utilizando uma escala ponderada "Z", sem correções nos valores medidos. Observa-se que a maior parte da energia sonora está concentrada nas baixas frequências e na região de infrassons, abaixo de 250 *Hz*. A cada nova oitava atingida, há uma diminuição média de cerca de 4 *dB*. Além disso, picos de pressão sonora foram identificados em frequências inferiores a 250 *Hz*, sugerindo a presença de componentes tonais. Contudo, na faixa do infrassom (abaixo de 20 *Hz*), os níveis de pressão sonora permanecem abaixo do limiar auditivo humano, tornando-se inaudíveis em condições normais. A partir de 30 *Hz*, embora os níveis sonoros apresentem uma queda gradual, eles superam o limiar auditivo e tornam-se audíveis (CCA, 2015).

Figura 38 – Medições de nível de pressão sonora não ponderada de banda de um terço de oitava de cerca de 29 instalações eólicas no Japão (Tachibana et al., 2014 and INCE/USA)



Fonte: CCA (2015)

Vale ressaltar que sons de frequências mais altas são fortemente absorvidos pelo ambiente ao redor, o que limita sua propagação a longas distâncias e a penetração em estruturas, como paredes residenciais. Assim, o impacto acústico das turbinas eólicas é mais proeminente nas frequências audíveis mais baixas, conforme demonstrado na Figura 37.

Diante dos aspectos discutidos, pode-se concluir que, em termos de impacto sonoro, as turbinas eólicas emitem um espectro de ruído acentuado nas frequências baixas e médias, que coincide com uma sensibilidade auditiva humana pronunciada. Outro fator que destaca essas faixas é a capacidade dessas frequências de se propagarem a longas distâncias da fonte, com poucas perdas de energia acústica. Na prática, embora o nível de pressão sonora emitido por essas máquinas diminua com o aumento da frequência, os sons produzidos na faixa audível, especialmente entre 200 Hz e 2,5 kHz , continuam a representar um desafio para o conforto acústico das áreas residenciais próximas a parques eólicos.

2.6.1.5 Fatores que aumentam o impacto acústico

O impacto sonoro das turbinas eólicas possui forte dependência de fatores geográficos e ambientais específicos. Em muitos cenários, o ruído gerado pelas turbinas pode ser mascarado pelo som natural do vento, principalmente em regiões de vento mais elevado e constante. Porém, durante o período noturno, a redução do som ambiente torna o ruído das turbinas mais perceptível para as comunidades circundantes. A operação ininterrupta das turbinas também contribui para um impacto acústico acentuado, mesmo em níveis sonoros relativamente baixos. Adicionalmente, barreiras naturais, como montanhas ou depressões geográficas, podem intensificar o ruído, uma vez que o som permanece confinado, sem dispersão adequada, aumentando assim a percepção acústica local (AWEA, 2000).

Há também uma relação direta entre o nível de ruído que uma turbina eólica produz e as condições de vento enfrentadas por ela. Estudos, em sua grande parte, indicam uma relação proporcional e direta entre a velocidade normalizada do vento e o nível de pressão sonora - Gaia Wind (2010), DNV GL (2019), Aeroustics Engineering Ltd (2020) e outros. Essa correlação, contudo, se mantém apenas até a turbina alcançar sua velocidade operacional máxima (*rated speed*), ponto em que a rotação do rotor se estabiliza para manter a potência nominal. A partir desse limite, o nível de ruído também tende a se estabilizar, permanecendo constante, mesmo com o aumento da velocidade do vento.

Outro fator amplificador do ruído gerado pelas turbinas é o cisalhamento do vento, que envolve variações de velocidade e direção com a altura. Nas altitudes entre 60 e 150 metros, onde se localizam as pás, há uma maior propensão ao surgimento de gradientes de temperatura e variações na velocidade do vento. Essas condições podem acarretar efeitos adversos, como oscilações de carga e desgaste mecânico desigual, que, mesmo sob a ação de mecanismos de controle, podem intensificar a percepção do ruído (Cumplings, 2012).

2.6.2 Classificação e caracterização das fontes de ruído em turbinas eólicas

2.6.2.1 Ruído mecânico e aerodinâmico: Fontes e Mecanismos

Turbinas eólicas geram ruído a partir de várias fontes, classificadas em duas categorias principais: ruído mecânico e ruído aerodinâmico (Jianu, 2011). Essa distinção é essencial para desenvolver estratégias de mitigação específicas, especialmente em áreas próximas a comunidades. Neste estudo, o ruído mecânico é abordado brevemente, enquanto o ruído aerodinâmico, devido ao seu impacto significativo, é o foco principal.

O ruído mecânico em turbinas eólicas é gerado por componentes internos como geradores, sistemas de transmissão, sistemas hidráulicos e ventiladores de resfriamento localizados na nacela. Caracterizado por frequências tonais — ou seja, em uma faixa estreita de frequências — esse ruído é geralmente mais incômodo para o ser humano em comparação ao ruído de banda larga (CCA, 2015; Deshmukh, 2018). A propagação ocorre de duas maneiras: pelo ruído aéreo, diretamente emitido para o ambiente, e pelo ruído estrutural, que se transmite pela estrutura da turbina e é irradiado pelas superfícies, como a nacela, a torre e as pás.

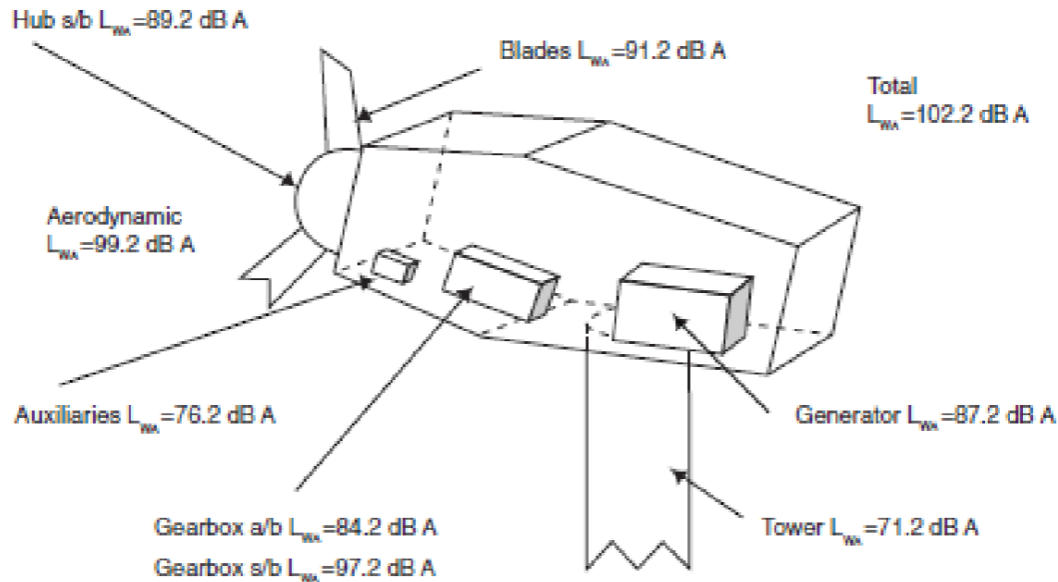
Medidas de aprimoramento em design e fabricação reduziram o ruído mecânico ao longo dos anos, mas ele ainda representa um fator limitante na escolha de locais para novas turbinas, principalmente devido ao potencial impacto em comunidades próximas (Jianu, 2011).

O ruído aerodinâmico, originado pela interação do fluxo de ar com as pás, é a principal fonte de ruído das turbinas eólicas (CCA, 2015; Deshmukh, 2018). Esse tipo de ruído inclui tanto componentes de banda larga, distribuídos por várias frequências, quanto componentes tonais, mais concentrados em frequências específicas. Sua direção e intensidade podem variar conforme o vento e a posição das pás, irradiando a favor, contra ou perpendicularmente ao vento. Em velocidades elevadas, o ruído aerodinâmico é intensificado pela formação de camadas limites turbulentas sobre o aerofólio; em velocidades mais baixas, o ruído está mais relacionado a fenômenos locais envolvendo camadas limite laminares.

Fatores como velocidade e turbulência do vento, ângulo de ataque, perfil da pá e distância ao cubo influenciam a intensidade e a frequência do ruído aerodinâmico. Nas regiões próximas às pontas das pás, onde as velocidades relativas ao vento são maiores, os níveis de ruído tendem a ser mais elevados e especialmente em altas frequências. Assim, turbinas com pás mais longas, embora aumentem a eficiência energética, também tendem a produzir níveis mais elevados de ruído aerodinâmico devido às maiores velocidades relativas em suas extremidades (CCA, 2015).

A Figura 39 ilustra as diferentes fontes de ruído em uma turbina eólica e seus respectivos níveis de potência sonora (L_{WA}). Na imagem, "a/b" representa o ruído aéreo, enquanto "s/b" se refere ao ruído estrutural.

Figura 39 – Ruídos de turbinas eólicas (Oerlemans; Sijtsma; López, 2007)



Fonte: Jianu (2011)

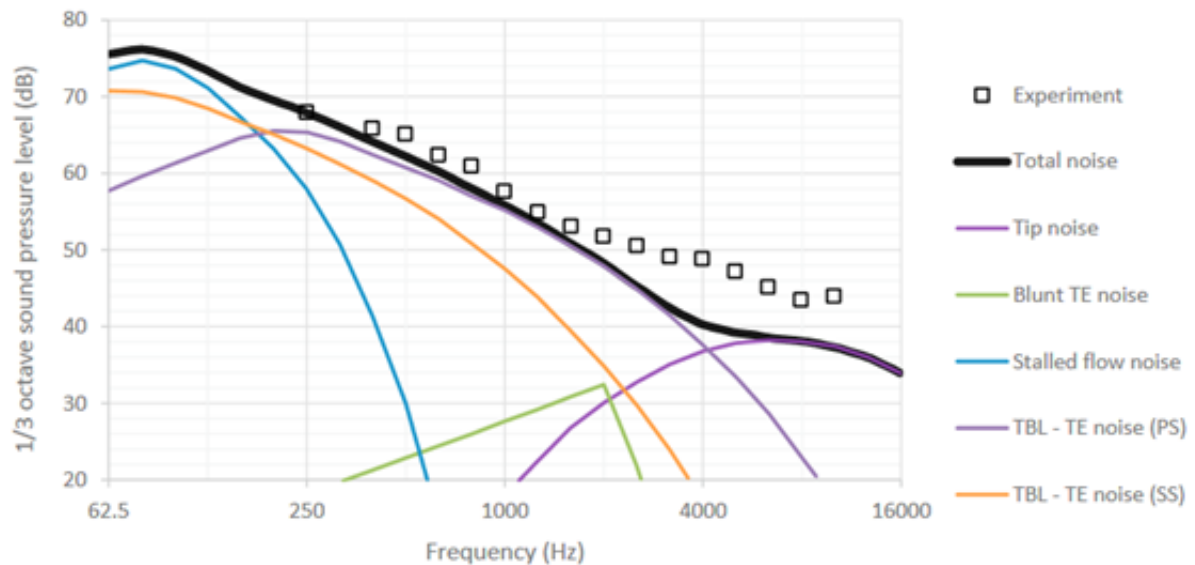
2.6.2.2 Principais fontes de ruído aerodinâmico em turbinas eólicas

O ruído aerodinâmico de turbinas eólicas divide-se em duas categorias principais: ruído de turbulência de entrada e ruído próprio do aerofólio (Deshmukh, 2018). Recentemente, outra forma de ruído, a modulação de amplitude, tem recebido atenção especial. A modulação de amplitude não é uma nova fonte de ruído, mas envolve variações oscilantes no nível de pressão sonora ao longo do tempo, tornando o ruído da turbina mais perceptível. Esse fenômeno afeta as principais fontes de ruído da turbina, especialmente em bandas largas, e terá destaque neste estudo.

O ruído próprio do aerofólio, por sua vez, pode ser classificado em seis tipos, cada um, na teoria, associado a uma região específica da pá e contribuindo com características acústicas próprias, como mostrado na Figura 40. A seguir, os quadros 8 a 10 detalham as principais características de cada tipo, incluindo frequências e mecanismos de geração.

Esses quadros destacam que diversos mecanismos irradiam ruído de maneira distinta, com características de ruídos tonais e de banda larga, sendo que os primeiros são mais fáceis de mitigar com ajustes no design. Na subseção 2.6.3, discutiremos como cada um desses aspectos impacta a análise acústica detalhada.

Figura 40 – Contribuição das fontes individuais de ruído de uma turbina eólica (Wagner; Bareiß; Guidati, 2012)



Fonte: Deshmukh (2018)

Quadro 8 – Ruído de Perfil Aerodinâmico (Airfoil Self-Noise)

Tipo	Mecanismo	Características	Faixa de Frequência
Ruído de Camada Limite (CL) Turbulenta sobre o Bordo de Fuga (BF)	Interação da turbulência da CL com o BF	Banda larga, sendo a principal fonte acústica de uma turbina eólica	Estende-se de baixas a altas frequências, com sua maior contribuição estando ao redor de 770 Hz a 2000 Hz
Ruído de Ponta das Pás	Interação entre fluxo cruzado e turbulência com a superfície da ponta da pá	Banda larga	Acima dos 1 kHz, especialmente atingindo a faixa dos 2 aos 4 kHz
Ruído por Estol/Separação	Formação de instabilidades em grande escala devido à separação	Banda larga	Até por volta dos 500 Hz
Ruído da CL Laminar	Interação de instabilidade da CL com a superfície	Tonal	—
Ruído de BF Espesso	Vórtices desprendem-se no BF espesso	Tonal	Entre 400 Hz e 3 kHz
Ruído de Fluxo sobre Buracos e Fendas	Escoamento instável e desprendimento de vórtices	Tonal	Normalmente, em baixas frequências

Fonte: Adaptado de Wagner *et al.* (1996).

Quadro 9 – Ruído de Turbulência de Entrada (Inflow Turbulence Noise)

Mecanismo	Características	Faixa de Frequência
Interação da superfície das pás com a turbulência atmosférica	Banda larga	Até 1 kHz

Fonte: Adaptado de Wagner *et al.* (1996).

Quadro 10 – Modulação em Amplitude (MA)

Tipo	Mecanismo	Descrição	Características
Modulação em Amplitude Normal (NAM)	Ruído periódico associado a um carregamento estável nas pás	Interação de ventos sob diferentes velocidades ao longo das pás enquanto estas rotacionam e promovem um movimento relativo em relação ao observador	Variação periódica do nível de pressão sonora, principalmente nas direções do plano do rotor
Outra Modulação em Amplitude (OAM)	Ruído irregular associado a um carregamento instável nas pás	Interação de vento turbulentos com as pás, promovendo comportamentos adversos, como mudanças de passo ou estol	Variação irregular do nível de pressão sonora, especialmente em baixas frequências, sobretudo em direções perpendiculares às superfícies das pás

Fonte: Adaptado de Wagner *et al.* (1996).

2.6.3 Análise dos mecanismos de ruído aerodinâmico em turbinas eólicas

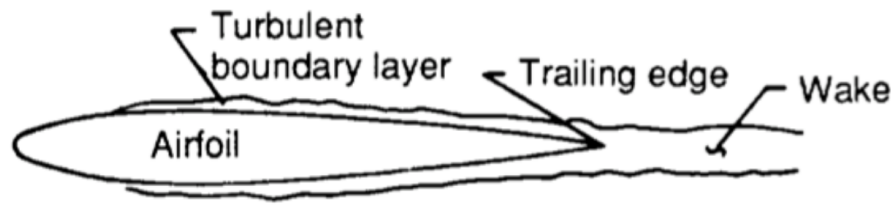
2.6.3.1 Análise dos ruídos de perfil aerodinâmico (*airfoil self-noise*)

2.6.3.1.1 Ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga (TBL-TEN - *Turbulent Boundary Layer - Trailing Edge Noise*)

O ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga, conhecido como TBL-TEN (Turbulent Boundary Layer - Trailing Edge Noise), é uma das principais fontes de ruído em turbinas eólicas. Esse tipo de ruído ocorre devido à interação entre a camada limite turbulenta e o bordo de fuga afilado do aerofólio, caracterizando-se por uma natureza de banda larga com picos de frequência variados (Jianu, 2011; Deshmukh, 2018). Esse mecanismo pode ser visualizado através da ilustração da Figura 41.

Conforme apontado por Romero-Sanz e Matesanz (2008), o TBL-TEN pode ocorrer tanto no lado de sucção quanto no lado de pressão do aerofólio - como refletido na Figura 40, sendo influenciado também pelo acabamento da superfície.

Figura 41 – Ruído de camada limite turbulenta no bordo de fuga (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)



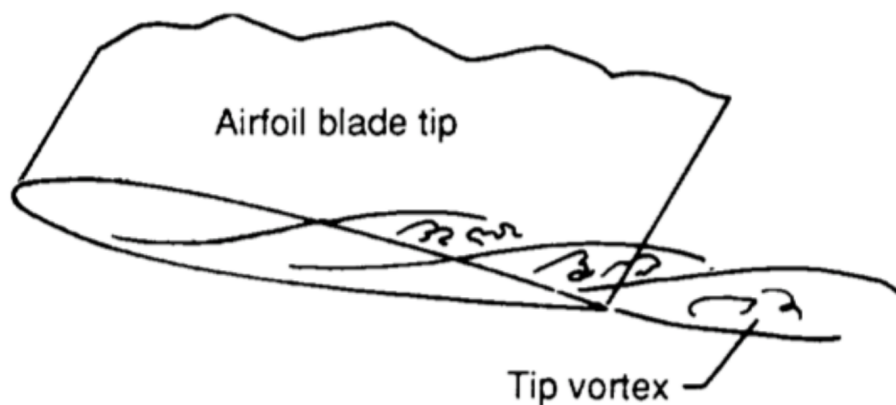
Fonte: Jianu (2011)

Em condições de fluxo típicas, redemoinhos turbulentos isolados são fontes de ruído ineficientes; no entanto, ao interagir com uma borda afilada, tornam-se fontes sonoras significativas para a atmosfera (Deshmukh, 2018). Fatores como o número de Reynolds e o ângulo de ataque alteram a estrutura turbulenta, afetando a intensidade e as características do ruído (Jianu, 2011).

2.6.3.1.2 Ruído de ponta (*tip noise*)

O ruído gerado nas pontas das pás deve-se principalmente ao vórtice que se forma nas extremidades das pás, causado pela diferença de pressão entre os lados de sucção e pressão. Esse tipo de ruído é caracterizado pela complexidade tridimensional, devido à interação entre o núcleo do vórtice e o bordo de fuga próximo à ponta da pá, com som de banda larga predominante em altas frequências (Deshmukh, 2018; Jianu, 2011; Wagner *et al.*, 1996; Oerlemans, 2011). A Figura 42 exemplifica esse fenômeno.

Figura 42 – Ruído de ponta das pás devido à formação de vórtice (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)



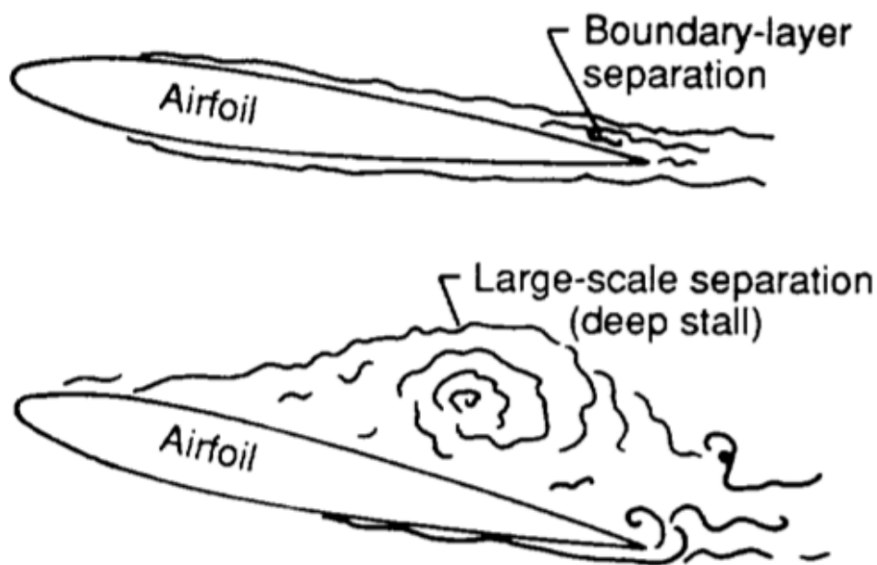
Fonte: Jianu (2011)

Esse ruído tipicamente ocorre na faixa entre 1 e 4 kHz (Deshmukh, 2018), região de alta sensibilidade auditiva humana, o que torna o ruído de ponta um dos componentes mais incômodos do ruído total da turbina. Acima de 2 kHz , ele tende a se tornar dominante. Esse comportamento é evidenciado em medições por um pico secundário em torno de 2 kHz no espectro de terças de oitava (Klug, 2006).

2.6.3.1.3 Ruído de estol/separação (*stall noise*)

O ruído de estol ocorre quando o ângulo de ataque aumenta, levando à separação do fluxo e gerando ruído de banda larga. Em condições de separação parcial, o ruído vem do bordo de fuga; no estol completo, a emissão ocorre ao longo de toda a corda do aerofólio (Deshmukh, 2018), formações tais como exemplificadas na Figura 43.

Figura 43 – Ruído de estol/separação (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)

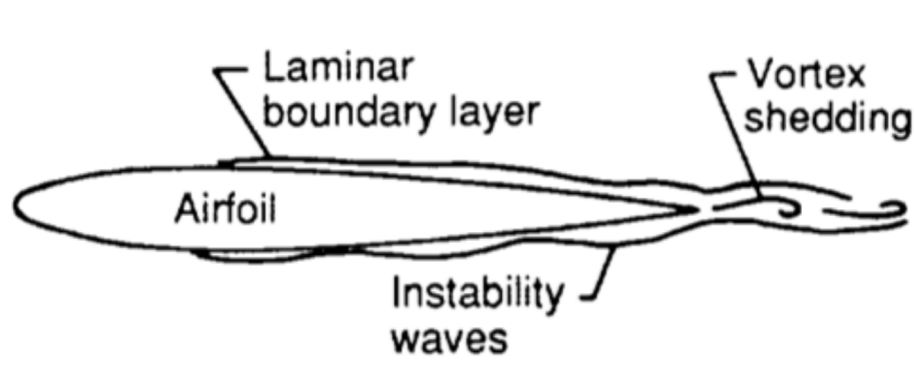


Fonte: Jianu (2011)

2.6.3.1.4 Ruído de camada limite laminar (*laminar boundary layer noise*)

Em baixas condições de número de Reynolds (inferiores a 10^6), o fluxo pode permanecer laminar até o bordo de fuga, criando instabilidades conhecidas como "Ondas de Tollmien-Schlichting". Isso pode resultar no desprendimento de vórtices e na geração de ruído tonal significativo, especialmente em turbinas de menor porte (Jianu, 2011; Deshmukh, 2018), fenômeno demonstrado na Figura 44

Figura 44 – Ruído de desprendimento de vórtice em camada limite laminar (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)

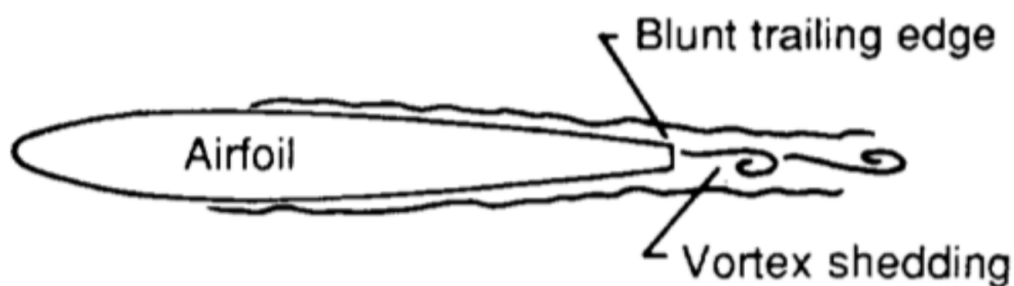


Fonte: Jianu (2011)

2.6.3.1.5 Ruído de bordo de fuga espesso (*blunt trailing edge noise*)

Esse tipo de ruído, gerado pelo desprendimento de vórtices em bordos de fuga espessos, é caracterizado por um ruído tonal, com picos agudos entre 400 Hz e 3 kHz . Esse fenômeno ocorre quando o escoamento forma uma esteira ao se separar do bordo de fuga (Deshmukh, 2018). A Figura 45 ilustra esse processo.

Figura 45 – Ruído de desprendimento de vórtice devido ao bordo de fuga espesso (Brooks; Pope; Marcolini, 1989)



Fonte: Jianu (2011)

O nível de ruído depende da geometria do bordo de fuga, número de Reynolds, e a razão δ^*/t^* (espessura de deslocamento da camada limite sobre a espessura do bordo de fuga). Esse fenômeno, associado ao vórtice de Von Karman, pode ser mitigado com o prolongamento do bordo de fuga (Jianu, 2011; Deshmukh, 2018).

2.6.3.1.6 Ruído de fluxo sobre buracos, fendas e intrusões

Imperfeições no perfil do aerofólio, como buracos, ranhuras, saliências e sinais de erosão, podem causar instabilidades e contribuir para o ruído tonal, especialmente em baixas frequências. O desgaste ao longo do tempo, como erosão e acúmulo de detritos, aumenta a turbulência, elevando o ruído acima do projetado. Isso pode ocorrer mesmo em superfícies inicialmente lisas (Oerlemans; Sijtsma; López, 2007).

2.6.3.2 Análise do ruído de turbulência de entrada (*turbulent inflow noise*)

As turbinas eólicas operam idealmente em fluxos laminares, mas o ar se torna turbulento ao passar pelas turbinas, afetando as turbinas a jusante. Esse fluxo turbulento atinge o bordo de ataque das pás e gera ruído significativo, especialmente em frequências abaixo de 1.000 Hz , resultando em um espectro de banda larga (Oerlemans, 2011; Wagner; Bareiß; Guidati, 2012).

De acordo com Romero-Sanz e Matesanz (2008), a intensidade e o perfil desse ruído dependem da relação entre o tamanho das estruturas turbulentas e o raio do bordo de ataque do aerofólio. O fenômeno, conhecido como ruído de turbulência de entrada (*turbulent inflow noise*), manifesta-se de duas formas principais: uma fonte dipolar, que domina as baixas frequências, e uma quadripolar, que ocorre em frequências mais altas. A fonte dipolar é especialmente relevante em condições de vento intenso, aumentando o ruído devido à elevação da turbulência (Jianu, 2011).

A degradação do bordo de ataque, causada por desgaste ou irregularidades, pode amplificar o ruído mesmo sob baixa turbulência. Embora caracterizado em estudos recentes, a contribuição precisa do ruído de turbulência de entrada para o ruído total das turbinas ainda demanda investigação adicional (Deshmukh, 2018).

2.6.3.3 Análise do ruído por modulação em amplitude (AM - *Amplitude Modulation*)

A modulação em amplitude (AM) é uma característica distinta do ruído gerado por turbinas eólicas, associada à interação das pás com fluxos de ar de velocidades e direções variáveis ao longo de sua extensão (Berg, 2023). O fenômeno, frequentemente descrito como um “assobio” ou “batida”, é intensificado em condições de turbulência, causando variações de carga nas pás (CCA, 2015).

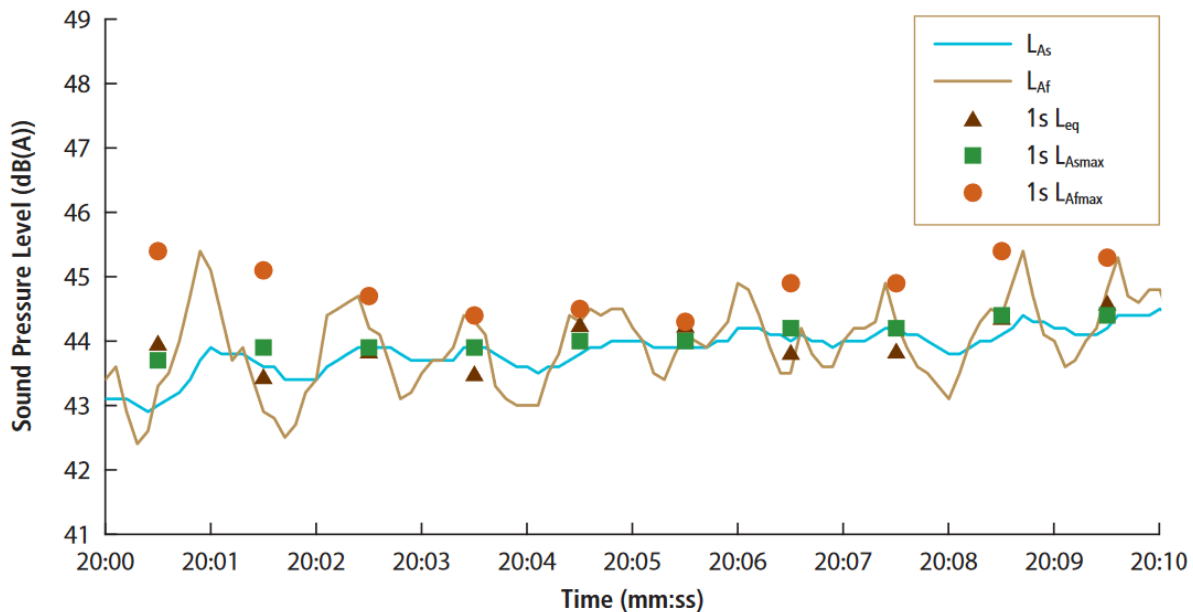
Durante a rotação, a posição das pás em relação a um receptor fixo gera variações periódicas na pressão sonora, conhecidas como NAM (Modulação de Amplitude Normal - *Normal Amplitude Modulation*) (CCA, 2015; Berg, 2023). Próximo à turbina, dentro de 1 a 2 diâmetros do rotor, a modulação pode provocar um aumento significativo (entre 2 e 6 *dB*) na intensidade sonora, enquanto a distâncias maiores, a percepção do “assobio” é menor nas direções a favor ou contra o vento. No entanto, ainda podem ocorrer variações de até 5 *dB* em direções perpendiculares ao fluxo (Romero-Sanz; Matesanz, 2008).

Outro tipo de modulação, denominado OAM (Outra Modulação de Amplitude - *Other Amplitude Modulation*), surge de rajadas de vento, estol e turbulência, levando a flutuações sonoras mais intensas (superiores a 6 *dB*) em baixas frequências, o que facilita a propagação a longas distâncias. Esse tipo de modulação é emitido predominantemente perpendicularmente à superfície da pá - nem sempre coincidindo com o plano do rotor (Berg, 2023).

A causa e as características da modulação de amplitude são temas de pesquisa ativa, incluindo a propagação desse ruído no ar livre. Em turbinas de grande porte, o efeito é mais intenso devido à área maior varrida pelo rotor, expondo-o a ventos mais variáveis (CCA, 2015). As oscilações na pressão sonora tornam-se mais evidentes quando as pás passam próximas à torre, especialmente em turbinas *downwind*.

Segundo o Conselho de Academias Canadenses (CCA, 2015), a modulação de amplitude é descrita por dois parâmetros principais: a profundidade de modulação, que indica a diferença entre os picos e vales da pressão sonora, e a frequência de modulação, que determina a taxa dessas variações. É importante notar que a frequência de modulação não deve ser confundida com a faixa de frequência do som na qual os níveis de pressão mudam. Embora ambos possam ser expressos em Hertz (*Hz*), a frequência de modulação é tipicamente próxima da frequência de passagem das pás, em torno de 1 *Hz*, enquanto o fenômeno impacta um intervalo de frequências de som produzidas pelas turbinas eólicas. A modulação geralmente ocorre em frequências médias, entre 200 e 1.000 *Hz*, com profundidade de modulação entre 2 e 5 *dB*, podendo atingir até 10 *dB* em casos extremos.

Figura 46 – Métricas sonoras ponderadas pela escala A para uma turbina eólica durante um período de 10 segundos (Kaliski, 2014 and RSG, Inc.)



Fonte: CCA (2015)

A Figura 46 mostra métricas de ruído ponderadas pela escala "A", medidas a 260 metros de uma turbina eólica. Nessa representação, L_{As} se refere a medições lentas (com integração de um segundo) e L_{Af} , a medições rápidas (com integração de um oitavo de segundo). Níveis sonoros equivalentes (L_{eq}) e níveis máximos (L_{Asmax} e L_{Afmax}) são apresentados para cada intervalo de um segundo, mostrando que medições rápidas (L_{Af}) capturam variações mais significativas, enquanto intervalos mais longos, como L_{eq} , podem não representar as flutuações da AM (CCA, 2015).

Embora outras fontes de ruído, como tráfego rodoviário, também apresentem modulação em amplitude, o ruído das turbinas é notável devido à regularidade da AM, que acompanha a rotação das pás.

3 IMPACTO, PERCEPÇÃO E GESTÃO DO RUÍDO EM TURBINAS EÓLICAS

3.1 Desafios e inovações na gestão e medição do ruído em turbinas eólicas

3.1.1 Avanços no design das pás para redução de ruído

Com o avanço da indústria eólica, o design das pás das turbinas tem sido continuamente aprimorado para aumentar a eficiência na conversão da energia do vento em energia rotacional, ao mesmo tempo em que se reduz os impactos sonoros. Melhorias no fluxo de ar ao longo das pás e a diminuição das turbulências são alcançadas com inovações inspiradas na aerodinâmica natural, como bordos de fuga serrilhados e revestimentos absorventes de som. Essas técnicas têm demonstrado eficácia na redução do ruído aerodinâmico sem comprometer o desempenho energético das turbinas, sendo especialmente relevantes para parques eólicos situados próximos a áreas residenciais. Assim, esses avanços representam uma linha contínua de pesquisa voltada para o equilíbrio entre demandas energéticas e acústicas.

3.1.2 Desafios na modelagem e normatização do ruído em turbinas eólicas

3.1.2.1 Normas vigentes e limitações na avaliação do ruído

Apesar das melhorias no design, as metodologias para a medição do ruído em turbinas eólicas ainda apresentam deficiências. No Brasil, a norma NBR 10151, que regulamenta limites de ruído para áreas residenciais e rurais, não considera as particularidades acústicas das turbinas eólicas. A norma estabelece limites de ruído (40 *dB* diurno e 35 *dB* noturno), porém, em locais de parques eólicos, o ruído de fundo natural frequentemente excede esses valores devido às condições atmosféricas. Isso cria uma disparidade entre o ambiente real e os limites regulamentados, apontando para uma inadequação da norma em capturar a experiência sonora de áreas impactadas por turbinas.

A IEC 61400-11, desenvolvida especificamente para turbinas eólicas, oferece uma metodologia mais ajustada aos desafios únicos do ruído dessas estruturas, fornecendo diretrizes detalhadas que possibilitam uma caracterização mais precisa de sons específicos, como ruídos tonais, por meio de bandas estreitas de frequência. Isso possibilita uma caracterização mais precisa e facilita a identificação de fontes de ruído. Entretanto, apesar de mais adequada do que a NBR 10151, essa norma também apresenta lacunas. Um dos principais desafios dessa norma é que, embora eficaz na quantificação do nível sonoro médio, ela não cobre de forma abrangente as influências ambientais, como a variação do vento e temperatura, aspectos críticos para a propagação do ruído.

3.1.2.2 Aspectos críticos da caracterização técnica do ruído

Os métodos padronizados para medir e caracterizar o ruído das turbinas eólicas são insuficientes para capturar toda a complexidade do fenômeno acústico associado. Estudos de ruído em turbinas geralmente focam no nível sonoro médio, especialmente nos ruídos aerodinâmicos das bordas de ataque e fuga das pás, que constituem as principais fontes sonoras. No entanto, outros elementos, como o vórtice de ponta e os ruídos mecânicos, são frequentemente negligenciados devido à sua complexidade. Demais ruídos como o infrassom e em baixas frequências, além de sons modulados em amplitude (AM), representam desafios adicionais. A interação de variáveis como pressão e velocidade do vento torna difícil uma modelagem precisa dessas componentes, prejudicando a estimativa de seu impacto sonoro. Atualmente, essas metodologias de medição ainda carecem de padronização, dificultando o controle e a mitigação eficaz desses componentes do ruído (Berg, 2023).

3.1.2.3 Perspectivas para o aprimoramento de normas e modelagem do ruído

Mesmo normas específicas, como a IEC 61400-11, mostram-se insuficientes para abordar todos os aspectos do som emitido pelas turbinas eólicas. A falta de diretrizes para variáveis ambientais e ruídos específicos compromete a interpretação dos resultados de medições e, por consequência, a eficácia das estratégias de mitigação. Já normas mais amplas, como a NBR 10151, que regulam o ruído ambiental em geral, são ainda mais limitadas para os casos de parques eólicos. Alguns países, como a Dinamarca, têm adotado regulamentações que incluem variáveis climáticas e fatores específicos de turbinas eólicas, trazendo uma possível referência para novas diretrizes nacionais (Ministry of Environment of Denmark, 2019). O cenário atual destaca a necessidade urgente de metodologias padronizadas e mais abrangentes, capazes de capturar as nuances acústicas de turbinas eólicas e proteger as comunidades afetadas.

3.2 Impacto do ruído das turbinas eólicas nas comunidades e percepção social

3.2.1 Efeitos do ruído nas comunidades próximas a parques eólicos

O ruído gerado pelas turbinas eólicas, além das implicações técnicas e acústicas, afeta as comunidades circunvizinhas de maneira psicossocial e subjetiva. Estudos demonstram que o incômodo sentido pelos residentes não está apenas atrelado à intensidade do som, mas também ao seu padrão e frequência, fatores que contribuem para distúrbios como ansiedade e insônia, sobretudo em áreas com baixo ruído de fundo (CCA, 2015; Berg, 2023). A exposição contínua a sons modulados ritmicamente, como o ruído característico das pás das turbinas, podem aumentar a intrusão sonora e, consequentemente, o desconforto psicológico, principalmente durante o período de descanso.

3.2.2 Análises científicas sobre ruído e seus efeitos na saúde e bem-estar

3.2.2.1 Avaliação da relação causal entre ruído de turbinas e efeitos na saúde

Diversas revisões científicas têm examinado os impactos do ruído de turbinas eólicas na saúde humana. Uma revisão de 2015 pelo Conselho de Academias Canadenses identificou uma associação entre exposição ao ruído e o aumento do desconforto em populações locais. Contudo, para distúrbios do sono, as evidências foram limitadas, e para condições mais severas, como estresse crônico e sintomas físicos, os dados foram insuficientes para uma confirmação causal. A escassez de dados sobre as condições iniciais de incômodo (especialmente na ausência de operação das turbinas) e sobre variações no impacto conforme o clima e o vento limita uma análise exata dos efeitos. Esse contexto destaca a importância de novas pesquisas que incorporem essas variáveis ambientais e permitam uma avaliação mais completa dos impactos (CCA, 2015).

A análise conduzida por Robert J. McCunney em 2014 apoia essas conclusões. Segundo McCunney *et al.* (2014), os sintomas mais comumente relatados por moradores próximos às turbinas incluem irritabilidade e dificuldades no sono, embora não existam evidências substanciais de impactos graves na saúde física. A variabilidade nos sintomas relatados entre diferentes estudos sugere que fatores de contexto, como características locais e preferências individuais, podem influenciar a percepção e a resposta das comunidades.

3.2.2.2 Fatores externos ao incômodo acústico para comunidades próximas às turbinas

Em situações onde sintomas de desconforto e saúde fragilizada emergem sem uma relação física direta com o som, outros fatores externos devem ser considerados. Um desses fatores é o “efeito nocebo,” em que a expectativa de que o ruído das turbinas possa prejudicar a saúde agrava o estresse e a ansiedade, ainda que sem uma causa acústica comprovada (Crichton *et al.*, 2014; Tonin; Brett; Colagiuri, 2016).

Outra variável importante é o benefício econômico; a análise de McCunney *et al.* (2014) sugere que comunidades com compensação monetária relatam menor desconforto em comparação às que não recebem benefícios, indicando que o apoio financeiro pode melhorar a percepção de controle e justiça, e reduzir a sensação de ameaça.

O “efeito desconhecido,” por sua vez, está ligado ao temor de riscos ocultos das turbinas, especialmente em locais onde a população não possui um entendimento técnico claro sobre seu funcionamento. Esse fator é crítico em áreas onde os residentes sentem que não têm controle ou voz ativa no processo de instalação. Sentimentos de insegurança sobre riscos invisíveis podem aumentar a ansiedade e oposição, tornando o ruído das turbinas ainda mais intrusivo e impactante (Thorne, 2019). Segundo a teoria dos “fatores terríveis” de Slovic (1987), tecnologias percebidas como incontrolláveis ou impostas sem a participação das comunidades são vistas com maior hostilidade, intensificando a sensação de ameaça e resistência. Esses fenômenos, em conjunto à percepção de injustiça e à falta de controle sobre as decisões de instalação, acentuam o incômodo para indivíduos e comunidades.

Além disso, o impacto visual das turbinas também pode aumentar a percepção negativa do ruído, sobretudo para aqueles que interpretam a presença das turbinas como uma intrusão ambiental ou uma perda estética da paisagem natural. Estudos sugerem que o incômodo é potencializado em comunidades que associam as turbinas a degradação visual, especialmente quando não há participação nas decisões sobre a instalação. Adicionalmente, atitudes pessoais em relação à energia eólica afetam diretamente a forma como o ruído é experienciado; aqueles com opinião mais favorável ao desenvolvimento sustentável reportam menos incômodo em comparação aos que se opõem às turbinas (CCA, 2015; Knopper; Ollson, 2011).

3.2.3 Integração de fatores contextuais e ambientais na experiência sonora

A experiência do ruído de turbinas eólicas resulta da interação complexa entre o ambiente sonoro e diversos fatores contextuais que intensificam a sensação de desconforto, mesmo sem evidências diretas de riscos físicos à saúde. Estudos indicam que o incômodo causado pelas turbinas eólicas não se limita à intensidade e frequência do som, mas é influenciado por variáveis como proximidade, visibilidade das turbinas e a percepção de controle sobre sua instalação (Thorne, 2019; Knopper; Ollson, 2011). Esses fatores de contexto, somados à percepção subjetiva de cada indivíduo, reforçam a necessidade de uma abordagem abrangente para o estudo do impacto do ruído. Considerar essas influências permite uma análise integrada e mais realista dos efeitos das turbinas em comunidades afetadas.

3.3 Estratégias integradas para mitigação do ruído de turbinas eólicas

Dada a natureza multifacetada dos impactos do ruído de turbinas eólicas, estratégias focadas apenas no aumento da distância entre os parques e as áreas residenciais podem oferecer benefícios limitados na redução do incômodo percebido. Embora o ruído das turbinas não represente um risco direto à saúde física, ele pode causar desconforto psicológico significativo, amplificado por fatores sociais e contextuais. Esse cenário demonstra a necessidade de uma abordagem integrada e centrada na comunidade, que inclua a participação ativa da população no processo de instalação de parques eólicos para reduzir os efeitos psicossociais negativos e facilitar a aceitação local.

A mitigação eficaz dos impactos acústicos requer uma abordagem multidisciplinar que combine avanços tecnológicos com regulamentações adequadas e engajamento contínuo com as comunidades afetadas. Além do distanciamento apropriado, aspectos como as condições climáticas e a topografia devem ser considerados ao escolher os locais de instalação, permitindo o desenvolvimento de modelos preditivos mais detalhados para minimizar o impacto em áreas sensíveis.

A aceitação social das turbinas eólicas depende fortemente de uma interação transparente e informada com as comunidades locais. Consultas públicas e campanhas educativas sobre os benefícios e potenciais riscos da energia eólica promovem uma compreensão mais equilibrada do projeto e facilitam o diálogo, contribuindo para a construção de relações de confiança. A inclusão das comunidades no processo de tomada de decisão pode reduzir a percepção de ameaça e promover um ambiente de cooperação.

Aplicar normas como a IEC 61400-11, ajustadas às condições locais e atualizadas com base em estudos psicoacústicos, representa uma estratégia promissora para atenuar os impactos do ruído das turbinas. Normas que considerem as características específicas dos aerogeradores e as condições ambientais locais permitem uma regulamentação mais eficaz e alinhada com as realidades das áreas de implantação.

Em resumo, a mitigação dos impactos acústicos das turbinas eólicas exige uma combinação de inovação tecnológica e uma abordagem socio-comunitária. O diálogo contínuo com as comunidades, a implementação de normas adaptadas às particularidades locais e políticas de compensação justa são fundamentais para equilibrar a expansão da energia eólica com o bem-estar das populações afetadas. Assim, é possível buscar uma transição energética que respeite o meio ambiente e a qualidade de vida, promovendo uma coexistência sustentável entre a energia eólica e as comunidades.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho ofereceu uma base conceitual e abrangente sobre os aspectos técnicos e psicossociais relacionados ao ruído das turbinas eólicas, destacando como essas estruturas estão inseridas em um cenário global de transição energética para fontes sustentáveis. Inicialmente, abordou-se o panorama histórico e econômico da indústria eólica, ressaltando a trajetória evolutiva dos aerogeradores até os modelos atuais que compõem o mercado global. De maneira introdutória, foram explorados também aspectos fundamentais de projeto e operação, particularmente os fenômenos aerodinâmicos que impactam diretamente o desempenho e a emissão sonora das turbinas.

Em seguida, apresentaram-se os principais conceitos de acústica aplicados a essa indústria, com uma exposição das terminologias, padrões regulatórios nacionais e internacionais, bem como metodologias de medição acústica. A análise aprofundou-se nos parâmetros e nas métricas de avaliação do ruído, delineando as características acústicas próprias de aerogeradores e os padrões que buscam mitigar impactos sonoros.

Com o desenvolvimento do tema, foram analisados os tipos de ruído gerados, suas causas aerodinâmicas e as relações de causalidade estabelecidas por estudos científicos. Além disso, consideraram-se fatores psicossociais que amplificam o incômodo nas comunidades, abordando a importância de uma regulação normativa bem fundamentada e da transparência no processo de implantação de parques eólicos. Esses fatores são essenciais para a aceitação pública e o bem-estar das comunidades.

Futuras investigações poderão explorar métodos de mitigação já implementados ou em fase de desenvolvimento na indústria. Aspectos como o infrassom, a Modulação de Amplitude (AM) e o Ruído de Baixa Frequência (LFN) são tópicos emergentes que carecem de uma regulamentação específica e merecem ser discutidos com uma abordagem crítica, principalmente à medida que novos dados científicos se acumulam. Pesquisas psicoacústicas mais detalhadas também são essenciais, visto que a variabilidade individual na percepção de ruído representa um desafio contínuo. Outro caminho promissor é o aprofundamento das soluções de projeto, estudando como fabricantes e desenvolvedores abordam o controle acústico tanto na fase de concepção quanto no controle operacional de turbinas.

Em suma, a mitigação dos impactos acústicos das turbinas eólicas requer uma integração entre inovação tecnológica, regulamentação adequada e engajamento contínuo das comunidades, com práticas de participação ativa como consultas públicas e comitês locais. Com essa abordagem interdisciplinar, é possível promover um equilíbrio entre o crescimento da energia eólica e a qualidade de vida das populações próximas aos parques, contribuindo para uma expansão sustentável e harmoniosa dessa fonte de energia renovável.

REFERÊNCIAS

- ADEYEYE, K. A. *et al.* The effect of the number of blades on the efficiency of a wind turbine. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Purpose-Led Publishing, v. 801, p. 012020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/801/1/012020>.
- AERCOUSTICS ENGINEERING LTD. **Romney Wind Energy Centre / Turbine T11: IEC 61400-11 Edition 3.0 Measurement Report**. [S.l.], 2020.
- AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION. **Wind energy fact sheet: Facts about wind energy and noise**. Washington, D.C., 2000. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16313: Diretrizes para avaliação de ruído de máquinas e equipamentos em áreas habitadas**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152: Níveis de pressão sonora em ambientes internos e externos – critérios de avaliação**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151: Medida do nível de pressão sonora em ambientes internos e externos**. Rio de Janeiro, 2019.
- BANTA, R. M. *et al.* 3d volumetric analysis of wind turbine wake properties in the atmosphere using high-resolution doppler lidar. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, American Meteorological Society, v. 32, n. 5, p. 904–917, 2015.
- BERG, V. d. F. The relevance of am mitigation. **Proceedings of the Forum Acusticum 2023**, Mundonovo sound research, 2023.
- BROOKS, T. F.; POPE, D. S.; MARCOLINI, M. A. **Airfoil Self-noise and Prediction**. USA, 1989.
- BURTON, T. *et al.* **Wind energy handbook**. [S.l.: s.n.]: John Wiley & Sons, 2011.
- CANADIAN CENTRE FOR OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY. **Noise - Basic Information**. Disponível em: https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/noise/noise_basic.html. Acesso em: 17 out. 2024.
- COUNCIL OF CANADIAN ACADEMIES. **Understanding the Evidence: Wind Turbine Noise**. [S.l.: s.n.]: Council of Canadian Academies, 2015.
- CRICHTON, F. *et al.* Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines? **Health Psychology**, v. 33, n. 4, p. 360–364, 2014.
- CUMMINGS, J. Wind farm noise. **Acoustic Ecology Institute**, 2012. Disponível em: https://www.acousticecology.org/docs/AEI_WindFarmNoise_2012.pdf.
- DESHMUKH, A. Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 81, p. 1530–1541, 2018.

DNV GL. **Results of acoustic noise measurements according to IEC 61400-11 Edition 3.0.** [S.l.], 2019.

DRUSSELL, D. E. **Sound Absorption.** 2016. Acesso em: 21 outubro 2024. Disponível em: <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/Absorption/Absorption.html>.

ELECTRIC, G. **How Loud is a Wind Turbine?** 2023. Accessed: 2024-10-28. Disponível em: <https://www.ge.com/news/reports/how-loud-is-a-wind-turbine>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica.** 2023. Accessed: 2024-10-18. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.

ENERGY, U. D. of. **How a Wind Turbine Works (Text Version).** 2023. Accessed: 2024-10-18. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version>.

ENERGY, W. U.S. Department of. **Wind Turbine Sound.** 2023. Accessed: 2024-10-28. Disponível em: <https://windexchange.energy.gov/projects/sound>.

ERIKSSON, S.; BERNHOFF, H.; LEIJON, M. Evaluation of different turbine concepts for wind power. **renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 12, n. 5, p. 1419–1434, 2008.

FLEMING, P. A. *et al.* Wake steering applied at a commercial wind farm—part 2: Wind tunnel validation and field results. **Wind Energy Science**, European Geosciences Union (EGU), v. 5, n. 2, p. 947–970, 2020.

GAIA WIND. **Wind Turbine Generator System Acoustic Noise Test Report for the Gaia Wind 11-kW Wind Turbine.** Reino Unido, 2010.

GIPE, P. Wind power. **Wind Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 5, p. 629–631, 2004.

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines.** 2. ed. London: Earthscan, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61400-11: Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.** [S.l.], 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61672: Electroacoustics – Sound level meters.** [S.l.], 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61260: Octave-band and fractional-octave-band filters.** [S.l.], 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60942: Electroacoustics – Sound calibrators.** [S.l.], 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3746: Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Environmental correction for the use of a reference sound pressure level.** [S.l.], 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1996-1: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and procedures**. [S.l.], 2016.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Record Growth in Renewables Achieved Despite Energy Crisis**. 2023. Accessed: 2024-10-18. Disponível em: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Mar/Record-Growth-in-Renewables-Achieved-Despite-Energy-Crisis-PT>.

JACOBSEN, F. *et al.* **Fundamentals of acoustics and noise control**. [S.l.: s.n.]: Note, 2011.

JIANU, C. Noise pollution prevention in wind turbines: Status and recent advances. **Environmental Engineering and Management Journal**, Gh. Asachi Technical University of Iasi, v. 10, n. 4, p. 535–542, 2011.

KLUG, H. Iec-news: Power performance and acoustic noise. **DEWI Magazin**, n. 28, February 2006.

KNOPPER, L. D.; OLLSON, A. C. Health effects and wind turbines: A review of the literature. **Environmental Health**, v. 10, p. 78, 2011. Disponível em: <https://ehjournal.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/1476-069X-10-78>.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: theory, design and application**. [S.l.: s.n.]: John Wiley & Sons, 2010.

MCCUNNEY, R. J. *et al.* Wind turbines and health: A critical review of the scientific literature. **JOEM**, v. 56, n. 11, p. 1128–1141, nov 2014.

MINISTRY OF ENVIRONMENT OF DENMARK. **Statutory Order on noise from wind turbines**. 2019. Accessed: 2024-10-21. Disponível em: <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2019/135>.

NEMATİ, A. Three-dimensional numerical study of the performance of a small combined savonius-darrieus vertical wind turbine. **Iranica Journal of Energy & Environment**, Babol Noshirvani University of Technology, v. 11, n. 2, p. 163–169, 2020.

OERLEMANS, S. Primary noise sources. In: BOWDLER, D.; LEVENTHALL, G. (ed.). **Wind Turbine Noise**. Essex, United Kingdom: Multi-Science Publishing Company, Ltd., 2011. cap. 2.

OERLEMANS, S.; SIJTSMA, P.; LÓPEZ, B. M. Location and quantification of noise sources on a wind turbine. **Journal of Sound and Vibration**, v. 299, n. 4-5, p. 869–883, 2007.

PROAUDIO, D. **Décadas, oitavas e terços de oitava: Explicação**. 2022. Acesso em: 21 outubro 2024. Disponível em: <https://www.doctorproaudio.com/content.php?2757-decadas-oitavas-tercos-oitava>.

ROMERO-SANZ, I.; MATESANZ, A. Noise management on modern wind turbines. **Wind Engineering**, v. 32, p. 27–44, 2008.

SLOVIC, P. Perception of risk. **Science**, v. 236, n. 4799, p. 280–285, 1987. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1698637>.

STAVRAKAKIS, G.; SAYIGH, A. 2.10-electrical parts of wind turbines. **Comprehensive Renewable Energy, Elsevier**, p. 269–328, 2012.

TACHIBANA, H. *et al.* Nationwide field measurements of wind turbine noise in japan. **Noise Control Engineering Journal**, v. 62, n. 2, p. 90–101, 2014.

THORNE, J. **Wind Turbines and Health**. 2019.

TONIN, R.; BRETT, J.; COLAGIURI, B. The effect of infrasound and negative expectations to adverse pathological symptoms from wind farms. **Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control**, v. 35, n. 1, p. 77–90, 2016.

VIVEK, C. *et al.* A review on vertical and horizontal axis wind turbine. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 4, n. 04, p. 247–250, 2017.

WAGNER, S. *et al.* Noise mechanisms of wind turbines. **Wind Turbine Noise**, Springer, p. 67–92, 1996.

WAGNER, S.; BAREIß, R.; GUIDATI, G. **Wind Turbine Noise**. Berlin: Springer, 2012.

WANG, Z.; TIAN, W.; HU, H. A comparative study on the aeromechanic performances of upwind and downwind horizontal-axis wind turbines. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 163, p. 100–110, 2018.

ZAGUBIEŃ, A.; WOLNIEWICZ, K. Energy efficiency of small wind turbines in an urbanized area—case studies. **Energies**, MDPI, v. 15, n. 14, p. 5287, 2022.