



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SAMUEL ARAÚJO LIMA

**Estudo de Medição e Análise do Ruído de Aerogeradores de Grande Porte
No Estado do Ceará**

FORTALEZA
2015

SAMUEL ARAÚJO LIMA

Estudo de Medição e Análise do Ruído de Aerogeradores de Grande Porte No Estado do Ceará

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis. Linha de Pesquisa: Energia Eólica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

L71e

Lima, Samuel Araújo.

Estudo de medição e análise do ruído de aerogeradores de grande porte no Estado do Ceará /
Samuel Araújo Lima. – 2015.

96 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Fortaleza, 2015.

Área de Concentração: Energias Renováveis.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Júnior.

1. Engenharia Mecânica. 2. Energia eólica. 3. Ruídos - Análise. I. Título.

CDD 620.1

SAMUEL ARAÚJO LIMA

ESTUDO DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DO RUÍDO DE AEROGERADORES DE
GRANDE PORTE NO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em ___ / ___ / _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Carla Freitas de Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Marisete Dantas de Aquino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*A Deus, por estar sempre presente em
minha vida,
A meus pais, Raimundo e Tereza,
A minhas irmãs, Samia e Sarah,
A minha amada, Nathália,
A todos os meus familiares e amigos.*

*Quando se quer algo verdadeiramente
e com suficiente força, acaba-se por consegui-lo sempre.
(Hermann Hesse)*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Universidade Federal do Ceará, particularmente ao Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de desenvolver este projeto e cursar o mestrado em Engenharia Mecânica.

Ao professor Dr. Francisco Ilson da Silva Junior, pela confiança, amizade, orientação, pela transmissão de novos conhecimentos e pela incontestável competência com a qual orientou todo o desenvolvimento desta dissertação.

A todos os professores, alunos e colaboradores do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos, conselhos e convivência. Ao amigo e colaborador do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Valdi Matos de Almeida Júnior, por toda a atenção, suporte e ajuda, desde o momento em que me inscrevi na seleção do mestrado.

A meus pais, Raimundo Hilton Pereira Lima e Tereza Helena Araújo Lima, a minhas irmãs Samia Araújo Lima e Sarah Araújo Lima, os alicerces de minha vida, por estarem sempre presentes, me apoiando, me incentivando e me compreendendo.

A minha amada Nathália Vasconcelos Soares Rêgo, por estar ao meu lado me motivando, me apoiando e compreendendo as ausências, agindo sempre amorosamente e pacientemente.

Aos amigos Adão Muniz, Marlos Lucas, Análio Rodrigues, Victor Lima e Fernando Sousa pelo conhecimento, conselhos, suporte e compreensão.

A todos os meus amigos e familiares, pelo carinho e convívio que me ajudam a crescer diariamente.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.

A todos os que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse projeto.

RESUMO

Com a rápida expansão da Energia Eólica ocorrida no início do Século XXI no Brasil e no mundo, muitos aerogeradores de tecnologias distintas e inovadoras iniciaram suas operações. Muitas das consequências ambientais e operacionais dessa expansão ainda estão sendo estudadas e avaliadas. Entre as consequências ambientais pode-se citar o ruído provocado pelo funcionamento de aerogeradores de maior diâmetro, cujas frequências não são muitas vezes audíveis, ainda que perceptíveis ao cérebro humano. Neste trabalho foram feitas medições do ruído associado a aerogeradores no Estado do Ceará. Foi feita inicialmente a caracterização do ruído de aerogeradores, identificando fontes, frequências, composição, intensidades e impactos à saúde. Foram realizadas medições experimentais de som em Aerogeradores de grande porte do tipo *direct-drive* na cidade de Aracati, no Estado do Ceará, à luz da norma internacional IEC 61400-11, documentando a metodologia aplicada de forma que seja facilmente replicada. Os resultados experimentais foram tratados e analisados conforme a norma. Filtros foram aplicados a fim de se identificar as frequências e o tipos de ruídos mais relevantes no experimento, comparando-os com a literatura. Os procedimentos executados e documentados poderão ser aplicados comercialmente para a realização de medições de ruídos à luz da norma internacional, e em estudos futuros aplicados à manutenção preditiva e à engenharia ambiental.

Palavras-chave: Energia Eólica. Análise de Ruído. IEC 61400-11.

ABSTRACT

With the rapid expansion of wind power during the beginning of 21st century in Brazil and worldwide, many wind turbines of different and innovative technologies began operations. Many of the environmental and operational consequences of this expansion are still being studied and evaluated. Among the environmental consequences, one can mention the noise produced by larger diameter wind turbines, whose frequencies are often not audible, although perceptible to the human brain. In this work were made measurements of the noise associated with wind turbines in the state of Ceara. It was initially made the characterization of wind turbine noise, identifying sources, frequencies, composition, intensity and impacts to health. Experimental measurements of sound in large wind generators were made in direct-drive wind turbine generators, in the city of Aracati, State of Ceara, in the light of the international standard IEC 61400-11, documenting the methodology applied in a manner that is easily replicated. The experimental results were processed and analyzed according to the standard. Filters were applied in order to identify the frequency and types of most significant noise in the experiment, comparing them with the literature. The procedures performed and documented may be applied commercially to perform noise measurements under international standard, and in future studies applied to predictive maintenance and environmental engineering.

Keywords: Wind Energy. Noise Analysis. IEC 61400-11.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
ANSI	American National Standards Institute;
BNC	Conector Bayonet Neill Concelman;
DFIG	Doubly-Fed Induction Generator;
EWEA	European Wind Energy Association;
FFT	Fast Fourier Transform;
GWEC	Global Wind Energy Council;
IC	Intervalo de Confiança;
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional;
MDF	Medium-Density Fiberboard;
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico;
SPL	Sound Pressure Level;
SWL	Sound Power Level;
USB	Universal Serial Bus

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Turbina Eólica de Gedser - uma das primeiras grande turbinas eólicas entrar em operação	16
Figura 2.2	Evolução dos dispositivos de extração de energia eólica	17
Figura 2.3	Crescimento da capacidade instalada global	18
Figura 2.4	Capacidade instalada global acumulada	18
Figura 2.5	Crescimento da capacidade instalada por região	19
Figura 2.6	Maiores Produtores Mundiais (Capacidade Instalada)	20
Figura 2.7	Evolução do tamanho das turbinas eólicas	22
Figura 2.8	Evolução temporal da razão de máquinas que usam <i>pitch</i> e das que usam estol	23
Figura 2.9	Configurações de turbinas eólicas instaladas na Alemanha entre 1990 e 2008	24
Figura 2.10	Custos de implementação de turbinas eólicas	25
Figura 2.11	Custos com O&M de parques eólicos	25
Figura 2.12	Custos manutenção de turbinas eólicas por componente	26
Figura 2.13	Componentes responsáveis por paradas em turbinas eólicas	27

Figura 2.14 Representação de uma onda sonora propagando no ar	29
Figura 2.15 Fluxo de massa em um volume de controle na direção x.	32
Figura 2.16 Ilustração de geração de uma onda acústica	35
Figura 2.17 Representação de tipos de onda de pressão e seus espectros de frequência ..	36
Figura 2.18 Exemplos de Níveis de Pressão Sonora	39
Figura 2.19 Curvas de Mesmo Nível de Audibilidade para Tons Puros	40
Figura 2.20 Ponderações para Curvas A, B, C e G	45
Figura 2.21 Componentes principais de um aerogerador	46
Figura 2.22 Fenômenos aerodinâmicos que ocorrem em pás e são fontes de ruído aerodinâmico	50
Figura 3.1 Esquemática da Configuração final do Sistema de Aquisição de Dados Sonoros	59
Figura 3.2 Foto do sistema de Aquisição conectado ao Computador	60
Figura 3.3 Imagem do Software VA-Lab usado para aquisição das medições	60
Figura 3.4 Foto do microfone e espuma posicionados na placa de MDF	62
Figura 3.5 Esquema do posicionamento do microfone na placa de MDF	63
Figura 3.6 Esquema com o posicionamento do microfone em relação à torre e ao vento	65

Figura 3.7	Interface gráfica do programa utilizado - <i>Virtual Sound Level Meter</i>	66
Figura 4.1	Representação esquemática do Aerogerador estudado - IV-77	69
Figura 4.2	Foto do Aerogerador IMPSA IV77 tirada do ponto de medição	70
Figura 4.3	Representação dos níveis de pressão sonora com o tempo para Medição 03 - Sinal suavizado (<i>Slow</i>)	72
Figura 4.4	Representação dos níveis de pressão sonora com o tempo para Medição 03 - Sinal pouco suavizado (<i>Fast</i>)	72
Figura 4.5	Representação dos níveis de pressão sonora com o tempo para Medição 01 (a), 02 (b), 03 (c) e 04 (d) - Sinal pouco suavizado (<i>Fast</i>)	73
Figura 4.6	Comparativo entre sinal suavizada (destacada em vermelho) e sinal pouco sua- vizado para a exibição dos níveis de pressão sonora da medição 04	74
Figura 4.7	Representação dos níveis de pressão equivalente com o tempo para Medição 02 - Sem filtro	75
Figura 4.8	Representação dos níveis de pressão equivalente com o tempo para Medição 02 - Ponderação Nível A	75
Figura 4.9	Representação dos níveis de pressão equivalente com o tempo para Medição 02 - Ponderação Nível C	76
Figura 4.10	Comparativo entre Espectro de Frequências obtidos com método FFT (verde) e ANSI (azul) para a Medição 04	77
Figura 4.11	Comparativo entre espectros de frequência em bandas de 1/3 de oitavas e Ponderação A para medições 02 (verde), 03 (azul), e 04 (preto)	78

Figura 4.12 Espectro de frequência em bandas de 1/3 de oitavas e Ponderação A para medição 01	79
Figura 4.13 Análise de Ruído para Medição 01 - Ponderação Nível A	80
Figura 4.14 Análise de Ruído para Medição 02 - Ponderação Nível A	80
Figura 4.15 Análise de Ruído para Medição 03 - Ponderação Nível A	81
Figura 4.16 Análise de Ruído para Medição 04 - Ponderação Nível A	81
Figura 4.17 Comparativo entre densidade espectral de potência com Ponderação A para medições 02 (preto), 03 (azul), e 04 (marrom)	82
Figura 4.18 Espectrograma Medição 01 - Ponderação Nível A - Cores representando Intensidade em dBA	83
Figura 4.19 Espectrograma Medição 03 - Ponderação Nível A - Cores representando Intensidade em dBA	83
Figura 4.20 Níveis de Potência Acústica medidos por potência nominal	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Capacidade global instalada de energia eólica (MW)	21
Tabela 2.2	Ponderações para Curvas A, B e C	42
Tabela 2.3	Ponderações para Curvas G	44
Tabela 2.4	Níveis de Pressão acústica e meio de transmissão de ruídos mecânicos em um aerogerador experimental de 2MW	49
Tabela 2.5	Mecanismos do Ruído Aerodinâmico em aerogeradores	51
Tabela 2.6	Resultados de experimento psicoacústico na Holanda	53
Tabela 2.7	Níveis Permitidos de Ruído para alguns países com níveis de pressão sonora medidos em L_{Aeq} [dB(A)]	55
Tabela 2.8	Níveis Permitidos de Ruído para o Brasil, com níveis de pressão sonora medidos em L_{Aeq} [dB(A)]	56
Tabela 3.1	Especificações do Sistema de Aquisição de Dados MC 3242	58
Tabela 3.2	Especificações do Microfone MPA231	59
Tabela 3.3	Especificações do Calibrador CA111	61
Tabela 4.1	Características das Medições Realizadas	71
Tabela 4.2	Níveis de Pressão e Potência Acústica para as medições realizadas	84

SUMÁRIO

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Problema Abordado	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Justificativa	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 A Energia Eólica	15
2.1.1 <i>Evolução</i>	15
2.1.2 <i>Panorama Global</i>	17
2.1.3 <i>Tecnologia</i>	20
2.1.4 <i>Custos</i>	24
2.1.5 <i>Manutenção</i>	26
2.1.6 <i>Impactos Ambientais</i>	27
2.2 Som	29
2.2.1 <i>Definição e Características</i>	29
2.2.2 <i>Ruído</i>	29
2.2.3 <i>Equacionamento da Onda Acústica</i>	30
2.2.4 <i>Frequência</i>	34
2.2.5 <i>Bandas de Frequência</i>	37
2.2.6 <i>Medições de Magnitude</i>	37
2.2.7 <i>Filtros e Ponderações</i>	40
2.3 Ruído em Aero geradores	45
2.3.1 <i>Componentes do Aero gerador</i>	45

2.3.2	<i>Tipos de ruídos gerados por Aerogeradores</i>	47
2.3.3	<i>Ruídos Mecânicos</i>	48
2.3.4	<i>Ruído Aerodinâmico</i>	49
2.4	Efeitos do Ruído provocado por Aerogeradores	52
2.5	Normas e Padrões de Medição	55
3	METODOLOGIA	58
3.1	Instrumentação	58
3.2	Procedimento Experimental	64
3.3	Tratamento de Dados Experimentais	66
3.3.1	<i>Nível de Pressão Sonora</i>	66
3.3.2	<i>Nível de Pressão Sonora Equivalente - L_{eq}</i>	67
3.3.3	<i>Análise de Bandas de 1/3 de oitava</i>	67
3.3.4	<i>Análise de Ruído NC (Noise Criteria) e RC (Room Criteria) Mark II</i>	68
3.3.5	<i>Densidade Espectral de Potência</i>	68
3.3.6	<i>Espectrograma</i>	68
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	69
4.1	Condições Experimentais	69
4.2	Resultado das Medições	71
4.2.1	<i>Nível de Pressão Sonora</i>	71
4.2.2	<i>Nível de Pressão Sonora Equivalente - L_{eq}</i>	74
4.2.3	<i>Análise de Frequências exibidas em Bandas de 1/3 de oitava</i>	76
4.2.4	<i>Análise de Ruído NC (Noise Criteria) e RC (Room Criteria) Mark II</i>	79
4.2.5	<i>Densidade Espectral de Potência</i>	81
4.2.6	<i>Espectrograma</i>	82
4.2.7	<i>Níveis de Potência Sonora</i>	84
5	CONCLUSÃO	86
5.1	Conclusão	86
5.2	Recomendações de trabalho futuro	87

Referências 88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problema Abordado

Atualmente a maior parte da energia produzida pelo homem vem de combustíveis fósseis. Essas fontes, além de serem finitas e poluentes, estão concentradas em determinadas regiões do globo, e por isso são motivo de conflitos militares e/ou econômicos entre povos e nações. Como alternativa a essas fontes de energia, várias fontes renováveis têm sido estudadas e utilizadas, entre elas a energia eólica.

A energia eólica é desde muito conhecida pelo homem, entretanto é recente seu uso em larga escala e com alta eficiência. Apesar de ser uma fonte de energia dita limpa, e com impactos ambientais muito reduzidos, alguns aspectos inerentes a essa tecnologia ainda são fontes de preocupações. O ruído produzido por aerogeradores, por exemplo, pode vir a prejudicar populações humanas em localidades próximas a aerogeradores. Em decorrência disso, normas internacionais foram criadas a fim de se manter um rígido controle sobre o ruído de aerogeradores, como por exemplo a norma IEC 61400-11 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002), da Comissão Eletrotécnica Internacional, IEC, ou a NBR 10151 (NBR 10151, 2000), da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. A aplicabilidade dessas normas pode vir a inviabilizar a implementação de parques eólicos em determinadas localidades.

Sendo assim, a medição do ruído sonoro emitido por aerogeradores pode trazer benefícios não só ao produtor de energia como ao agente regulador, que poderá verificar a aplicabilidade das normas. Simulações numéricas também podem ser feitas a fim de se identificar, ainda que aproximadamente, o impacto que um determinado parque eólico pode vir a ter em uma dada região.

Esse ruído pode ter basicamente três fontes: o ruído aerodinâmico gerado pela rotação das pás no fluido, o ruído estrutural devido à vibração da estrutura e o ruído mecânico devido ao atrito de rolamentos e engrenagens confinados na nacela.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivos o estudo, a medição e a análise de ruído de aerogeradores de grande porte no Estado do Ceará. O estudo tem o objetivo de caracterizar os ruídos produzidos por aerogeradores de grande porte e elaborar uma metodologia de medição de ruído de aerogeradores de grande porte, baseada na norma IEC 61400-11 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002), que possa ser facilmente replicada, inclusive para análise de ruídos de baixa frequência. Posteriormente aplica-se a metodologia para a medição do ruído gerado por Aerogeradores de Grande Porte no município de Aracati, no Ceará. Os resultados obtidos serão filtrados e analisados com a ajuda de rotinas computacionais.

1.3 Justificativa

O desenvolvimento da metodologia, assim como sugestões de análises dos dados foram feitas sob a ótica da Engenharia Ambiental e da Engenharia de Manutenção, os dois campos da produção de energia eólica onde o ruído torna-se mais relevante.

No campo da Engenharia Ambiental, pode-se realizar estudos que motivem a criação de legislações específicas, de forma a proteger a população que habita próximo a aerogeradores.

Na Engenharia de Manutenção, pode-se utilizar o estudo de ruído como método de manutenção preditiva, acompanhando a vida útil de componentes, especialmente de pás, de forma mais precisa e econômica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Energia Eólica

2.1.1 *Evolução*

O vento é usado há muito tempo pelo homem como fonte de energia. Os primeiros moinhos de vento com eixo vertical utilizados datam de milhares de anos atrás (moinhos de vento encontrados no Afeganistão datam de 200 a.C.) e moinhos de eixo horizontal são usados pelo menos desde 1300 d.C. A energia eólica era inicialmente usada para moer grãos, mas a partir do século XIX começou a ser usada para bombear água de poços. O uso para gerar energia elétrica data de 1888, e as primeiras grande turbinas eólicas após a Segunda Guerra Mundial (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011). Dentre as primeiras turbinas pode-se destacar a de Gedser, na Dinamarca, uma tri-pá com 24 metros de diâmetro e potência de 200kW que operou de 1959 a 1967 (GIPE, 2004), que pode ser vista na Figura 2.1.

Figura 2.1: Turbina Eólica de Gedser - uma das primeiras grande turbinas eólicas entrar em operação

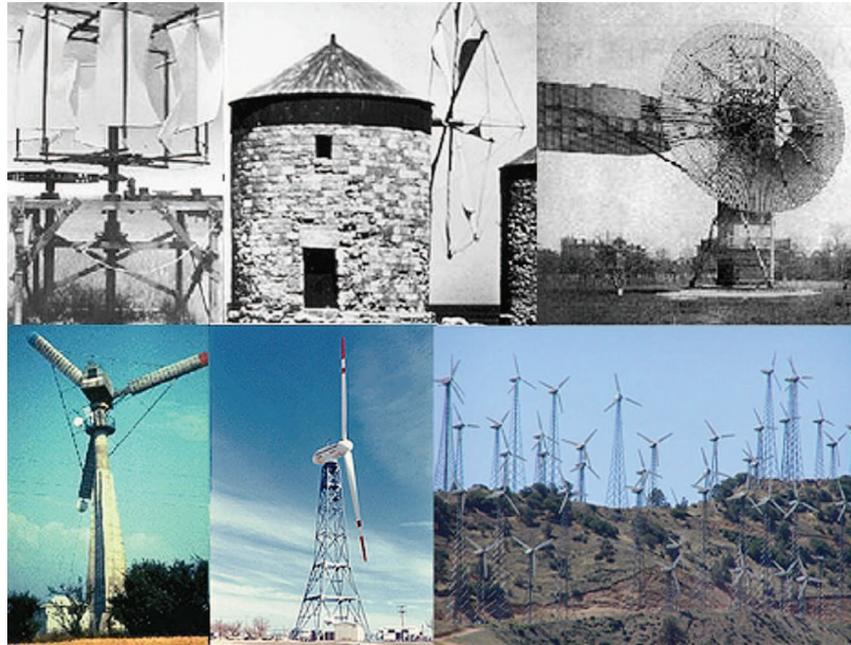


Fonte: (PIGGOTT, 2013)

Com a primeira crise do petróleo em 1973, os investimentos em energias alternativas aumentaram bastante, e a tecnologia de geração de energia eólica teve um grande desenvolvimento. Nesse contexto, uma grande quantidade de turbinas entraram em operação na Califórnia de 1981 a 1990, com potências entre 20 e 350 kW, gerando um total de 1,7GW (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011). No início da década de 1990 esse setor cresceu bastante na Europa e nos últimos vinte anos essa fonte de energia tem se espalhado em todas as regiões do mundo.

A Figura 2.2 ilustra a evolução dos dispositivos usados para a obtenção da energia eólica desde os moinhos primitivos à "explosão" observada na década de 1980 na Califórnia.

Figura 2.2: Evolução dos dispositivos de extração de energia eólica



Fonte: (DODGE, 2006)

2.1.2 *Panorama Global*

Segundo os últimos dados oficiais (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2015), a capacidade global instalada de energia eólica cresceu 51GW em 2014, totalizando mais de 369GW ao fim de 2014. O crescimento da capacidade global instalada tem sido bastante expressivo, como se pode ver na Figura 2.3. Ao se observar o acumulado, na Figura 2.4, verifica-se que a capacidade instalada global teve um comportamento crescente com o tempo, o que reflete os investimentos cada vez maiores em fontes de energia alternativas à térmica. Os grandes produtores e maiores investidores em energia eólica são a China e os Estados Unidos, representando juntos mais 48% da produção mundial.

Figura 2.3: Crescimento da capacidade instalada global



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2015)

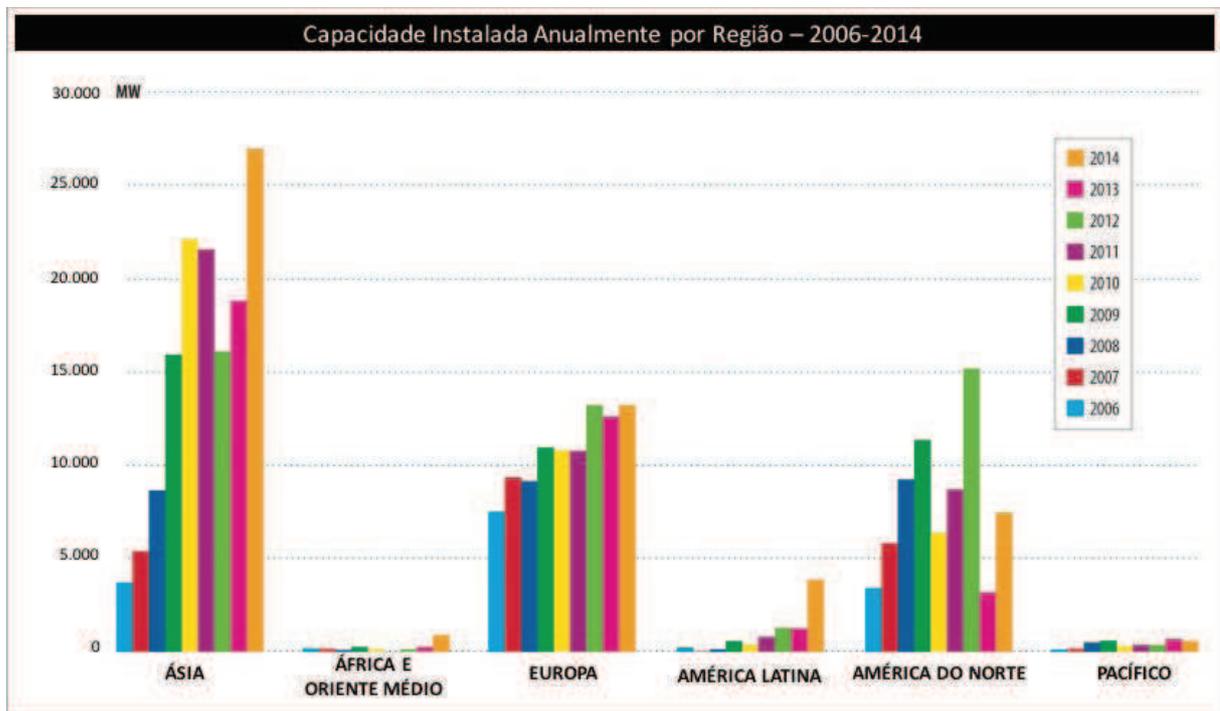
Figura 2.4: Capacidade instalada global acumulada



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2015)

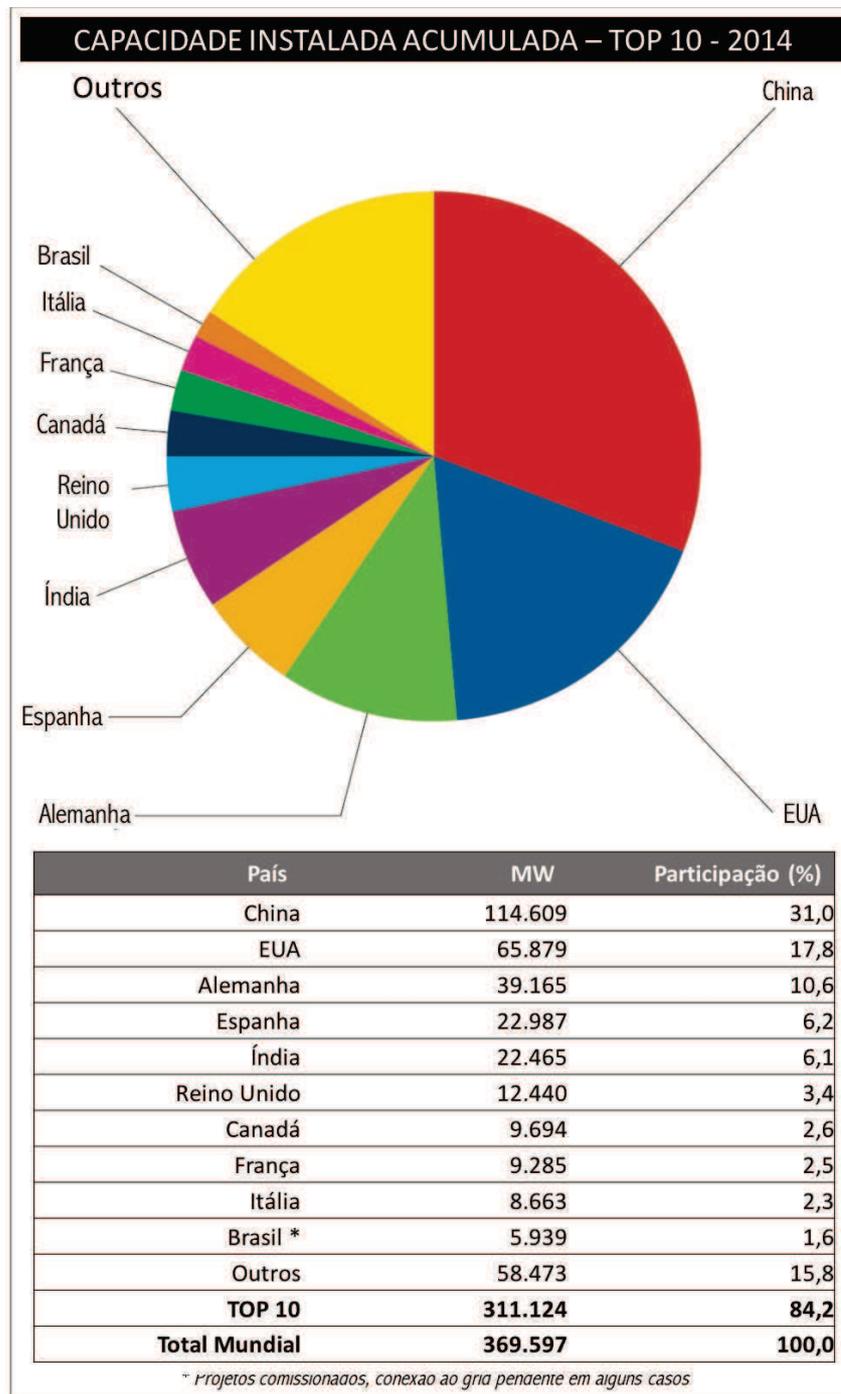
Um panorama global da energia eólica, com dados de 2014, pode ser observado na Figura 2.5 e na Figura 2.6. Alguns dados, incluindo do Brasil, podem ser melhor visualizados na Tabela 2.1, onde se vê que, apesar de sua posição privilegiada, o Brasil possui menos de 2% da capacidade global instalada, mas teve um crescimento de 71% em 2014.

Figura 2.5: Crescimento da capacidade instalada por região



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2015)

Figura 2.6: Maiores Produtores Mundiais (Capacidade Instalada)



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2015)

2.1.3 Tecnologia

A partir dos dados vistos na seção anterior, verifica-se que a energia eólica vem em franca expansão no mundo, com crescimento expressivo no Brasil, China e EUA. Apesar disso,

Tabela 2.1: Capacidade global instalada de energia eólica (MW)

	Total 2013	Novos em 2014	Total 2014
RP China	91.413	23.196	114.609
EUA	61.110	4.854	65.879
Alemanha	34.250	5.279	39.165
Espanha	22.959	28	22.987
Índia	20.150	2.315	11.465
Reino Unido	10.711	1.736	12.440
Itália	8.558	108	8.663
França	8.243	1.042	9.285
Canadá	7.823	1.871	9.694
Portugal	4.730	184	4.914
América Latina e Caribe	4.777	3.749	8.526
Brasil	3.466	2.472	5.939
Mundo	318.644	51.473	369.597

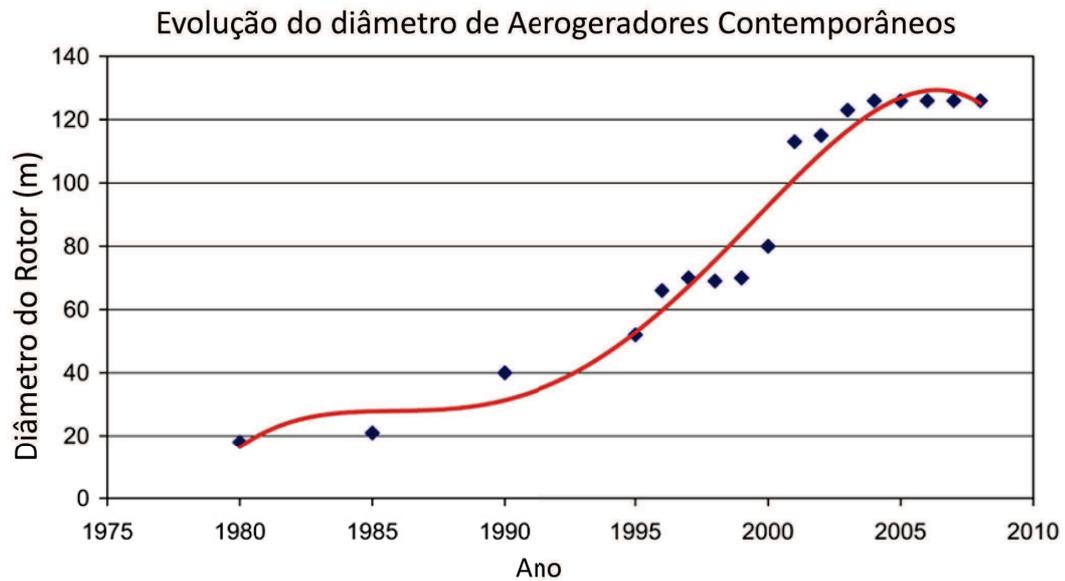
Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2015)

é uma tecnologia recente, ainda em amadurecimento.

A evolução tecnológica das turbinas eólicas inicia-se com turbinas menores, de 20m de diâmetro ou menos. Nesses casos, as pás eram inicialmente fixas e o controle de velocidade era dado por estol (em inglês *stall*), ou seja, ao chegar-se a uma dada velocidade o arrasto aumentava a ponto de provocar a diminuição da velocidade de rotação das pás. Entre os problemas desse tipo de equipamento, pode-se citar a reduzida e limitada geração de energia e a dificuldade (ou impossibilidade) de se parar mecanicamente a rotação das pás na presença de ventos, que gerava problemas com manutenção e até perdas dos equipamentos.

Para se solucionar o primeiro problema, os equipamentos passaram a ter pás (e consequentemente diâmetros) cada vez maiores. Assim suas áreas aumentaram gradualmente, assim como sua potência. Esse crescimento foi muito intenso nos últimos 30 anos, com uma tendência a estabilização nos últimos 10 anos, como pode-se ver na Figura 2.7.

Figura 2.7: Evolução do tamanho das turbinas eólicas



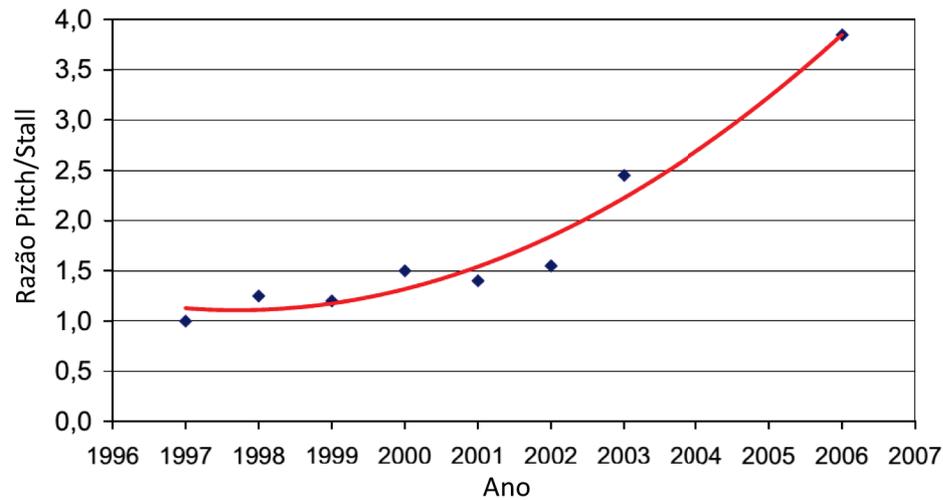
	Aerogerador	MW	Rotor (m)
Vestas	V112	3,0	112
GE	2.5xl	2,5	100
Gamesa	G128	4,5	128
Enercon	E-126	7,5	127
Suzlon	S88	2,1	88
Siemens	SWT-3.6-107	3,6	107
Sinovel	SL3000/113	3,0	113
Acciona	AW-119/3000	3,0	119
Nordex	N100	2,5	100
Repower	6M	6,1	126

Fonte: (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011)

Já o segunda problema foi solucionada com a inserção de um controle ativo de *pitch* (ângulo das pás). Esse controle permite que se mude o ângulo das pás a fim de aumentar sua eficiência, diminuir sua rotação ou mesmo pará-la. Esse tipo de controle ativo fornece várias vantagens em relação ao modelo de controle por estol, mas introduz uma complexidade a mais no equipamento (o sistema de *pitch*), que aumenta mais os custos de manutenção programada. Por esse fato, nem todos os fabricantes se utilizam do controle de *pitch*, apesar de seu uso sem atualmente bem superior ao controle por estol, como se pode ver na Figura 2.8.

Figura 2.8: Evolução temporal da razão de máquinas que usam *pitch* e das que usam estol

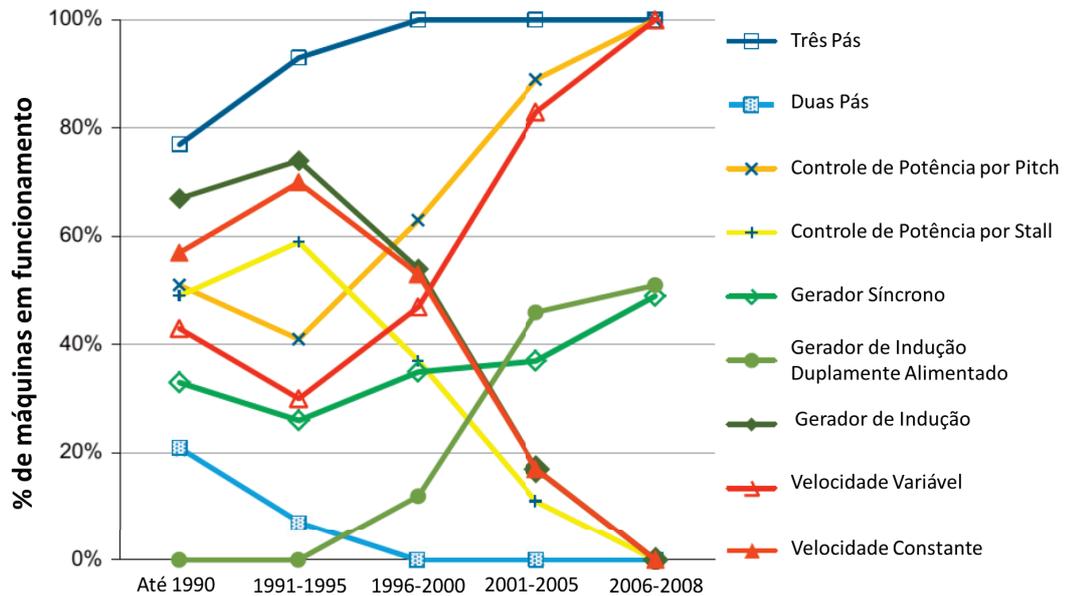
Participação de Máquinas com Controle de Potência por Pitch e por Stall



Fonte: (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011)

Entre as tendências tecnológicas atuais (PEREZ et al., 2013), pode-se citar também máquinas sem *gearbox* (que utilizam geradores síncronos), e máquinas com Geradores de Indução Duplamente Alimentados, ou DFIG (do inglês *Doubly-fed induction generators*). Máquinas que utilizam a tecnologia de geradores síncronos possuem menores perdas e menores custos com manutenção, com a desvantagem de um maior custo de fabricação do equipamento. Já máquinas que utilizam o sistema DFIG conseguem produzir uma maior quantidade de energia, mesmo em velocidades de vento baixas. A evolução das tecnologias aplicadas em turbinas eólicas pode ser vista na Figura 2.9.

Figura 2.9: Configurações de turbinas eólicas instaladas na Alemanha entre 1990 e 2008



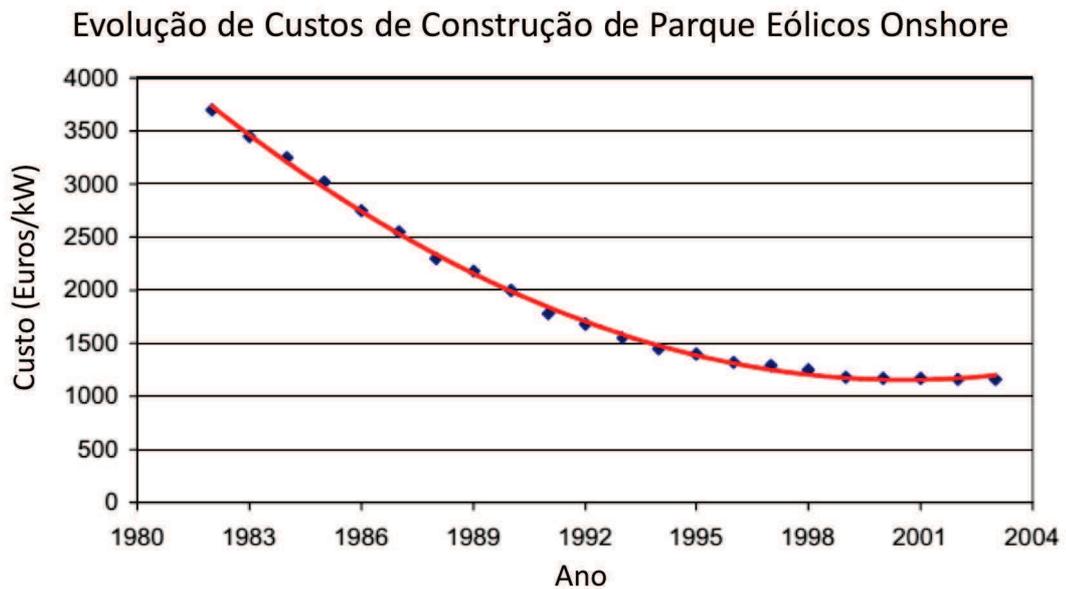
Fonte: (PEREZ et al., 2013)

2.1.4 Custos

Como em qualquer outra atividade econômica, os custos são muito importantes para análise da operação de turbinas eólicas. Através de análises de custo que se viabiliza ou não essa operação. Os custos podem ser de implementação e de operação e manutenção (O&M).

Os custos de implementação (investimento inicial) foram reduzidos drasticamente desde a década de 1980, estabilizando numa faixa entre 1000€/kW e 1400€/kW (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011), como pode-se ver na Figura 2.10. Desse total, mais de 70% corresponde à turbina e seus componentes, sendo o restante relacionado à conexão à rede elétrica, à fundação, sistemas de controle, custos financeiros, entre outros.

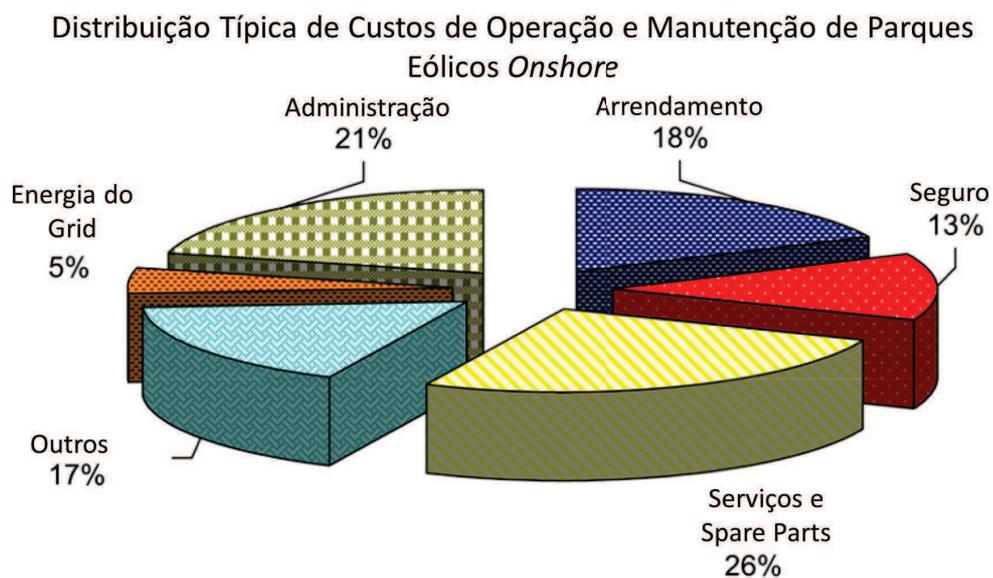
Figura 2.10: Custos de implementação de turbinas eólicas



Fonte: (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011)

Já os custos de O&M, podem ser vistos na Figura 2.11, onde é possível notar que os custos com a manutenção (serviços e spare parts) em si passam de 25% dos custos totais.

Figura 2.11: Custos com O&M de parques eólicos



Fonte: (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011)

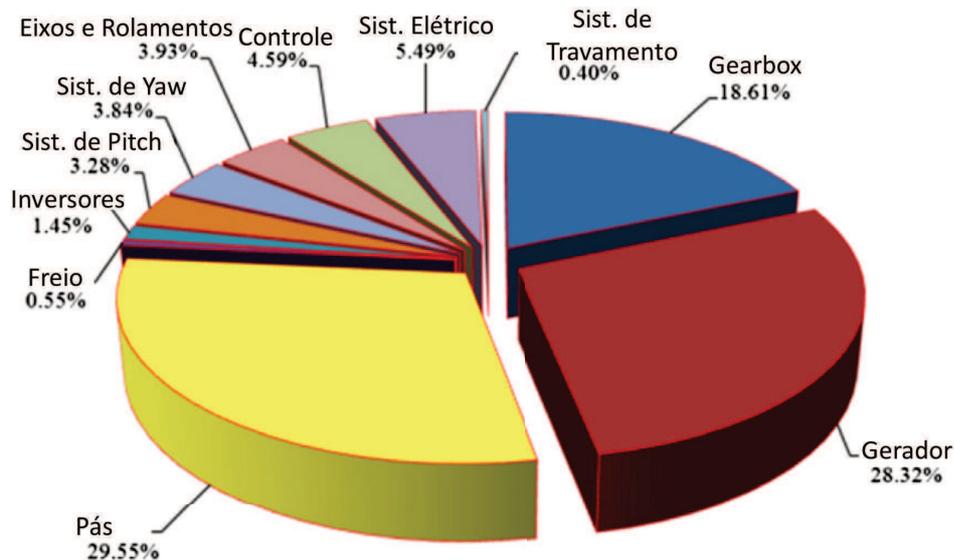
Somando as duas categorias, tem-se que os custos totais de um parque eólico *onshore*

na Europa pode variar de 50€/MWh a 75€/MWh (KALDELLI; D.ZAFIRAKIS, 2011). Números bem menores são encontrados no Brasil, onde em recentes leilões o preço máximo para o fornecimento de energia (de produtores à rede elétrica) foi de R\$ 126/MWh (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2013).

2.1.5 Manutenção

Como visto, os custos com manutenção são parte relevante do total de O&M. Desse total, mais de 65% é oriundo de manutenções corretivas ou não-programadas (LI et al., 2013). Na Figura 2.12 pode-se observar que mais de 75% dos custos com manutenção são oriundos das pás, do *gearbox* ou do gerador.

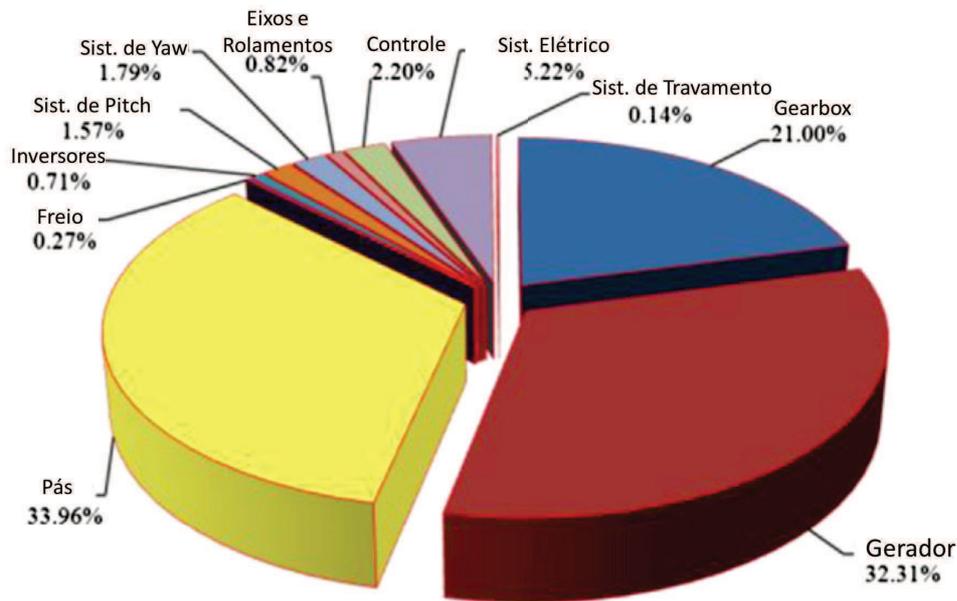
Figura 2.12: Custos manutenção de turbinas eólicas por componente



Fonte: (LI et al., 2013)

Além de gastos diretos, durante procedimentos de manutenção a turbina permanece sem gerar, gerando uma perda de produção para o operador do parque eólico, que se reflete em um impacto financeiro. Na Figura 2.13 pode-se visualizar os componentes responsáveis por esses períodos sem produção em uma turbina eólica.

Figura 2.13: Componentes responsáveis por paradas em turbinas eólicas



Fonte: (LI et al., 2013)

Estudos estão sendo feitos a fim de otimizar a manutenção em parques eólicos, seja através de novos métodos de monitoramento, de novas técnicas de manutenção preditiva ou simplificação de sistemas. É importante observar que o investimento em novas técnicas de monitoramento, de manutenções preditivas e preventivas tem como resultado uma diminuição nas manutenções corretivas, e na gravidade de falhas de grandes componentes, refletindo numa diminuição do custo.

Dentre os novos métodos de monitoramento, destaca-se monitoramentos por ruídos, explorado por (LI et al., 2013). Nesse trabalho, foi desenvolvido um método de análise de frequências nos ruídos para determinar anomalias no funcionamento da *gearbox*, e prevenir eventuais falhas maiores. É importante observar que eventuais mau-funcionamentos em pás podem ser detectadas através de análises vibratórias dessas, identificando falhas ainda no estágio inicial.

2.1.6 Impactos Ambientais

A energia eólica é considerada uma fonte limpa de energia, mas ainda assim possui riscos inerentes a sua operação. Dentre esses riscos, pode-se citar a poluição sonora, a exposição a campos eletromagnéticos, o "Shadow flicker", a poluição visual e os impactos à fauna local. O estudo desses riscos e de suas consequências é necessário para se construir um parque eólico, sendo importante desde a fase de projeto de um parque.

A poluição sonora, ou ruído, é o objeto principal desse trabalho, e pode ter fonte mecânica ou aerodinâmica, e interfere tanto em populações animais como em populações humanas. A distâncias médias (maiores que 500 m) o ruído gerado por aerogeradores possui intensidades não tão altas, frequências baixas e infrassom ((AMBROSE; RAND; KROGH, 2012) e (JAMES, 2012)). Esses, entretanto, afetam mais os seres humanos que sons de mesma intensidade produzidos por transportes ou atividades industriais, e podem induzir efeitos desagradáveis como dores de cabeça, insônia, vertigem, náusea, irritabilidade e até ataques de pânico ((AMBROSE; RAND; KROGH, 2012)). Essas consequências têm levado nações europeias a desestimular instalações *onshore* em troca de instalações *offshore*, mais caras tanto na instalação como na manutenção.

É essa a principal razão do estudo dos ruídos gerados por turbinas eólicas, e o motivo pelo qual este tem se intensificado nos últimos anos. Através desses estudos pode-se minimizar os efeitos de parques eólicos já existentes ou projetar novos parques eólicos menos danosos, garantindo que o potencial eólico *onshore* possa ser explorado com segurança (principalmente em países como o Brasil), ainda que esteja perto de cidades ou residências.

A exposição a campos eletromagnéticos decorrente de fontes eólicas de geração energética possuem quatro fontes potenciais: linhas de transmissão, aerogeradores, transformadores elétricos e rede subterrânea de cabos de energia (dentro de um parque ou complexo eólico). Não há consenso na comunidade científica sobre os riscos à saúde, entretanto a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer - IARC - classifica a exposição a campos eletromagnéticos no grupo 2B: possivelmente cancerígeno (LYON, 2002), e estudos recentes esse tipo de exposição à leucemia (LAGROYE et al., 2011). Como a presença de campos eletromagnéticos é maior em linhas de transmissão que em aerogeradores, esse risco associa-se mais à transmissão da energia de um parque que a um aerogerador isolado.

O Efeito Sombra, ou *Shadow Flicker*, ocorre quando o sol encontra-se com baixo ângulo em relação ao solo (sol nascente ou poente), e a rotação das pás forma grandes sombras intermitentes no solo. É um efeito mais relevante a distâncias de menos de 300 m de aerogeradores. Duram pouco tempo, cerca de 30 minutos, e pode causar náuseas, tontura ou desorientação em pessoas.

A poluição visual é uma grande preocupação para populações que vivem próximas a parques eólicos. Estudos mostram que a percepção do ruído de aerogeradores está associada à poluição visual (LAGROYE et al., 2011), tornando esse risco uma preocupação legítima e relevante para a fonte de energia eólica.

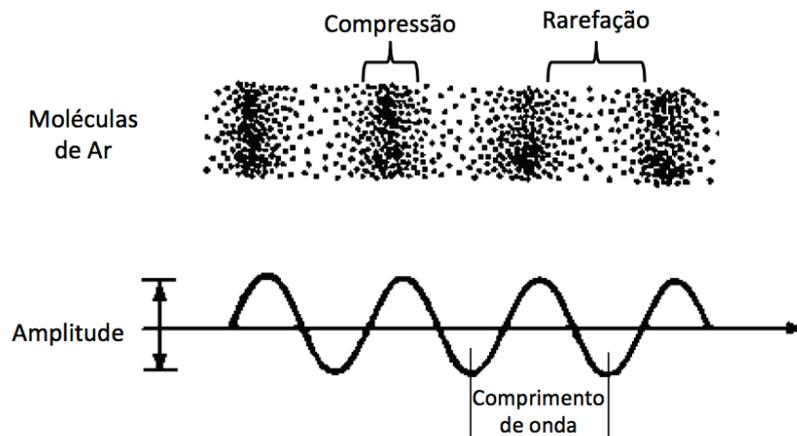
A presença de aerogeradores pode afetar de forma significativa a fauna local, em especial as aves, sejam elas residentes ou migratórias (SMALES, 2006). Seus efeitos mais relevantes são a perda e/ou alteração no habitat e a mortalidade devido a colisões.

2.2 Som

2.2.1 Definição e Características

Segundo (KINSLER, 2000), som é o resultado de variações de pressão, ou oscilações, em um meio elástico (como ar, água ou rochas), geradas por uma superfície vibrante ou por um escoamento turbulento. O som se propaga na forma de ondas longitudinais, envolvendo uma sucessão de compressões e rarefações no meio elástico, como visto na Figura 2.14, onde a representação é feita considerando o ar como o fluido de propagação.

Figura 2.14: Representação de uma onda sonora propagando no ar



Fonte: (GOELZER; HANSEN; SEHRNDT, 2001)

O som, ou onda acústica, somente pode existir em fluidos compressíveis (KINSLER, 2000). De acordo com a intensidade, as ondas acústicas podem ser audíveis, ultrassônicas, infrassônicas, de alta intensidade (lineares ou não lineares) e ondas de choque (explosões ou aeronaves voando a velocidades maiores que a da propagação do som).

2.2.2 Ruído

Pode-se definir ruído como "um som desagradável ou indesejado" (GOELZER; HANSEN; SEHRNDT, 2001). Do ponto de vista da acústica, som e ruído são formados pelo mesmo fenômeno físico, sendo a diferença entre eles essencialmente subjetiva. O que é som para uma pessoa pode ser ruído para outra. A análise de ruído é, portanto, complexa e consequência de múltiplos fatores como espectro de frequência, níveis de intensidade, tonalidade e tipo e distância da fonte emissora. Para aerogeradores, o som ambiente (ou "ruído de fundo") possuem intensidades relativamente baixas e os receptores tendem a estar algumas centenas de

metros da fonte.

2.2.3 Equacionamento da Onda Acústica

Para o equacionamento a seguir, os termos *elemento de fluido* e *partícula* significam uma porção infinitesimal do fluido grande o suficiente para conter milhões de moléculas de forma que o fluido seja considerado contínuo, mas pequena suficiente para que as variáveis acústicas sejam uniformes ao longo dela. Também serão feitas as seguintes considerações:

- O fluido é não-viscoso (não existem forças dissipativas atuando no fluido);
- A densidade e a pressão média são uniformes ao longo do fluido;
- O fluido é considerado compressível, mas somente pequenas variações na pressão média são permitidas;
- \vec{r} = Posição de equilíbrio de um elemento de fluido

$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \quad (2.1)$$

- $\vec{\xi}$ = deslocamento do elemento de fluido em relação a sua posição de equilíbrio

$$\vec{\xi} = \xi_x\hat{x} + \xi_y\hat{y} + \xi_z\hat{z} \quad (2.2)$$

- \vec{u} = velocidade da partícula de um elemento de fluido

$$\vec{u} = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} = u_x\hat{x} + u_y\hat{y} + u_z\hat{z} \quad (2.3)$$

- ρ = densidade instantânea em (x, y, z)
- ρ_0 = densidade de equilíbrio em (x, y, z)
- s = condensação em (x, y, z)

$$s = (\rho_0 - \rho) / \rho_0 \quad (2.4)$$

- $\rho - \rho_0 = \rho_0 s$ = densidade acústica em (x, y, z)
- P = pressão instantânea em (x, y, z)
- P_0 = pressão de equilíbrio em (x, y, z)

- p = pressão acústica em (x, y, z)

$$p = P - P_0 \quad (2.5)$$

- c = velocidade do som do fluido.

Para obter-se a equação simplificada da onda acústica parte-se inicialmente da equação de estado (KINSLER, 2000). Para fluidos em geral (que não sejam gases perfeitos), pode-se estabelecer uma relação entre a variação da pressão (P) e a densidade (ρ) em torno do equilíbrio utilizando a expansão de Taylor

$$P = P_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0) + \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots \quad (2.6)$$

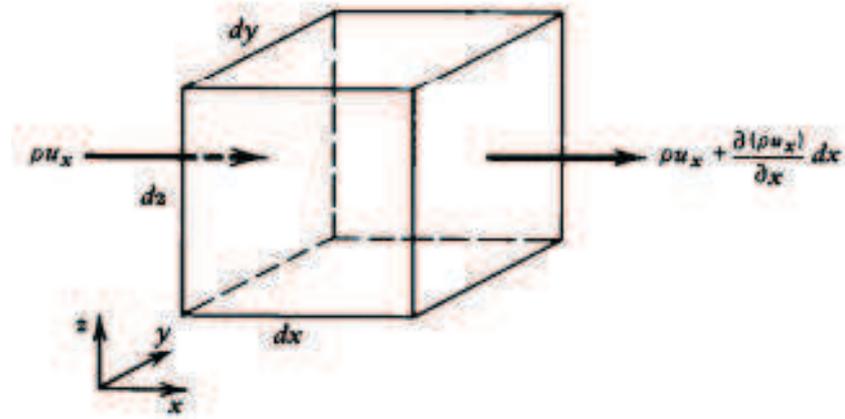
Para pequenas flutuações, basta tomar os termos de primeira ordem. Considerando $k = \rho_0 (\partial P / \partial \rho)_{\rho_0}$ o módulo de compressibilidade, tem-se que a pressão acústica pode ser escrita conforme Equação 2.7, cuja principal restrição é que a compressão seja pequena.

$$p \approx Ks \quad (2.7)$$

Da equação da continuidade, e considerando a convenção da Figura 2.15, pode-se representar o fluxo de massa num volume de controle, na direção x conforme

$$\left[\rho u_x - \left(\rho u_x + \frac{\partial (\rho u_x)}{\partial x} dx \right) \right] dydz = - \frac{\partial (\rho u_x)}{\partial x} dV \quad (2.8)$$

Figura 2.15: Fluxo de massa em um volume de controle na direção x.



Fonte: (KINSLER, 2000)

Considerando que resultado similar pode ser obtido para os eixos y e z, e que a massa do volume aumenta com a taxa de $(\partial\rho/\partial t) dV$, chega-se à equação da continuidade, Equação 2.9.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0 \quad (2.9)$$

Considerando que $\rho = \rho_0(1 + s)$ ρ_0 é **uma função suficientemente pouco dependente do tempo** e que s é **muito pequena**, pode-se simplificar a primeira parte da Equação 2.9, como visto na Equação 2.10.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho_0(1 + s))}{\partial t} = \frac{\partial\rho_0}{\partial t} + \frac{\partial s\rho_0}{\partial t} \cong \rho_0 \frac{\partial s}{\partial t} \quad (2.10)$$

A segunda parte da Equação 2.9 pode ser expandida, como visto na Equação 2.11. Cada termo desta equação pode ser expandido (na Equação 2.12 é feito para a coordenada x), chegando-se finalmente à formulação da Equação 2.13.

$$\nabla \cdot (\rho\vec{u}) = \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} = \frac{\partial(\rho_0(1 + s)u_x)}{\partial x} = \frac{\partial(\rho_0 u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(s\rho_0 u_x)}{\partial x} \cong \frac{\partial(\rho_0 u_x)}{\partial x} \quad (2.12)$$

$$\rho_0 \frac{\partial s}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{u} = 0 \rightarrow \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.13)$$

Considerando novamente a Figura 2.15, pode-se realizar o balanço de forças conforme a Equação 2.14, onde a força é dividida entre gradiente de pressão e força gravitacional.

$$d\vec{f} = -\nabla P dV + \vec{g}\rho dV \quad (2.14)$$

Sabe-se que a aceleração de um elemento de fluido em um dado instante pode ser definida como na Equação 2.15. Usando a expansão da série de Taylor para encontrar o termo $\vec{u}(x+dx, y+dy, z+dz, t+dt)$, chega-se à Equação 2.16, onde o operador $(\vec{u} \cdot \nabla)$ é definido conforme a Equação 2.17.

$$\vec{a} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\vec{u}(x+dx, y+dy, z+dz, t+dt) - \vec{u}(x, y, z, t)}{dt} \quad (2.15)$$

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \quad (2.16)$$

$$(\vec{u} \cdot \nabla) = u_x \frac{\partial}{\partial x} + u_y \frac{\partial}{\partial y} + u_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.17)$$

Aplicando a Equação 2.16 na Equação 2.14, chega-se à Equação 2.18.

$$d\vec{f} = \vec{a} dm = \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) \rho dV = -\nabla P dV + \vec{g}\rho dV \Rightarrow \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) \rho = -\nabla P + \vec{g}\rho \quad (2.18)$$

Caso não houvesse excitação acústica, $\nabla P_0 = \vec{g}\rho_0$, ou seja, $\nabla P = \nabla p + \vec{g}\rho_0$. Aplicando esse resultado na Equação 2.18 e trabalhando a equação chega-se à Equação

$$(1+s) \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \vec{g}s \quad (2.19)$$

Considerado que $|\vec{g}s| \ll \frac{|\nabla p|}{\rho_0}$, que $|s| \ll 1$ e que $|(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}| \ll \left| \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right|$, pode-se simplificar a Equação 2.19 na forma da Equação

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \quad (2.20)$$

Aplicando o operador divergência $\nabla \cdot$ à Equação 2.20, derivando Equação 2.13 em função do tempo chega-se à Equação 2.21.

$$\rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \nabla^2 p \quad (2.21)$$

Diferenciando duas vezes a Equação 2.7 em função do tempo e aplicando na Equação 2.21, chega-se à Equação da Onda Acústica, Equação 2.22, onde c é a velocidade do som no fluido definida como $c = \sqrt{\frac{k}{\rho_0}}$, k é o módulo de compressibilidade do fluido e ρ_0 é a densidade estática do fluido.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p \quad (2.22)$$

A Equação 2.22 é solucionada de acordo com o tipo da onda acústica e da fonte sonora, desacoplando a componente dependente do tempo da componente dependente do espaço. É comum a essas soluções expressar a onda com uma dada frequência e uma dada amplitude.

Quando uma onda sonora se propaga no ar, as oscilações na pressão ocorrem acima e abaixo da pressão atmosférica ambiente. A velocidade do som no ar é aproximadamente 343 m/s a 20 °C e aumenta com a queda da temperatura.

2.2.4 Frequência

As características apresentadas até agora se aplicam a um tom puro (onda sonora de única frequência), que pode ser representada pela Figura 2.14. Tons puros (uma única frequência) não ocorrem normalmente na natureza. Assim, os sons percebidos são na verdade uma complexa composição de numerosas ondas sonoras, misturas de variações de pressão que variam com a fase, frequência e amplitude.

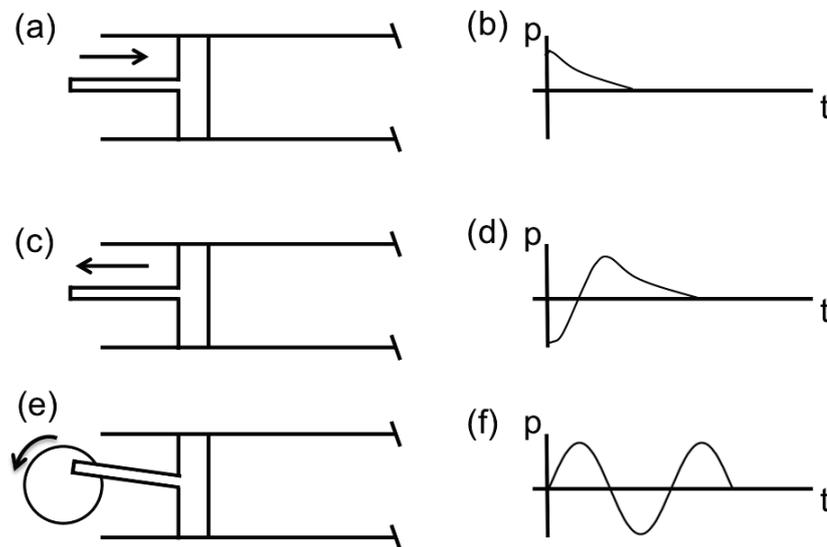
O ouvido humano possui um intervalo de audibilidade de 20 Hz a 20kHz, mas frequências mais baixas podem também ser ouvidas ou percebidas em altas intensidades. O ouvido é mais sensível a algumas frequências que a outras, e a sensibilidade pode variar de um indivíduo para

outro. Assim, considera-se sons de baixa frequência os sons que possuem frequência próxima ao limite da percepção humana, de 10 Hz a 200 Hz, e sons infrassom os sons cuja frequência esteja abaixo de 20 Hz.

Na teoria ondulatória qualquer sinal pode ser considerado como uma combinação de uma dada quantidade (possivelmente infinita) de ondas senoidais, sendo cada onda senoidal um componente do espectro de frequência do sinal (KINSLER, 2000).

Para ilustrar essa composição de ondas senoidais na formação de um sinal, e estabelecer um paralelo entre ondas transversais (de mais fácil visualização e compreensão) e ondas longitudinais, pode-se tomar como exemplo um pistão móvel ao final de um longo tubo preenchido com ar, como na Figura 2.16.

Figura 2.16: Ilustração de geração de uma onda acústica



Fonte: (GOELZER; HANSEN; SEHRNDT, 2001)

Considere que o pistão Figura 2.16 se move para frente. Como o ar possui inércia, somente o ar imediatamente próximo à face do pistão se move, em princípio, e a pressão do elemento de ar próximo ao pistão aumenta. O elemento de ar sob compressão próximo ao pistão se expande à frente, movendo a próxima camada de ar e comprimindo o próximo elemento de volume. Um pulso de pressão é formado, e se desloca no tubo com velocidade igual à velocidade do som, c . A representação desse pulso nessa fase pode-se dar pela Figura 2.16b.

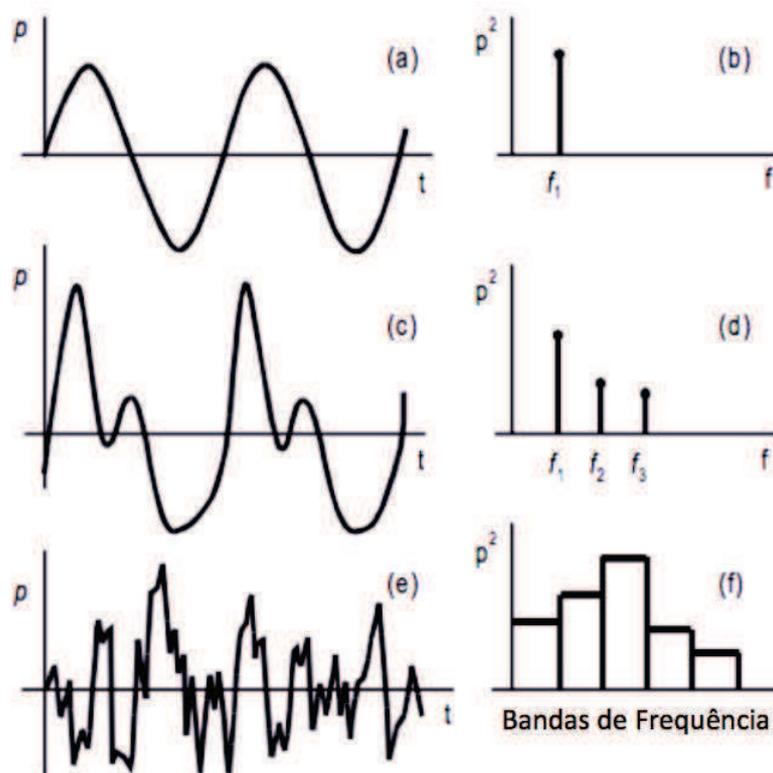
Caso o pistão pare, e imediatamente se mova para trás, uma rarefação é formada próxima à superfície do pistão, seguindo o pulso de compressão ao longo do tubo. A representação do pulso de pressão pode-se dar pela Figura 2.16d.

Caso o processo se repita ciclicamente, como por exemplo se o pistão estivesse atrelado

a um disco girante, como na Figura 2.16e, o resultado é uma onda de compressão e rarefação transmitida ao longo do tubo.

Se o pistão se move na forma de um movimento harmônico simples, uma onda senoidal é produzida, e a qualquer momento a distribuição de pressão ao longo do tubo terá a forma de uma senoide. Ou seja, em qualquer ponto fixo no tubo, a perturbação da pressão em função do tempo poderá ser representada por uma senoide. Esse tipo de perturbação é caracterizada por uma frequência única. A onda de pressão e seu espectro podem ser representados como na Figura 2.17a e b.

Figura 2.17: Representação de tipos de onda de pressão e seus espectros de frequência



Fonte: (GOELZER; HANSEN; SEHRNDT, 2001)

Se o pistão se mover de forma irregular, mas cíclica, por exemplo, de forma a produzir uma onda com a forma exibida na Figura 2.17c, o campo sonoro resultante será a combinação de senoides de várias frequências. O espectro, ou distribuição, de frequência dessa onda em particular está representado no espectro da Figura 2.17d. Como o movimento é cíclico, o espectro consiste em um conjunto de frequências discretas.

Ainda que algumas fontes sonoras possuam componentes de frequência única, a maioria das fontes sonoras produzem uma onda de pressão desordenada e randômica ao longo do tempo, conforme representação na Figura 2.17e . Esse tipo de onda não possui componente

periódica, entretanto, com uma análise de Fourier, pode-se mostrar que a onda resultante pode ser representada como um conjunto de ondas de todas as frequências. Para uma onda do tipo randômico, o espectro de frequência pode ser representado, na forma de bandas de frequências, conforme o espectro da Figura 2.17f.

2.2.5 *Bandas de Frequência*

Devido à complexidade de representação de uma onda sonora, é mais conveniente estudar o domínio da frequência de um som que estudar sua pressão dinâmica (ZHU, 2004). Um espectro de frequência pode ser dividido em diversas bandas para simplificar sua representação. As bandas mais utilizadas para representar espectros são as bandas de oitavas, as bandas de um terço de oitavas (1/3 oitavas) e as bandas de um doze avos de oitavas (1/12 oitavas).

O que diferencia essas representações é a razão entre a menor frequência da banda e a maior frequência da banda. No caso das oitavas, a razão é de 2:1. Ou seja, a razão entre a frequência-limite inferior e a superior é 1/2 (ZHU, 2004). Dessa forma tem-se:

$$f_{\text{inf}} = \frac{f_{\text{central}}}{2^{1/2}}, \quad f_{\text{sup}} = 2^{1/2} f_{\text{central}}, \quad f_{\text{central}} = \sqrt{f_{\text{inf}} f_{\text{sup}}} \quad (2.23)$$

E para as bandas de um terço de oitavas:

$$f_{\text{inf}} = \frac{f_{\text{central}}}{2^{1/6}}, \quad f_{\text{sup}} = 2^{1/6} f_{\text{central}}, \quad f_{\text{central}} = \sqrt{f_{\text{inf}} f_{\text{sup}}} \quad (2.24)$$

2.2.6 *Medições de Magnitude*

Segundo (KINSLER, 2000), as duas principais medidas de magnitude de som são a Potência Acústica, SWL (do inglês *Sound Power Level*) e o Nível de Pressão Sonora ou SPL (do inglês *Sound Pressure Level*). A Potência Acústica é a potência por unidade de área da onda de pressão acústica; é uma propriedade da fonte do som, independente do meio, e representa o total de potência acústica emitida por esta. Já o Nível de Pressão Acústica é uma propriedade do som em uma dada localização, dependente de vários fatores como características da fonte, condições atmosféricas e absorção do som, e pode ser mensurada diretamente por meio de um microfone.

Como ouvido responde de forma não-linear a rápidas e entretanto pequenas excitações em um largo intervalo de frequências, é inconveniente representar os níveis de pressão acústica em unidades de pressão. Por essa razão, sons são apresentados na escala logarítmica, tendo como

unidades o decibel (dB) com 0 dB representando o limiar da audição humana. Nas Equação 2.26 e Equação 2.25 pode-se observar as definições para nível de pressão acústica (SPL) e nível de potência acústica (SWL) em decibéis, onde o nível de pressão acústica de referência (P_0) é 20×10^{-5} Pa e a potência acústica de referência (W_0) é 10^{-12} ((EVEREST; POHLMANN, 2009)).

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} (P/P_0) \quad [dB] \quad (2.25)$$

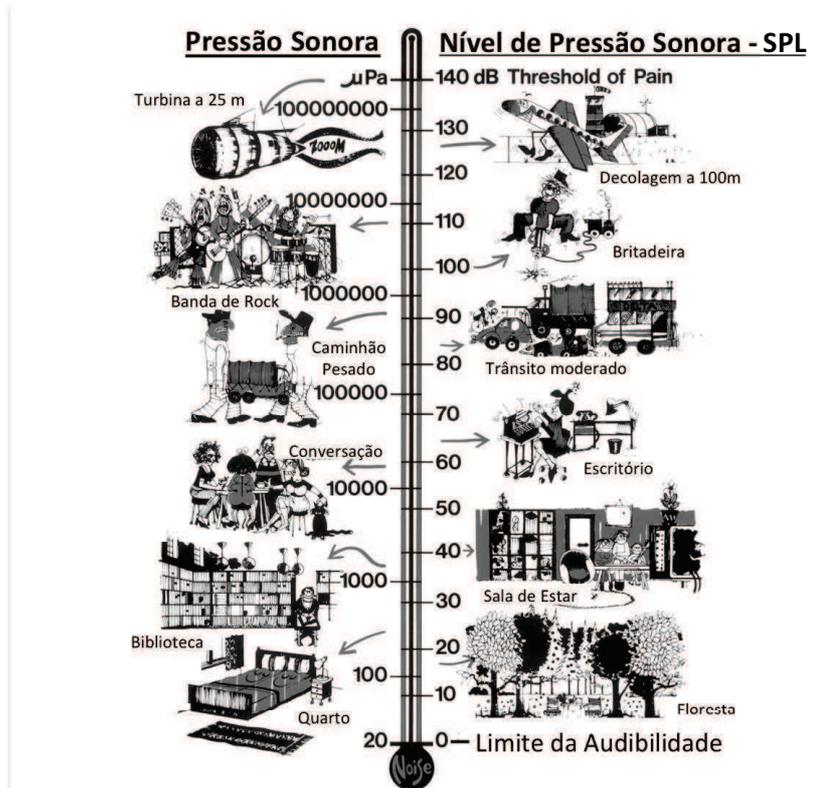
$$\text{SWL} = 10 \log_{10} (W/W_0) \quad [dB] \quad (2.26)$$

A resposta humana a sons medidos em decibéis tem as seguintes características (EVEREST; POHLMANN, 2009):

- Exceto em condições ideais (laboratório), uma mudança de 1 dB não pode ser percebida;
- A duplicação da energia de uma fonte sonora equivale a um aumento de 3 dB;
- Em condições normais, uma mudança de 3 dB é considerada como praticamente imperceptível;
- Uma mudança no nível de pressão sonora de 5 dB tipicamente resulta em uma alteração perceptível;
- Um aumento de 6 dB é equivalente a diminuir pela metade a distância de uma dada fonte;
- Um aumento de 10 dB é (subjetivamente) ouvido como aproximadamente um duplicação do som;
- O limite da dor é de aproximadamente 140 dB ou 200 Pa

A Figura 2.18 mostra um comparativo entre Pressão Sonora e Níveis de Pressão Sonora, SPL, para algumas situações.

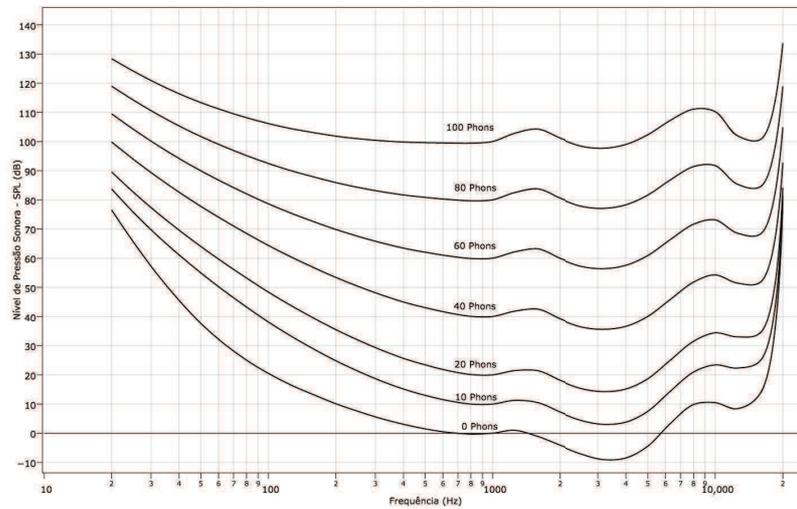
Figura 2.18: Exemplos de Níveis de Pressão Sonora



Fonte: (SYSTEMS, 2015)

O sistema auditivo humano percebe os sons de várias frequências de forma diferente, assim, a sensibilidade aos sons em certos níveis e frequências é maior que em outros. A norma (ISO226... , 2003) define curvas de mesmo nível de audibilidade para tons puros, que representam os níveis de pressão sonora para os quais cada percepção de um tom puro é constante ao longo de um intervalo de frequência (frequências audíveis). A Figura 2.19 representa algumas dessas curvas.

Figura 2.19: Curvas de Mesmo Nível de Audibilidade para Tons Puros



Fonte: (ISO226..., 2003)

As curvas na estão expressas em phon (ou fon), e representam o mesmo nível de audibilidade que o mesmo valor de Nível de Pressão Acústica SPL em dB do som na frequência de 1 kHz. Isso implica que 0 phon é o limite do audível, e sons inaudíveis possuem níveis phon negativos. A curva de 40 phon é a mais usada como referência em acústica.

O formato das curvas é similar para vários níveis de audibilidade, e demonstra que a sensibilidade do sistema auditivo reduz para baixas e altas frequências.

2.2.7 Filtros e Ponderações

Como mencionado anteriormente, o ouvido humano não é igualmente sensível ao som em diferentes frequências. Portanto, para avaliar adequadamente a exposição humana ao ruído, um sistema de medição de som deve levar em consideração esta diferença de sensibilidades ao longo da faixa audível. Para tanto, foram desenvolvidas curvas de ponderação, que são verdadeiros filtros de ponderação de frequência.

Estas curvas atribuem pesos às contribuições de diferentes frequências em relação ao nível de som em geral, de forma que níveis de pressão sonora são reduzidos ou aumentados como funções da frequência, levando em consideração um mesmo nível de audibilidade. Assim, sempre que as curvas de ponderação são usadas em sistemas de medição, as várias frequência que constituem o som contribuem diferentemente para a avaliação do som em geral.

As duas curvas de ponderação internacionalmente padronizadas mais usadas são a "A" e a "C", que foram construídas para correlacionar a resposta de frequência do ouvido hu-

mano de som para diferente níveis. Suas características são especificadas na IEC 61672 (IEC, 2002), e podem ser vistas na Tabela 2.2. Quando se aplica um desses filtros, indica-se o filtro utilizado na unidade, ou seja, aplicando a ponderação A, a unidade passa a ser dB(A).

Tabela 2.2: Ponderações para Curvas A, B e C

Freq. 1/3-oitava (Hz)	Ponderação A (dB)	Ponderação B (dB)	Ponderação C (dB)
10,0	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16,0	-56,7	-28,5	-8,5
20,0	-50,5	-24,2	-6,2
25,0	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40,0	-34,6	-14,2	-2,0
50,0	-30,2	-11,6	-1,3
63,0	-26,2	-9,3	-0,8
80,0	-22,5	-7,4	-0,5
100,0	-19,1	-5,6	-0,3
125,0	-16,1	-4,2	-0,2
160,0	-13,4	-3,0	-0,1
200,0	-10,9	-2,0	0,0
250,0	-8,6	-1,3	0,0
315,0	-6,6	-0,8	0,0
400,0	-4,8	-0,5	0,0
500,0	-3,2	-0,3	0,0
630,0	-1,9	-0,1	0,0
800,0	-0,8	0,0	0,0
1000,0	0,0	0,0	0,0
1250,0	0,6	0,0	0,0
1600,0	1,0	0,0	-0,1
2000,0	1,2	-0,1	-0,2
2500,0	1,3	-0,2	-0,3
3150,0	1,2	-0,4	-0,5
4000,0	1,0	-0,7	-0,8
5000,0	0,5	-1,2	-1,3
6300,0	-0,1	-1,9	-2,0
8000,0	-1,1	-2,9	-3,0
10000,0	-2,5	-4,3	-4,4
12500,0	-4,3	-6,1	-6,2
16000,0	-6,6	-8,4	-8,5
20000,0	-9,3	-11,1	-11,2

Fonte: (IEC, 2002)

Embora, a ponderação A de níveis de pressão sonora seja mais frequentemente utilizada para avaliar fontes de ruído ambiente, o filtro de ponderação A não é suficiente para avaliar adequadamente níveis de infrassons, pois reduz significativamente os níveis de pressão sonora no domínio do infrassom, sem levar em conta outros impactos potenciais. Níveis relativamente baixos de pressões sonoras com ponderação A podem ainda resultar em irritação significativa devido aos receptores devido a grandes amplitudes, ou flutuações temporais, que podem ser perdidos em análise, particularmente se períodos mais longos são usados. Um filtro especializado para infrassom chamado ponderação G é definido na ISO-7196. A Curva de ponderação G é especificada de modo a que o ganho zero seja aplicado a 10 Hz e seja linear com um declive de 12 dB por oitava dentro do intervalo de 1 a 20 Hz, como se mostra na . Abaixo e acima do domínio 1 Hz a 20 Hz encontram-se linhas de corte lineares íngremes com uma inclinação de 24 dB por oitava (ISO7196..., 1995). As respostas relativas para essa ponderação encontram-se na Tabela 2.3.

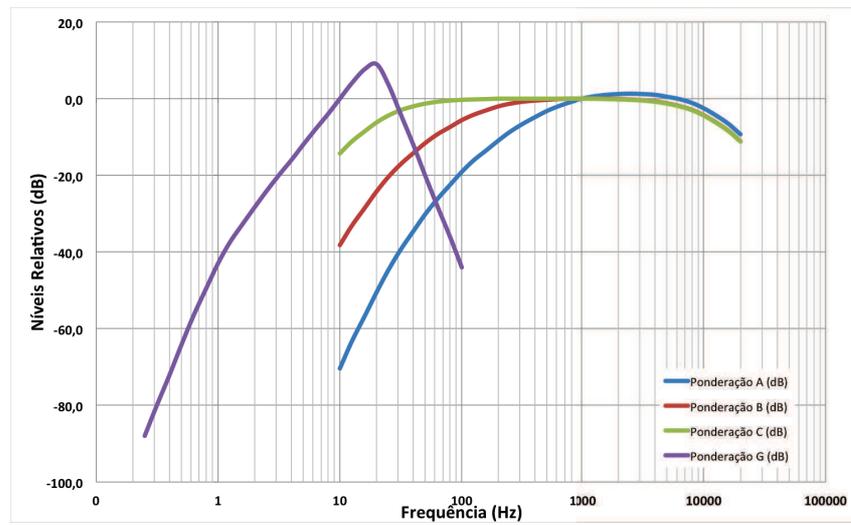
Tabela 2.3: Ponderações para Curvas G

Freq. Central 1/3 Oitava (Hz)	Resposta Relativa (dB)
0,250	-88,0
0,315	-80,0
0,400	-72,1
0,500	-64,3
0,630	-56,6
0,800	-49,5
1,000	-43,0
1,250	-37,5
1,600	-32,6
2,000	-28,3
2,500	-24,1
3,150	-20,0
4,000	-16,0
5,000	-12,0
6,300	-8,0
8,000	-4,0
10,000	0,0
12,500	4,0
16,000	7,7
20,000	9,0
25,000	3,7
31,500	-4,0
40,000	-12,0
50,000	-20,0
63,000	-28,0
80,000	-36,0
100,000	-44,0

Fonte: (ISO7196..., 1995)

A Figura 2.20 exhibe as respostas relativas para as ponderações mencionadas anteriormente.

Figura 2.20: Ponderações para Curvas A, B, C e G



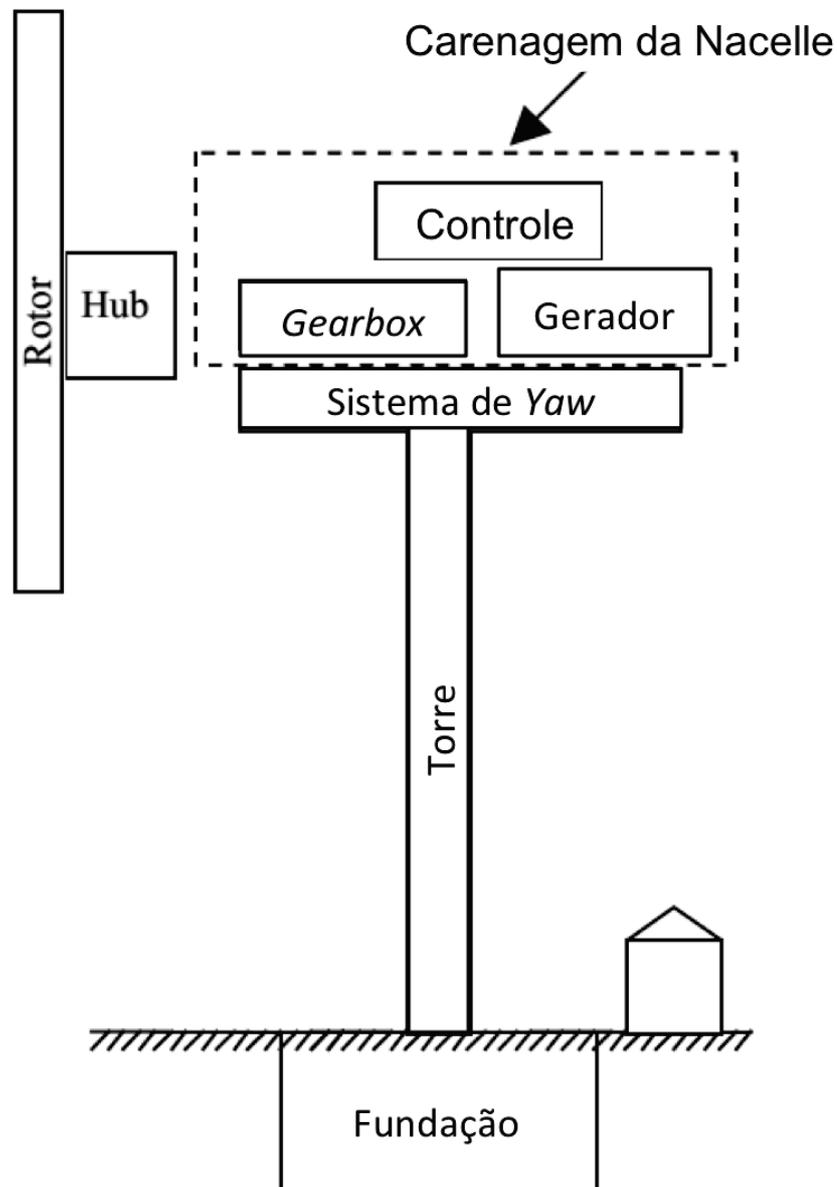
Fonte: (IEC, 2002)

2.3 Ruído em Aerogeradores

2.3.1 Componentes do Aerogerador

Os aerogeradores de eixo vertical (*HAWT*) atuais podem ser divididos em quatro grandes componentes: nacelle, rotor, torre e fundação, como exibidos na Figura 2.21.

Figura 2.21: Componentes principais de um aerogerador



Fonte: (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS., 2009)

1. **Nacelle:** Significa "bote" em francês, a nacelle encontra-se no topo da torre e envolve o *gearbox*, o gerador e demais componentes mecânicos e elétricos do aerogerador. O cubo que conecta as pás está atrelado uma das extremidades da nacelle. Elas variam de tamanho e formato, dependendo basicamente do design e tamanho do gerador, e pode pesar entre 20 e 70 toneladas. É o componente que horizontalmente na torre (*Yaw*) para permitir que o rotor se posicione de frente ao vento, independentemente de sua direção.
2. **Rotor:** É constituído pelo *hub* e pelas pás, com um eixo os conectando ao *gearbox* e/ou ao

gerador. A maioria dos aerogeradores possui três pás, comumente feitas de fibra carbono, fibra de vidro ou epóxi, e são aerodinamicamente projetadas para máxima geração de energia com o mínimo ruído. Aerogeradores de velocidade fixa ajustam automaticamente o ângulo de ataque de suas pás para manter a velocidade de rotação constante em todas as condições de vento. Já aerogeradores de velocidade variável rotacionam mais rápido à medida que a velocidade do vento aumenta, e usam eletrônicos de potência para garantir a tensão correta e frequência de saída. As pás podem exceder 60 metros em comprimento, formando rotores de 80 a 150 metros.

3. **Torres:** Torres possuem tipicamente entre três e cinco metros de diâmetro na base e afunila até de cerca de dois metros no topo. A sua altura varia com o tamanho do gerador e o comprimento das pás, e pode ter até 150 metros de altura. A altura é necessária para se ter acesso a ventos mais rápidos e menos variáveis que aqueles ao nível do solo. Podem ser feitas de concreto ou aço.
4. **Fundação:** São geralmente uma laje de concreto abaixo do solo, com 7-12 metros ou mais em diâmetro e 1 a 4 metros em profundidade. A base é coberto com um pedestal circular onde a torre do aerogerador é presa por meio de parafusos (conhecidos como prosioneiros).

2.3.2 Tipos de ruídos gerados por Aerogeradores

Existem quatro tipos de ruído que podem ser gerados pela operação de turbinas eólicas: tonal, banda larga, baixa frequência, e impulsivo:

1. **Tonal:** O som Tonal é definido como som em frequências discretas. É causada por componentes como engrenagens girantes, instabilidades não-aerodinâmicas interagindo com a superfície do rotor, ou fluxos instáveis sobre buracos, fendas ou um bordo de fuga rombudo ou irregular.
2. **Banda Larga:** É o som caracterizado por uma distribuição contínua de pressões acústicas com frequências superiores a 100 Hz. É muitas vezes causado pela interação das pás com a turbulência atmosférica, e também descrito como sons característicos de "assobio" (em inglês *swishing*) ou "uivado" (em inglês *whooshing*).
3. **Baixa Frequência:** É um som com frequências na faixa de 20 a 150 Hz, maioritariamente associado com rotores na configuração *upwind* (a favor do vento). É originado quando as pás interagem com fluxos irregulares originados pela presença da torre ou das forças de cisalhamento do escoamento.

4. **Impulsivo:** Este som é descrito como curto impulsos acústicos ou sons abafados (batidas) que variam em amplitude com o tempo. É causado pela interação das pás com fluxo de ar perturbado ao redor da torre em máquinas *downwind*.

As fontes de ruídos de aerogeradores em funcionamento podem ser divididas em duas categorias: ruídos mecânicos e ruídos aerodinâmicos ((WAGNER; BAREIS; GUIDATI, 1996)).

2.3.3 Ruídos Mecânicos

Ruídos mecânicos originam-se a partir do movimento relativo de componentes mecânicos e da resposta dinâmica entre eles. Fontes de tais sons incluem:

- *Gearbox*;
- Gerador;
- *Yaw Drives*;
- Fans de Resfriamento (*Cooling Fans*);
- Equipamentos Auxiliares (componentes hidráulicos ou elétricos).

Uma vez que o som emitido está associado com a rotação de equipamentos mecânicos e elétricos, ele tende a ser tonal (de uma frequência comum), embora possa ter um componente de banda larga. Por exemplo, tons puros pode ser emitida nas frequências de rotação de eixos, geradores, engrenagens. Além disso, o *hub*, o rotor e torre pode atuar como alto-falantes, transmitindo o som mecânico e irradiando-o.

O ruído pode ser transmitido por via aérea, *air-borne*, ou pela estrutura, *structure-borne*. Transmissão por via aérea significa que o som é propagado diretamente a partir da superfície ou interior do componente para o ar. A transmissão pela estrutura implica que o ruído seja transmitido ao longo outros componentes estruturais antes de ser irradiado para o ar.

Em seu estudo, (WAGNER; BAREIS; GUIDATI, 1996), fez uma avaliação do meio de transmissão e do nível de pressão acústica (SPL) de ruídos mecânicos de um aerogerador experimental de 2MW. Esses resultados experimentais encontram-se na Tabela 2.4.

Como visto, o *Gearbox* possui um papel muito relevante na geração de ruído mecânico, pois possui muitas parte girantes cujo objetivo é aumentar a rotação em uma proporção de 5:1. Em aerogeradores mais recentes, o ruído mecânico tem diminuído bastante, especialmente em aerogeradores do tipo *direct drive* (sem *gearbox*).

Tabela 2.4: Níveis de Pressão acústica e meio de transmissão de ruídos mecânicos em um aerogerador experimental de 2MW

Elemento	SPL (dBA)	Meio de transmissão
<i>Gearbox</i>	97.2	Estrutura
<i>Gearbox</i>	84.2	Aérea
Gerador	87.2	Aérea
<i>Hub</i> (do <i>Gearbox</i>)	89.2	Estrutura
Pás (do <i>Gearbox</i>)	91.2	Estrutura
Torre (do <i>Gearbox</i>)	71.2	Estrutura
Sistemas Auxiliares	76.2	Aérea

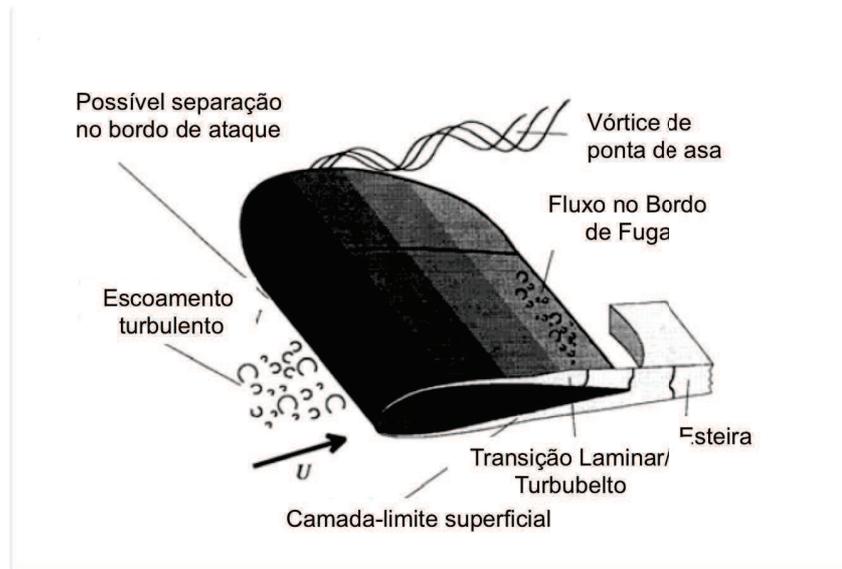
Fonte: (WAGNER; BAREIS; GUIDATI, 1996)

2.3.4 Ruído Aerodinâmico

O ruído de banda larga é tipicamente o maior componente das emissões acústicas de aerogeradores. Origina-se a partir do fluxo de ar em torno das pás. Como mostrado na Figura 2.22, um grande número de fenômenos aerodinâmicos complexos podem ocorrer, gerando ruído. O ruído aerodinâmico geralmente aumenta com a velocidade do rotor. Os diversos mecanismos de geração de som aerodinâmicos que devem ser considerados são mostrados na Tabela 1 (WAGNER; BAREIS; GUIDATI, 1996), e podem ser divididos em três grupos:

1. **Ruído de Baixa Frequência:** Som na região de baixa frequência do espectro sonoro, é gerado quando as pás encontram-se com irregularidades pontuais no fluxo, devido à presença da torre, mudanças na velocidade do vento ou interferência da esteira de outras pás.
2. **Ruído associado à Turbulência no Escoamento:** Depende da turbulência atmosférica. A turbulência atmosférica resulta em uma força local ou flutuações de pressão locais em torno da pá.
3. **Ruído de Forma do Perfil:** Conhecido como *Airfoil Self Noise*, este grupo inclui o som gerado pelo fluxo de ar ao longo da superfície do perfil. Este tipo de som possui uma natureza tipicamente de banda larga, mas componentes tonais pode ocorrer devido a bordos de fuga rombudos ou irregulares, ou fluxos sobre fendas e buracos.

Figura 2.22: Fenômenos aerodinâmicos que ocorrem em pás e são fontes de ruído aerodinâmico



Fonte: (WAGNER; BAREIS; GUIDATI, 1996)

Tabela 2.5: Mecanismos do Ruído Aerodinâmico em aerogeradores

Tipo ou Indicação	Mecanismo	Principais características e importância
Ruído de Baixa Frequência		
Ruído de Espessura e ruído de carga em regime permanente	Rotação das pás ou de superfícies sustentadoras	Frequência está relacionada com a frequência de passagem da pá, não é relevante para as rotações usuais.
Ruído de carga em regime não-permanente	Passagem das pás por esteiras ou regiões sob influência da torre.	Frequência está relacionada com a frequência de passagem da pá, pequeno no caso de rotores upwind, mas possivelmente considerável em parques eólicos.
Ruído associado à Turbulência no Escoamento	Interação das Pás com a turbulência atmosférica	Contribui para o ruído de banda larga; ainda não está totalmente quantificado
Ruído de Forma do Perfil		
Ruído de Bordo de Ataque	Interação da turbulência da Camada-Limite com o bordo de ataque da pá	Banda Larga, fonte principal do ruído de alta frequência (770 Hz <math><f < 2\text{ kHz}</math>)
Ruído de ponta	Interação entre a turbulência da ponta da pá com a superfície da ponta da pá	Banda Larga; ainda não é completamente compreendido
Estol, ruído de descolamento	Interação da turbulência com a superfície da pá	Banda Larga
Ruído devido à camada limite laminar	Instabilidades não-lineares da camada-limite interagindo com a superfície da pá	Tonal, pode ser evitado
Bordo de Fuga rombudo ou irregular	Formação de vórtices em bordos de fuga rombudos ou irregulares	Tonal, pode ser evitado
Ruído devido ao fluxo sobre fendas e buracos	Escoamento instável sobre buracos e fendas, formação de vórtices por intrusões	Tonal, pode ser evitado

Fonte: (WAGNER; BAREIS; GUIDATI, 1996)

Os mecanismos de geração de ruídos de baixa frequência e infra-sons em aerogeradores são áreas que requerem mais investigação e compreensão. Grande parte do problema do ruído de baixa frequência observados com antigas turbinas *downwind* foi associado com a passagem da pá pela esteira da torre (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS., 2009). Este não é mais o caso de aerogeradores recentes (*upwind*), mas um mecanismo similar pode ser observado em parques eólicos grandes, onde um aerogerador pode eventualmente operar na esteira de outro. Outras fontes potenciais de ruído de baixa frequência e infrassom não têm sido regularmente estudadas por que seus níveis de pressão sonora medidos encontram-se abaixo dos níveis audíveis. Nos casos em que os pesquisadores observaram níveis proeminentes de ruído de baixa frequência ou infrassons, os potenciais mecanismos de geração de som não são muitas vezes discutidos.

Um tipo de ruído importante em aerogeradores é a Modulação de Amplitude. Esse ruído é facilmente reconhecido como o som da passagem das pás pela torre, muitas vezes chamado de "*swish-swish*" (LEVENTHALL, 2006). É um som de banda larga, com a porção audível entre 300 Hz e 5000 Hz. Adicionalmente, a rotação das pás gera ondas de pressão em frequências baixas, entre 0,5 Hz e 2 Hz (frequência de passagem das pás), com sobretons de até 20 Hz. Ainda que parte dessa energia de baixa frequência seja audível para algumas pessoas mais sensíveis, sua energia é em grande parte vibratória para as pessoas que a percebem. Apesar de ainda ser objeto de estudo atualmente, é considerado como um dos tipos de ruído que mais facilmente percebidos e mais irritantes que outros tipos de ruídos mais cujos níveis sonoros são mais constantes (PUNCH; JAMES; PABST, 2010).

2.4 Efeitos do Ruído provocado por Aerogeradores

Diversas alegações têm sido feitas relacionando o ruído de aerogeradores a impactos negativos para humanos e animais em regiões próximas a parques eólicos. Existem muito poucos estudos científicos que comprovem definitivamente esses impactos, principalmente estudos que relacionem a engenharia acústica com mecanismos fisiológicos. Entretanto, sejam regras ou exceções, as populações afetadas devem ser levadas a sério, e estudos devem prosseguir de forma a mitigar quaisquer problemas que possam existir.

Do ponto de vista da engenharia, o foco é muitas vezes a audibilidade - se uma fonte não emite ruído em níveis que ultrapassem os limiares auditivos no espectro de frequências audíveis, então não é considerada problemática (BAKKER et al., 2012). Ainda que essa análise seja um bom ponto de partida, ela não abrange todos impactos potenciais que um som poderia causar por meio de outros mecanismos. Como visto anteriormente, um som pode ser percebido (ainda que não de forma consciente) em níveis abaixo dos limites audíveis. Esses próprios limites são valores médios, e podem ter desvios padrões de 5 a 10 dB, onde encontra-se uma

parte considerável da população (SCHMIDT; KLOKKER, 2014).

Já do ponto de vista da medicina, os limiares auditivos são importantes para a avaliação, mas mais importante é a análise do ponto de vista da psicoacústica, dos efeitos fisiológicos e dos mecanismos pelos quais estes efeitos podem reduzir a qualidade de vida.

Alguns estudos de psicoacústica foram feitos para avaliar o efeito do ruído de aerogeradores em populações humanas, como o feito por (BAKKER et al., 2012). Esse estudo foi realizado na Holanda, e considerou uma população morando até 2,5 km de parques eólicos. A população foi dividida por distância dos aerogeradores, criando grupos de Níveis de Pressão Sonora similares. Ao todo foram consideradas 725 respostas, e os resultados tratados de forma a se obter intervalos de 95 % de confiança, conforme pode-se ver na Tabela 2.6. Dos resultados do estudo pode-se concluir que mesmo com níveis de pressão sonora baixos, uma parcela da população incomodou-se com o ruído dos aerogeradores.

Tabela 2.6: Resultados de experimento psicoacústico na Holanda

		Níveis de Pressão Sonora Previstos - Ponderação A [dB(A)]				
		<30	30 a 35	35 a 40	40 a 45	>45
<i>Exterior, n</i>		178	213	159	93	65
Não notou (%) (95%IC)		75 (68 a 81)	46 (40 a 53)	21(16 a 28)	13 (8 a 21)	8 (3 a 17)
Notou, sem Incômodo (%) (95%IC)		20 (15 a 27)	36 (30 a 43)	41 (34 a 49)	46 (36 a 56)	58 (46 a 70)
Leve	Incômodo (%) (95%IC)	2 (1 a 6)	10 (7 a 15)	20 (15 a 27)	23 (15 a 32)	22 (13 a 33)
Incômodo (%) (95%IC)		1 (0 a 4)	6 (4 a 10)	12 (8 a 18)	6 (3 a 13)	6 (2 a 15)
Muito	Incômodo (%) (95%IC)	1 (0 a 4)	1 (0 a 4)	6 (3 a 10)	12 (7 a a 20)	6 (2 a 15)
<i>Interior, n</i>		178	203	159	94	65
Não Notou (%) (95%IC)		87 (81 a 91)	73 (67 a 79)	61 (53 a 68)	37 (28 a 47)	46 (35 a 58)
Notou, sem Incômodo (%) (95%IC)		11 (7 a 17)	15 (11 a 20)	22 (16 a 29)	31 (22 a 31)	38 (28 a 51)
Leve	Incômodo (%) (95%IC)	1 (0 a 4)	8 (5 a 12)	9 (6 a 15)	16 (10 a 25)	9 (4 a 19)
Incômodo (%) (95%IC)		0 (0 a 2)	3 (1 a 6)	4 (2 a 8)	6 (3 a 13)	5 (2 a 13)
Muito	Incômodo (%) (95%IC)	1 (0 a 4)	1 (0 a 4)	4 (2 a 8)	10 (5 a 17)	2 (0 a 8)

Fonte: (BAKKER et al., 2012)

Segundo (SALT; HULLAR, 2010), uma provável causa do incômodo sentido pela população são os sons de baixa frequência ou infrassom. A quantidade de infrassons depende de muitos fatores, incluindo o fabricante do aerogerador, velocidade do vento, potência de saída, a topografia local, e a presença de outros aerogeradores nas proximidades (aumenta quando pá de um aerogerador "encontra" a esteira de outro aerogerador). O infrassom não pode ser ouvido e não está relacionado com o volume do som que você ouve, e só pode ser medido com um medidor de nível de som capaz de detectar ele (e não usando a escala de Ponderação A). Câmeras de vídeo e outros dispositivos de gravação não são sensíveis a infrassons e não reproduzem-no.

Ainda que o infrassom gerado por aerogeradores seja inaudível, o ouvido humano certamente o detecta e responde seus estímulos.

Medições mostram o ouvido é mais sensível a infrassons quando os outros sons audíveis estão em níveis baixos ou ausentes (SALT; HULLAR, 2010). Ou seja, estimulação máxima do ouvido com infrassom irá ocorrer em ambientes internos, porque o som audível dos aerogeradores é bloqueado pelas paredes, mas o infrassom passa prontamente através de quaisquer pequenas aberturas. Da mesma forma, uma pessoa dormindo com um ouvido sobre um travesseiro irá bloquear som audível para o ouvido, mas não vai bloquear a infrassons. Em ambos os casos, o infrassom será estimular fortemente o ouvido, ainda que não seja possível ouvi-lo. A presença de sons em frequências mais altas, na faixa de 150 Hz - 1.500 Hz em níveis de pressão acústica acima de 60 dB SPL suprime a resposta do ouvido a infrassons. Pode ser possível mascarar a influência de infra-sons com outros ruídos mas as propriedades de frequência do ruído mascarador devem ser considerados, como por exemplo, frequências acima de cerca de 1500 Hz não irão mascará-lo.

As formas que o infrassom podem afetar uma população são as seguintes (SALT; HULLAR, 2010), sendo uma delas causando Modulação de Amplitude (pulsação) de sons audíveis.

Sabe-se que o infrassom afeta as células sensoriais do ouvido de uma forma que muda sua sensibilidade (como oscilar o controle de volume de um aparelho de som para cima e para baixo repetidamente). Esta é uma forma biológica de modulação de amplitude que não pode ser medida com um medidor de nível do som. Assim, para investigar a modulação de amplitude sem considerar a componente induzida por infrassons provavelmente não vai explicar a verdadeira natureza do problema. Os principais sintomas relacionados à modulação de amplitude são pulsação, irritação, estresse.

Pode concluir-se que, quer seja audível ou não, o ruído de aerogeradores tem o potencial de afetar os residentes nas proximidades, sendo necessários maiores pesquisas nesse campo. Mais importante ainda, dados médicos devem ser correlacionado com os níveis de pressão sonora medidos para permitir uma verdadeira avaliação do potencial de impacto do ruído.

2.5 Normas e Padrões de Medição

Como desenvolvimento de parques eólicos é relativamente recente na maior parte do mundo e a evolução tecnológica no setor foi muito grande nos últimos anos (com o aumento do tamanho das máquinas e novas tecnologias de geração), a legislação e as normas a respeito de ruído de aerogeradores são recentes e estão evoluindo constantemente, ou são mesmo inexistentes. Nessa seção serão discutidas normas internacionais e comparadas com a legislação utilizada atualmente no Brasil.

Para se ter uma base de comparação, tomemos como base a Organização Mundial de Saúde, OMS. Segundo a OMS, os limites recomendados para ruído externo são 50 a 55 dBA durante o dia e 45 dBA à noite (GOELZER; HANSEN; SEHRNDT, 2001), de um modo geral. Em regiões residenciais, entretanto, a OMS recomenda limites de 35 dBA durante o dia e de 30 dBA no período da noite, a fim de evitar distúrbios no sono, incômodo e outros efeitos. Níveis permitidos de ruídos para alguns países europeus podem ser vistos na Tabela 2.7. No Brasil, utiliza-se como base a NBR 10151 de Junho de 2000. Os limites da norma podem ser vistos na Tabela 2.8.

Tabela 2.7: Níveis Permitidos de Ruído para alguns países com níveis de pressão sonora medidos em L_{Aeq} [dB(A)]

País	Comercial	Misto	Residencial	Rural
Dinamarca			40	45
Alemanha				
<i>dia</i>	65	60	55	50
<i>noite</i>	50	45	40	35
Netherlands				
<i>dia</i>		50	45	40
<i>noite</i>		40	35	30

Fonte: (GIPE., 1995)

Tabela 2.8: Níveis Permitidos de Ruído para o Brasil, com níveis de pressão sonora medidos em L_{Aeq} [dB(A)]

Tipos de Áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: (NBR10..., 2000)

A metodologia para medir esses níveis de ruído também pode variar entre países. No Brasil, utiliza-se, além da NR 10.151 (NBR10..., 2000), a NBR 7731 como referência para medições de ruídos. Essa norma, apesar de ainda ser referência para procedimentos de medição de ruídos, foi cancelada em 2013, não sendo substituída por nenhuma outra. Essas normas foram criadas para medições de ruído em geral, e não são específicas para a medição de ruído em aerogeradores. Também não pressupões uma avaliação do espectro de frequências medido, identificando frequências mais relevantes para as medições.

Há entretanto uma norma internacional, a IEC 61400-11 (INTERNATIONAL ELECTRO-TECHNICAL COMMISSION, 2002), que trata especificamente da medição de ruídos provenientes aerogeradores, sejam de eixo vertical ou eixo horizontal. Nela são definidos:

- Qualidade, tipo e calibração dos instrumentos a serem utilizados para medição de velocidade do vento e de som;
- Localização e tipo das medições a serem realizadas;
- Metodologia de análise e de apresentação de relatório.

São realizadas as medições de ruído de banda larga, análise de níveis sonoros em bandas de 1/3 de oitava e tonalidade. As medições são utilizadas para determinar o nível de pressão sonora na nacelle de um aerogerador, e a existência de alguma frequência sonora dominante. Afim de se criar uma curva característica padrão de emissão sonora de cada aerogerador (e facilitar a comparação entre modelos), norma prevê que as medições sejam feitas com velocidades de vento de 6, 7, 8, 9 e 10 m/s, a uma altura de 10 m. Dessa forma, fabricantes de aerogeradores mundiais utilizam-se dessa norma para medir os níveis de potência sonora de seus aerogeradores e certificá-los por meio de agências nacionais de medição.

Os instrumentos necessários para a realização das medições de acordo com a norma IEC 61400-11 são:

1. Para a determinação contínua dos níveis de pressão sonora equivalentes com ponderação (ou nível) tipo A:
 - Medidor de nível de pressão sonora tipo 1, de acordo com a IEC 61672;
 - Microfone com diâmetro menor que 13 mm.
2. Para obtenção do Espectro de frequência em bandas de 1/3 de oitava:
 - Medidor de nível de pressão sonora deve adicionalmente ter uma resposta constante em frequências de 45 Hz a 11.200 Hz;
 - Os filtros utilizados devem cumprir os requerimentos de Classe 1, de acordo com a IEC 61260;
 - Para poder realizar medições de ruídos de baixa frequência, o medidor deve ter um espectro maior de frequências.
3. Para obtenção do espectro de banda estreita
 - Medidor deve atender às especificações da IEC 61672 para o intervalo de 20 Hz a 11200 Hz.
4. Calibrador
 - O calibrador deve atender aos requerimentos da Classe 1, de acordo com a IEC 60942;
 - O sistema de medição completo deve ser calibrado imediatamente antes e imediatamente depois da sessão de medições usando um calibrador acústico;
 - Deve ser usado nas condições ambientes específicas do equipamento.

Medições de diretividade, infrassom ($f < 20$ Hz), ruído de baixa frequência (20-100 Hz) e modulação de amplitude são opcionais na IEC 61400-11.

3 METODOLOGIA

Conforme mencionado anteriormente, o presente trabalho tem como objetivo aplicar e documentar uma metodologia de medição de ruído originado por aerogeradores, identificando seu espectro de frequências, tanto de banda larga como para infrassom e sons de baixa frequência, aplicando o filtro adequado.

3.1 Instrumentação

Foram utilizados nas medições um Sistema de Aquisição de Dados do tipo MC 3242, e um microfone MPA231, ambos da marca BWSA Tech. As especificações do Sistema de Aquisição de Dados estão na Tabela 3.1 e as do Microfone estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Especificações do Sistema de Aquisição de Dados MC 3242

Canais de Entrada	4
Output Channels	2
Classificação IEC61672	Tipo I
Input Connector	BNC
Max. Frequência de Amostragem (Hz)	51.2k
Gains	–
Ruído Interno (dBA)	30
Frequência de Resposta (Hz)	20 20k
Faixa de Medição (dBA)	30 130
Conexão ao PC	USB

Fonte: Próprio Autor

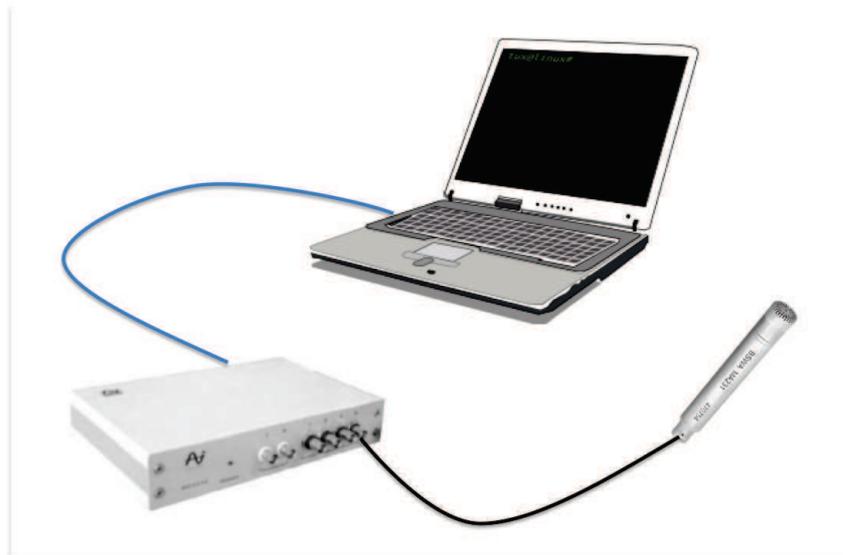
Tabela 3.2: Especificações do Microfone MPA231

Diâmetro	1,27 cm (1/2")
Classificação IEC61672	Classe I
Frequência de Resposta (Hz)	20 20k
Alcance Dinâmico (dBA)	17 136
Ruído Inerente (dBA)	<17
Temperatura de Operação (°C)	-30 80
Umidade de Operação (UR)	0 95%
Coeficiente de Temperatura (dB/°C)	0.005

Fonte: Próprio Autor

O microfone foi ligado ao sistema de aquisição de dados, utilizando um cabo de conexão BNC. O sistema de aquisição, por sua vez, foi ligado a um computador, que fez o registro das informações. A configuração final do sistema de aquisição de dados sonoros pode ser vista na Figura 3.1 e uma fotografia do Sistema de Aquisição de Dados pode ser visto na Figura 3.2. O sistema utiliza o software VA-Lab, fornecido pela BWSA Tech juntamente com o sistema de aquisição de dados, e pode ser visto na Figura 3.3.

Figura 3.1: Esquematização da Configuração final do Sistema de Aquisição de Dados Sonoros



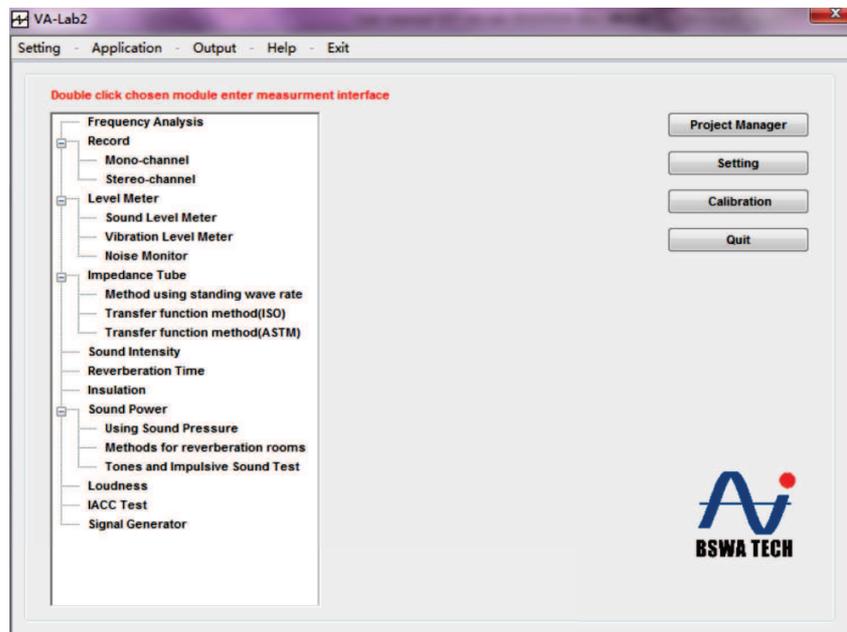
Fonte: Próprio Autor

Figura 3.2: Foto do sistema de Aquisição conectado ao Computador



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 3.3: Imagem do Software VA-Lab usado para aquisição das medições



Fonte: Próprio Autor

Também foi usando um calibrador modelo CA111, da BWSA Tech, cujas especificações

encontram-se na Tabela 3.3.

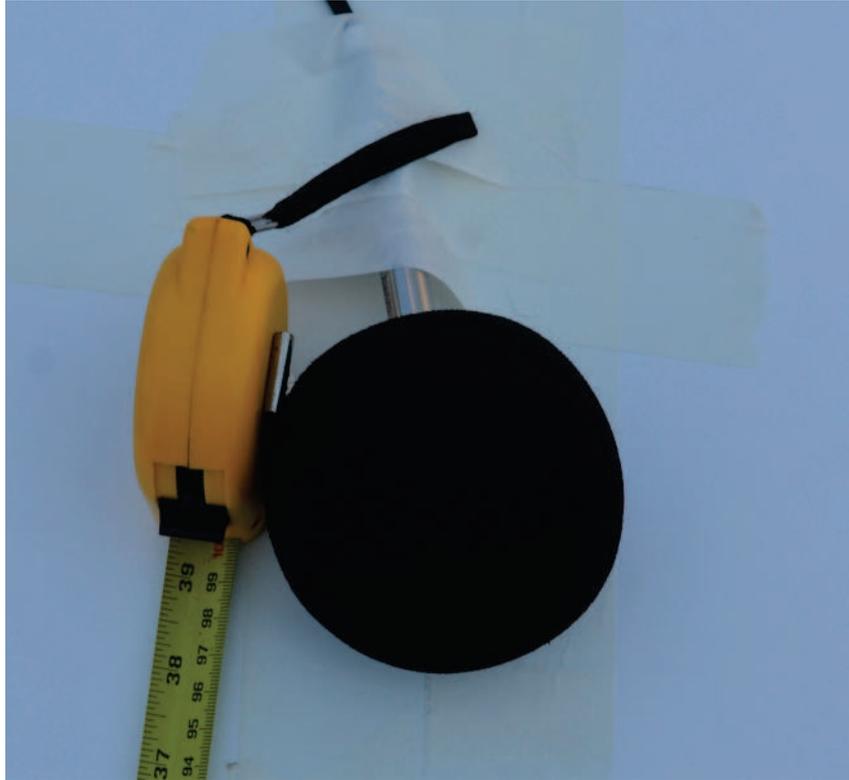
Tabela 3.3: Especificações do Calibrador CA111

Padrão	IEC60942:2003 Classe 1, ANSI S1.40-1984, GB/T 15173-1994
Níveis de Pressão Sonora	94,0 dB \pm 0,3 dB e 114,0 dB \pm 0,3 dB re 20 μ Pa
Frequência (Hz)	1000Hz \pm 0,5%
Diâmetro do Microfone	De acordo com a IEC61904-4: 1/2”e 1/4”
Distorção Acústica	<2 % Tempo de Estabilização: <10 s
Condições de Referência	Temperatura Ambiente: 25°C / Pressão Ambiente: 101.3 kPa / Umidade: 55% UR
Condições Ambientais	Temperature: -10°C a 50°C / Pressão: 65 kPa a 108 kPa / Umidade: 10 a 90% UR (sem condensação)

Fonte: Próprio Autor

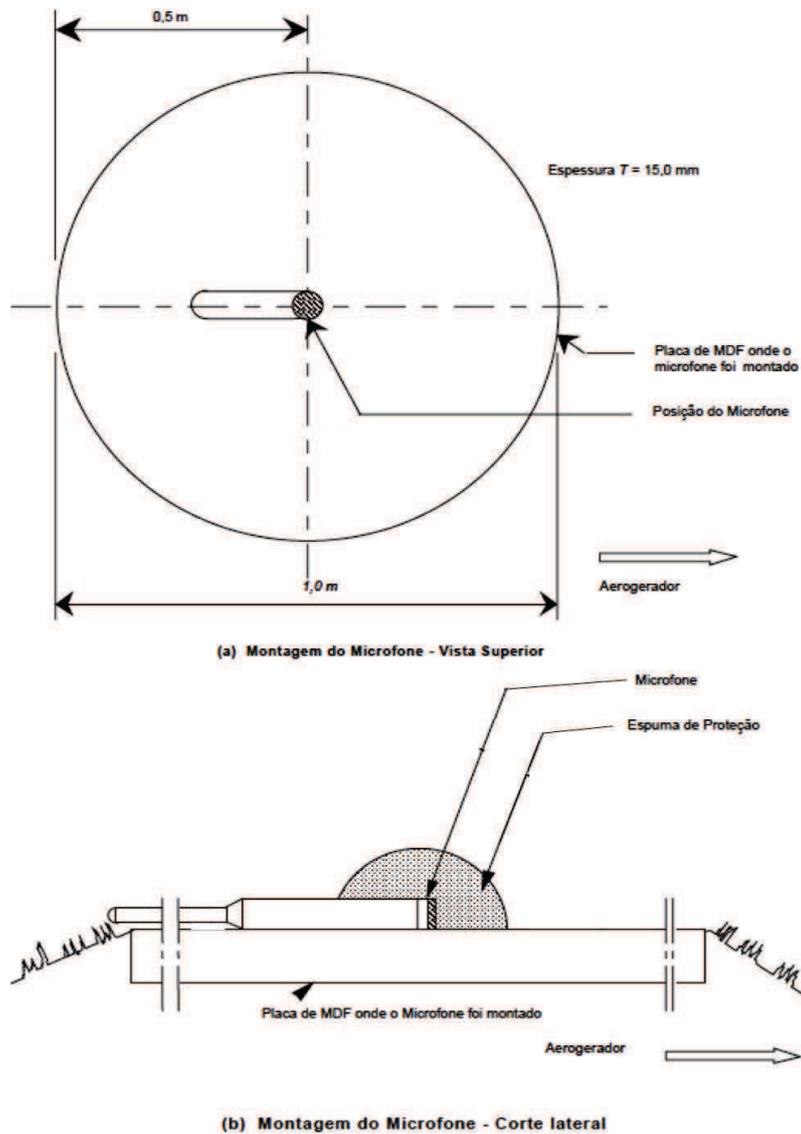
Adicionalmente, o microfone estava envolto em uma espuma de proteção esférica de cerca de 90mm de diâmetro, como pode ser visto na Figura 3.4. O conjunto foi posicionado no centro de uma placa de MDF de 1,0 metro de diâmetro e com espessura de 15,0 mm, conforme Figura 3.5.

Figura 3.4: Foto do microfone e espuma posicionados na placa de MDF



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 3.5: Esquema do posicionamento do microfone na placa de MDF



Fonte: Próprio Autor

Abaixo a lista de equipamentos utilizados:

- Sistema de Aquisição de Dados MC 3242
- Microfone MPA231
- Calibrador Sonoro CA111
- Espuma de Proteção Esférica de cerca de 90mm de diâmetro para Microfone
- Cabo BNC de 3 metros

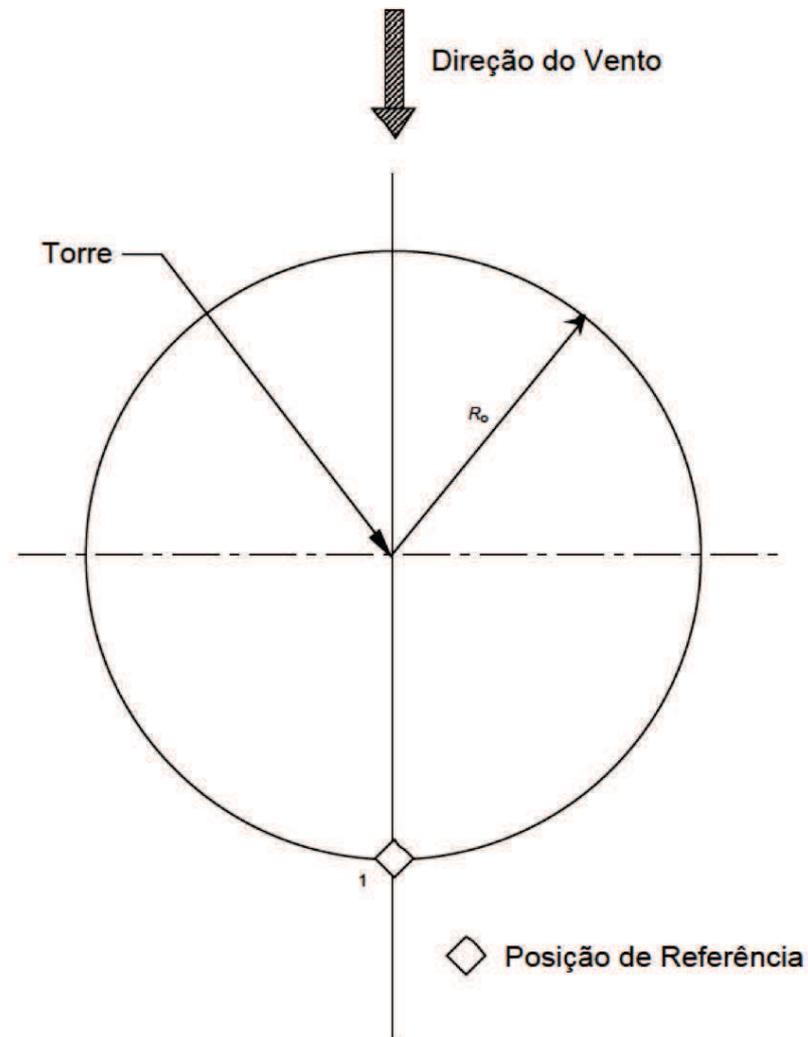
- Cabo USB de 1,5 metros
- Computador com Alimentação
- Câmera Digital

3.2 Procedimento Experimental

Após montado o sistema de medição sonora, foi feita uma calibração utilizando o calibrador CA111, conforme sugerido na norma IEC61400-11.

Posteriormente, o microfone e sua placa de MDF foram posicionados a uma distância R_0 do aerogerador onde foram feitas as medições iniciais (WTG01). O microfone foi posicionado de forma a ficar exatamente atrás da torre, na direção do vento, conforme esquema da Figura 3.6. Foram realizadas medições nessa posição, gravando os resultados como variação na Pressão Atmosférica e com a extensão *wav*, para posterior tratamento.

Figura 3.6: Esquema com o posicionamento do microfone em relação à torre e ao vento



Fonte: (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002)

Posteriormente, o sistema de medição sonora foi movido e o microfone posicionado à mesma distância R_0 de um aerogerador do mesmo modelo, no mesmo parque, mas que não estava em operação (WTG02). Essa nova posição estava a cerca de $3,5R_0$ do aerogerador onde foram feitas as medições iniciais. Foi feita uma medição a fim de se determinar o ruído de fundo do parque e suas características.

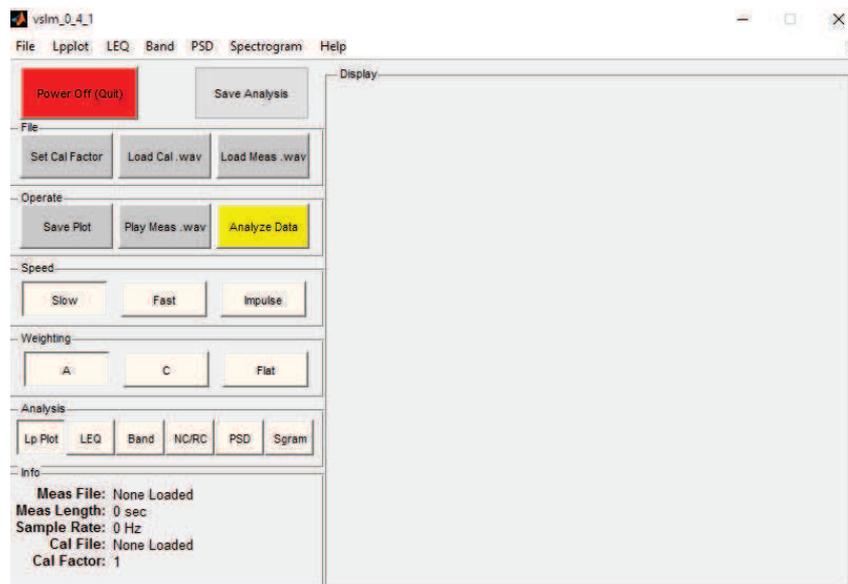
Os valores de velocidade do vento foram obtidos do anemômetro da nacelle do aerogerador WTG01, e os valores de rotação deste foram obtidos a partir da Interface Homem-Máquina da máquina (sistema de Gerenciamento).

3.3 Tratamento de Dados Experimentais

Os dados de pressão sonora em Pa foram obtidos com o Software VA-Lab para cada experimento, gerando um arquivo texto para cada experimento. Esses arquivos foram posteriormente tratados no MATLAB, de forma a criar um arquivo de áudio (já com os dados de calibração).

Para analisar os dados experimentais, optou-se por utilizar o aplicativo de código livre *Virtual Sound Level Meter* (MUEHLEISEN, 2013), em sua versão para o MATLAB®. É um programa gratuito e livre, de código aberto, desenvolvido por Ralph Muehleisen, Ph.D, professor do Instituto de Tecnologia de Illinois e cientista-líder do programa de Pesquisa Tecnológica e Decisória de Energia Predial - *Building Energy Decision and Technology REsearch* ou BEDTR - do Laboratório Nacional de Argonne, do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. A Figura 3.7 mostra sua interface gráfica.

Figura 3.7: Interface gráfica do programa utilizado - *Virtual Sound Level Meter*



Fonte: Próprio Autor

Foram feitas as seguintes análises, tomando sempre como referência a norma ANSI S1.4 (METERS,).

3.3.1 Nível de Pressão Sonora

Representação do nível de pressão sonora (SPL) com o tempo. O sinal pode ser exibido a cada 100 ms (*Slow*) ou a cada 20 ms (*Fast*) de forma a exibir o sinal mais próximo do real (com maiores frequências) e mais suavidade (retirando frequências rápidas). Foi feita para os

dados não filtrados.

A análise do nível de pressão sonora com o tempo mostra o comportamento da intensidade sonora com o tempo, ou seja as variações de pressão sonora. É importante como análise visual preliminar, para se identificar alguma anormalidade explícita.

3.3.2 *Nível de Pressão Sonora Equivalente - L_{eq}*

O L_{eq} representa um valor conhecido como Nível Sonoro Contínuo Equivalente. É o nível SPL de um dado período que produziria a mesma quantidade de energia que o som medido. Sua definição matemática pode ser dada na Equação 3.1. Foi feito para intervalos de 1 s e para os dados não filtrados, e com ponderações nível A e C.

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_2}^{t_1} \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \quad (3.1)$$

São exibidos também os níveis sonoros máximo, mínimo e L_n , nível que n% dos dados conseguem superar. Por exemplo, L_{10} , é o nível que 10% dos dados são maiores (90% dos dados o superam).

Ou seja, calcula, para cada intervalo de tempo, a pressão equivalente. Sendo assim, tem-se um gráfico similar ao nível de pressão sonora, mas discreto. Com isso é possível determinar os níveis de pressão equivalente médios, máximos e mínimos, já levando em consideração picos muito rápidos.

3.3.3 *Análise de Bandas de 1/3 de oitava*

É a análise de frequência utilizando bandas de 1/3 de oitavas. Foi calculado para os dados não filtrados, com ponderações nível A e nível C, e utilizando dois métodos, FFT e o método descrito na norma ANSI S1.4.

No método FFT o programa separa o arquivo de medição em 65536 segmentos e calcula a amplitude de potência espectral para cada trecho utilizando uma FFT de 65536 pontos e calcula a amplitude espectral média.

No método ANSI, o programa filtra o sinal no tempo por meio de filtros digitais Butterworth de 10ª ordem, de acordo com os filtros de Classe 0, 1 e 2 da ANSI S1.11.

É a principal ferramenta para se analisar o comportamento de frequências de um dado ruído. É possível com ela identificar as frequências mais relevantes, e comparando espectros de frequência para uma mesma máquina, identificar se o comportamento padrão é respeitado.

3.3.4 *Análise de Ruído NC (Noise Criteria) e RC (Room Criteria) Mark II*

Nesse modo o programa exibe os níveis de pressão sonora para o espectro de frequência em bandas 1/3 de oitavas e compara o resultado com curvas de igual audibilidade, com frequências variando no intervalo de 63 to 8000 Hz.

No critério de Ruído (NC), a nível máximo de audibilidade é calculado (NC) recorrendo ao método tangencial, através do qual é possível identificar uma curva NC correspondendo à curva a cujas bandas máximas do espectro de ruído mais se aproximam, sem a ultrapassar (VER; BERANEK, 2008). Nesse tipo de análise, as curvas de audibilidade são representadas juntamente com um espectro de frequência em bandas de oitavas.

O ruído também é calculado utilizando o *Room Criteria Mark II* (RC), um método que também utiliza curvas padronizadas em um espectro de frequência para determinar o nível de ruído.

É especialmente importante para a Engenharia Ambiental, e principal ferramenta para se determinar os níveis de ruído e quais frequências são responsáveis por ruídos mais intensos, atuando dessa forma nas fontes emissoras dessas frequências.

3.3.5 *Densidade Espectral de Potência*

É computada uma estimativa de densidade espectral de forma a estimar a potência do sinal para cada frequência. Utiliza-se nesse caso o Método do Periodograma Modificado de Welch (WELCH, 1967).

3.3.6 *Espectrograma*

A densidade espectral de potência é computada usando o método anterior e exibida num gráfico 2d com a intensidade representada pela cor, *heat map*. Dessa forma cria-se um gráfico com três dimensões, com o eixo horizontal representando o tempo (em segundos), o eixo vertical representando a frequência (em Hertz) e a cor representando a intensidade (em dB). É uma forma de se representar a variação do espectro de frequência de um som com o tempo.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Condições Experimentais

A metodologia apresentada foi aplicada em um parque eólico na região de Aracati, Ceará, em máquinas do fabricante IMPSA, do modelo IV-77, e Potência Nominal de 1,5 MW. Possuem uma torre de aço de 85 metros e o diâmetro do seu rotor é de 77 metros, com pás de 376,25 metros de comprimento. É um modelo de máquina do tipo DDPM - *Direct Drive Permanent Magnet*, cujo rotor é ligado diretamente ao gerador, sem a presença de caixa multiplicadora, ou *gearbox*. A Figura 4.1 mostra uma representação esquemática dos componentes do aerogerador estudado, IV-77, e a Figura 4.2. Como não há a presença de *gearbox*, uma parte considerável do ruído gerado pelo aerogerador é aerodinâmico.

Figura 4.1: Representação esquemática do Aerogerador estudado - IV-77



Fonte: (IMPSA.COM, 2015)

Figura 4.2: Foto do Aerogerador IMPSA IV77 tirada do ponto de medição



Fonte: Arquivo Pessoal

O aparato experimental, microfone e placa de MDF, foi posicionado a uma distância R_0 de 60 metros do aerogerador WTG01, na posição indicada na Figura 3.6. Foram feitas 2 medições nessa posição, sendo a primeira feita com o microfone sem a espuma de proteção, para efeitos comparativos. Posteriormente o aparato experimental foi posicionado à mesma distância, na mesma posição relativa a um aerogerador fora de funcionamento, a fim de se detectar as características do ruído ambiente. Nesse caso, a distância para um aerogerador em funcionamento era de 170 metros. Em todos os casos foram feitas medidas de vento e rotação

(quando aplicável).

Para efeitos de comparação, a primeira medição foi realizada a uma distância R_0 de 1 metro da torre do aerogerador WTG01.

Tabela 4.1: Características das Medições Realizadas

Medição	1	2	3	4
Horário	10:45	11:00	11:20	11:50
Velocidade do Vento	8,0 m/s	8,8 m/s	8,5 m/s	10,0 m/s
Rotação	17,0 rpm	17,2 rpm	17 rpm	-
Distância R_0	1 m	60 m	60 m	60 m
Observação	-	Microfone sem Proteção	-	AEG parado

Fonte: Próprio Autor

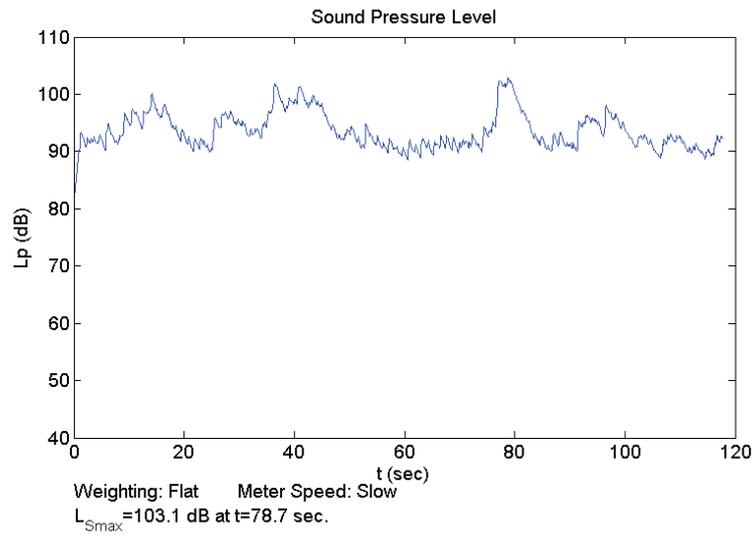
Os resultados das experimentais são exibidos a seguir.

4.2 Resultado das Medições

4.2.1 Nível de Pressão Sonora

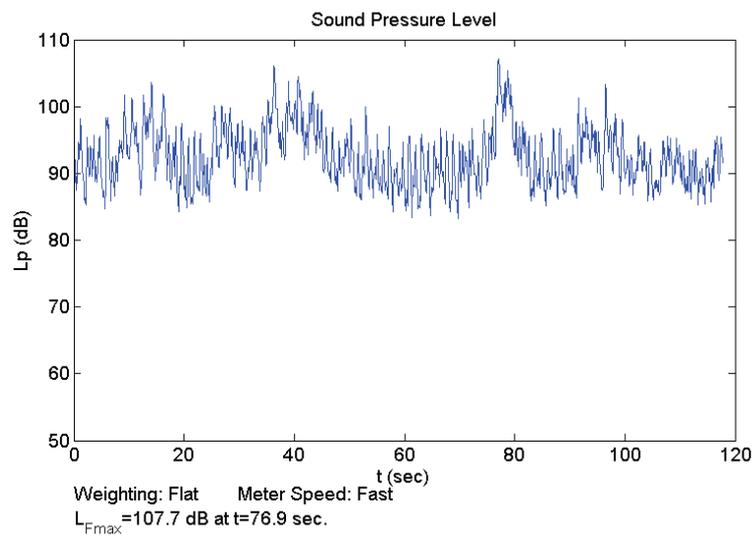
Foram obtidas para as medições exibições dos níveis de pressão sonora com o tempo, tanto o sinal suavizado (*Slow*) como o sinal menos suavizado (*Fast*). As representações dos sinais suavizados e menos suavizados das medições 03 encontram-se nas Figura 4.3 e Figura 4.4. As representações dos sinais suavizados e menos suavizados das medições 01 a 04 são exibidos na Figura 4.5.

Figura 4.3: Representação dos níveis de pressão sonora com o tempo para Medição 03 - Sinal suavizado (*Slow*)



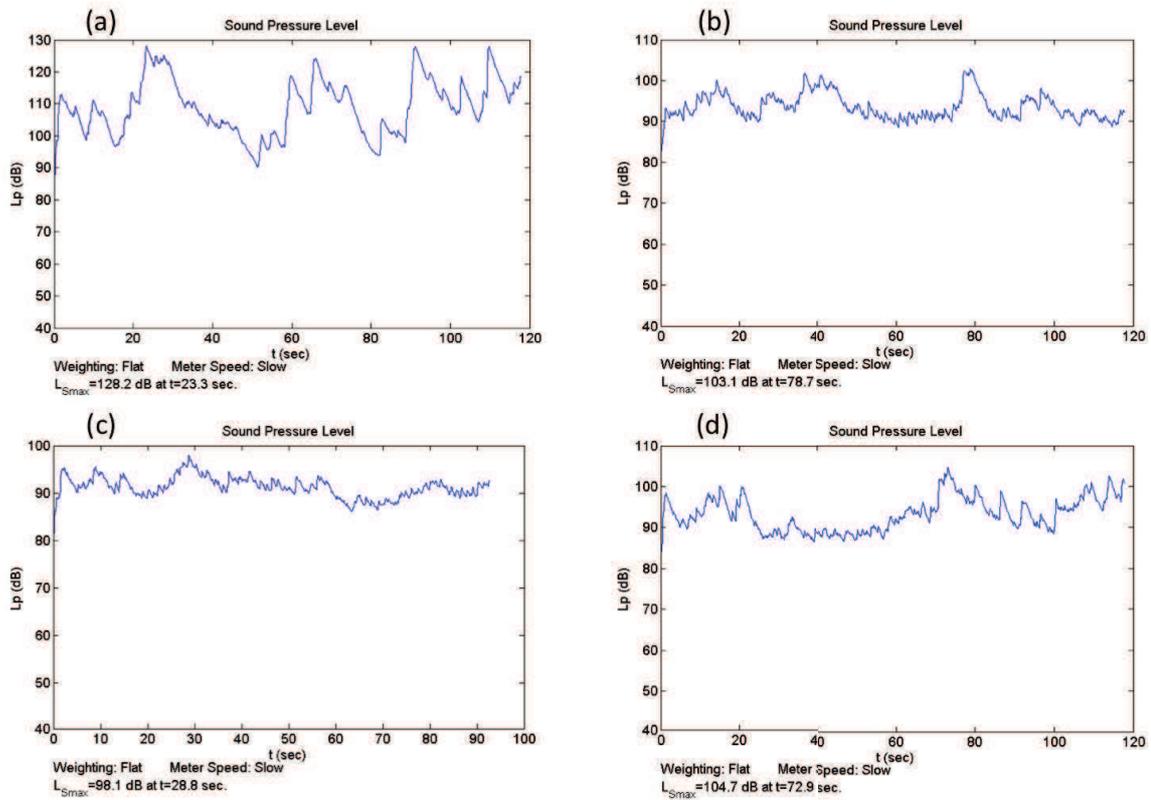
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.4: Representação dos níveis de pressão sonora com o tempo para Medição 03 - Sinal pouco suavizado (*Fast*)



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.5: Representação dos níveis de pressão sonora com o tempo para Medição 01 (a), 02 (b), 03 (c) e 04 (d) - Sinal pouco suavizado (*Fast*)

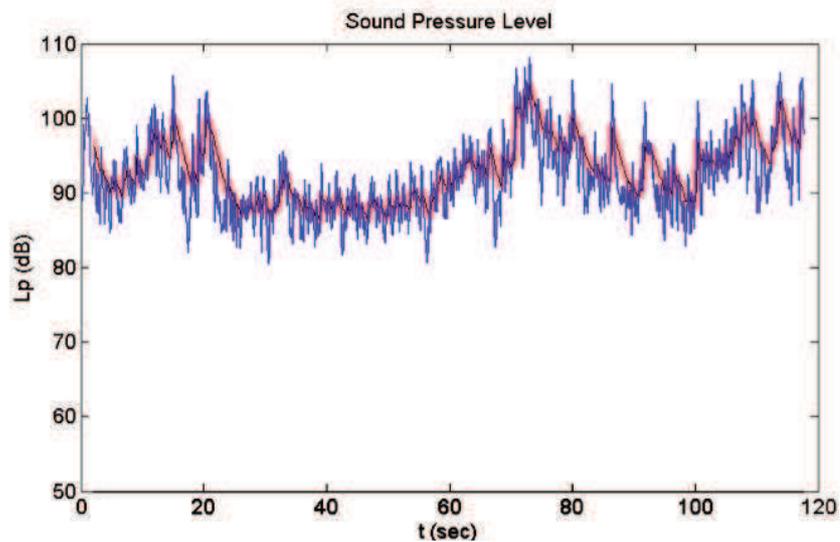


Fonte: Próprio Autor

O que se torna notável ao se observar os gráficos é a presença de maiores níveis de pressão sonora e de grandes picos de pressão nas medições 01. Seu pico de nível de pressão sonora foi de 128,2dB, enquanto os picos das outras medições variaram de 104,7dB a 98,1dB. Esse resultado era esperado, pois a medição 01 foi feita a uma distância menor da torre do aerogerador.

A principal diferença entre as representações usadas é que quando se usa o sinal pouco suavizado, a presença de frequências altas dificulta uma análise qualitativa pela visualização. Pode-se observar claramente isso na Figura 4.6.

Figura 4.6: Comparativo entre sinal suavizada (destacada em vermelho) e sinal pouco suavizado para a exibição dos níveis de pressão sonora da medição 04



Fonte: Próprio Autor

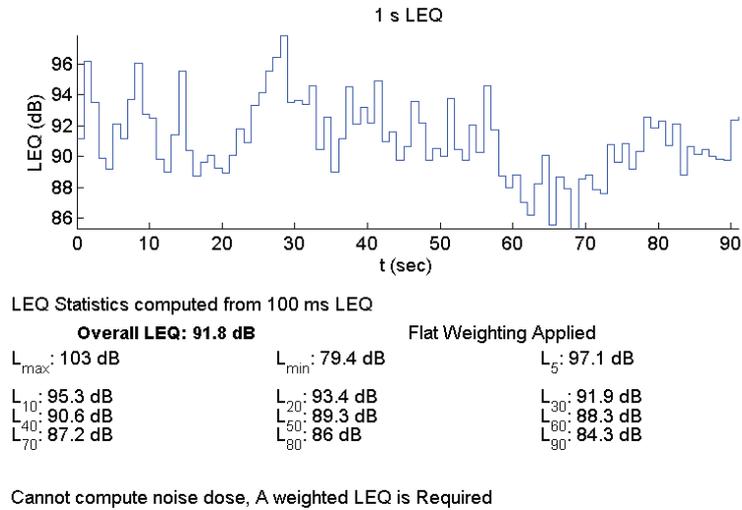
Pode-se concluir que a exibição dos níveis de pressão sonora possui grande utilidade, principalmente para identificar regiões de interesse, por meio de análises dos picos e vales de uma medição.

4.2.2 *Nível de Pressão Sonora Equivalente - L_{eq}*

Foram obtidos os níveis de pressão sonora equivalente para cada uma das medições, para os dados sem filtro e aplicando as ponderações nível A e nível C.

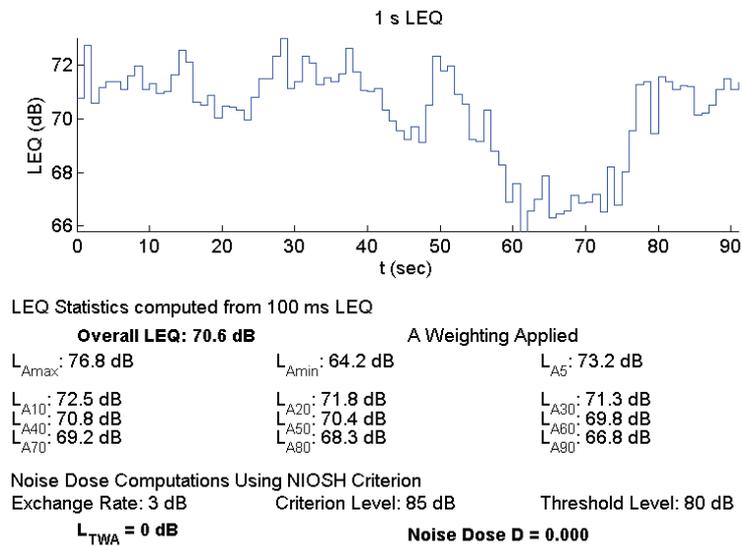
Pela diferença do tratamento de cada tipo de filtro, esse tipo de análise permite que se identifique pontos onde tipos de frequência diferentes são mais relevante. Por exemplo, a Figura 4.7 mostra o gráfico sem filtro. Comparando-o com a Figura 4.8, é possível identificar que próximo $t = 35$ s, houve uma queda nos níveis de pressão sonora, entretanto, na faixa audível, essa queda não foi significativa. Pode-se fazer uma análise similar da Figura 4.9, onde o filtro utilizado (ponderação nível C), ressalta a importância de frequências menores.

Figura 4.7: Representação dos níveis de pressão equivalente com o tempo para Medição 02 - Sem filtro



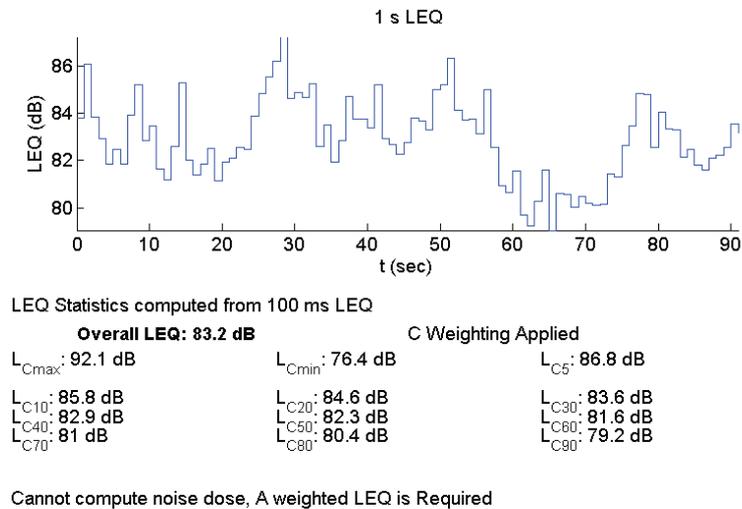
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.8: Representação dos níveis de pressão equivalente com o tempo para Medição 02 - Ponderação Nível A



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.9: Representação dos níveis de pressão equivalente com o tempo para Medição 02 - Ponderação Nível C



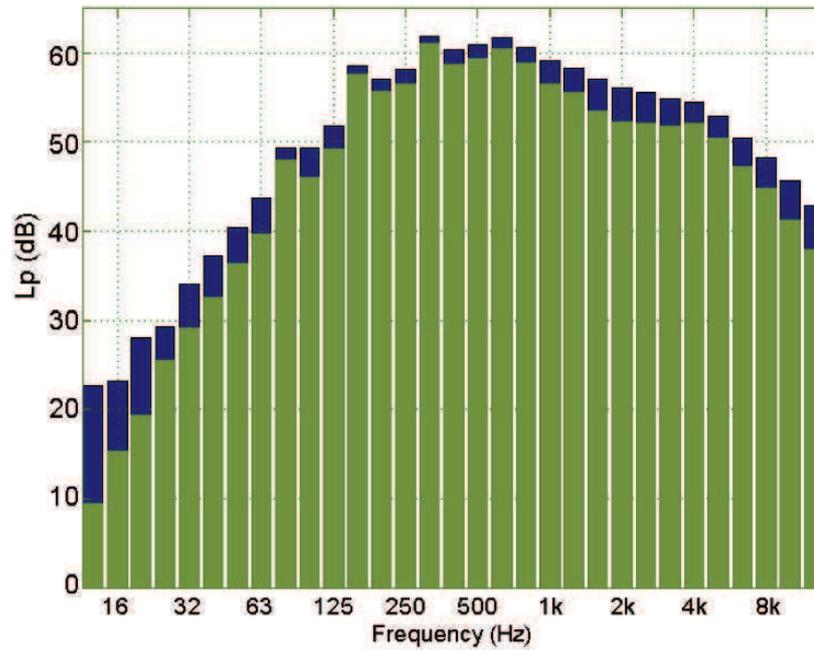
Fonte: Próprio Autor

4.2.3 Análise de Frequências exibidas em Bandas de 1/3 de oitava

Os espectros de frequências exibidos em bandas de 1/3 de oitavas para as medições, levando em consideração os os filtros aplicados e os métodos de cálculo foram obtidos a partir do programa.

Uma primeira observação que se pode fazer é que o método FFT, apesar de ser bem mais rápido, gera um espectro de intensidades inferiores ao obtido usando o método ANSI, como visto na Figura 4.10. Pode-se concluir, portanto, que o método FFT, quando usado, pode vir a comprometer a análise, especialmente quando tratamos de baixa frequência e Modulação de Amplitude.

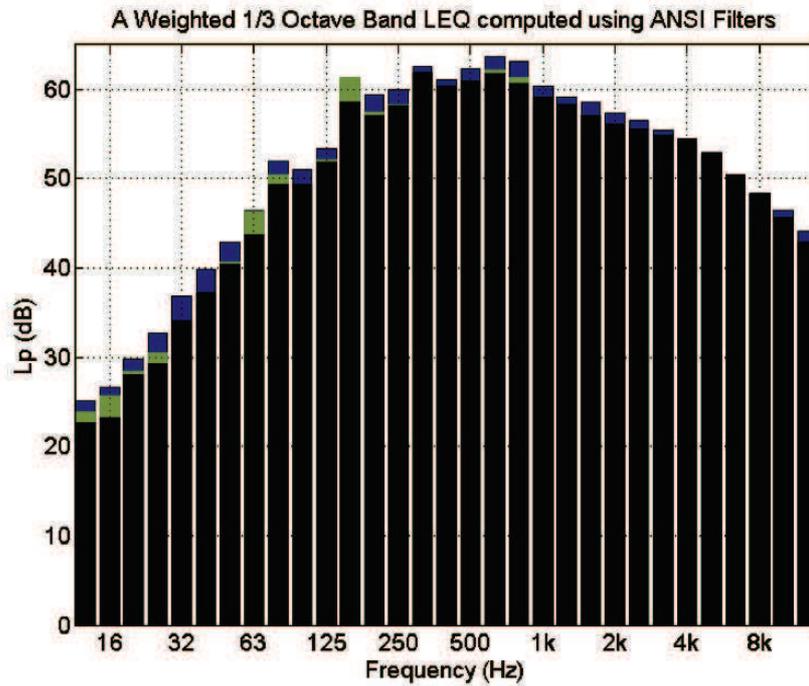
Figura 4.10: Comparativo entre Espectro de Frequências obtidos com método FFT (verde) e ANSI (azul) para a Medição 04



Fonte: Próprio Autor

A partir dessa análise do espectro de frequências pode-se obter resultados interessantes, especialmente se estiver aliada à Densidade Espectral. Isso porque, como visto, os ruídos aerodinâmicos produzidos possuem frequências características de cada tipo de fonte emissora. Pode-se então identificar frequências características de cada fenômeno. É possível, por exemplo, observar que a medição 04, com o aerogerador desligado, apresenta intensidades menores para frequências mais baixas, como visto na Figura 4.11.

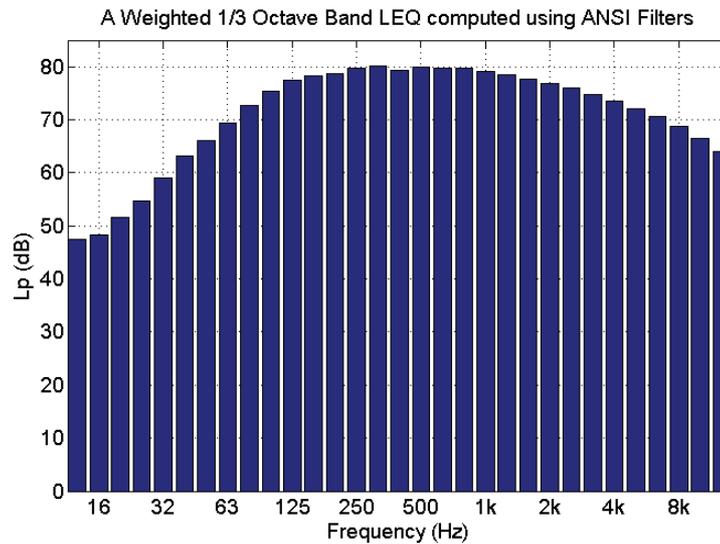
Figura 4.11: Comparativo entre espectros de frequência em bandas de 1/3 de oitavas e Ponderação A para medições 02 (verde), 03 (azul), e 04 (preto)



Fonte: Próprio Autor

Também foi observado que a medição 01 apresentou um espectro bem diferente de seus pares, o que pode ser justificado pelo fato de que o transformador do aerogerador encontra-se na base da torre, emitindo ruídos cuja intensidade é bem diminuída em medições mais distantes da torre. Pode-se observar isso ao comparar a Figura 4.11 com a Figura 4.12

Figura 4.12: Espectro de frequência em bandas de 1/3 de oitavas e Ponderação A para medição 01



Fonte: Próprio Autor

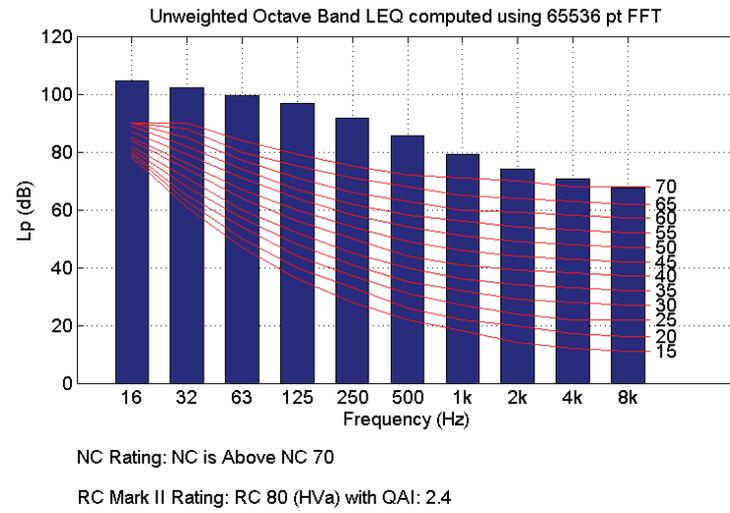
4.2.4 Análise de Ruído NC (Noise Criteria) e RC (Room Criteria) Mark II

Essa análise é interessante principalmente do ponto de vista ambiental, pois é possível visualizar qual o nível de audibilidade do ruído emitido pelo aerogerador. Esse tipo de análise pode ser feita em residências próximas a fim de se avaliar o potencial impacto na qualidade de vida de seus moradores.

As análises de Ruído para as medições feitas podem ser vistas da Figura 4.13 à Figura 4.16.

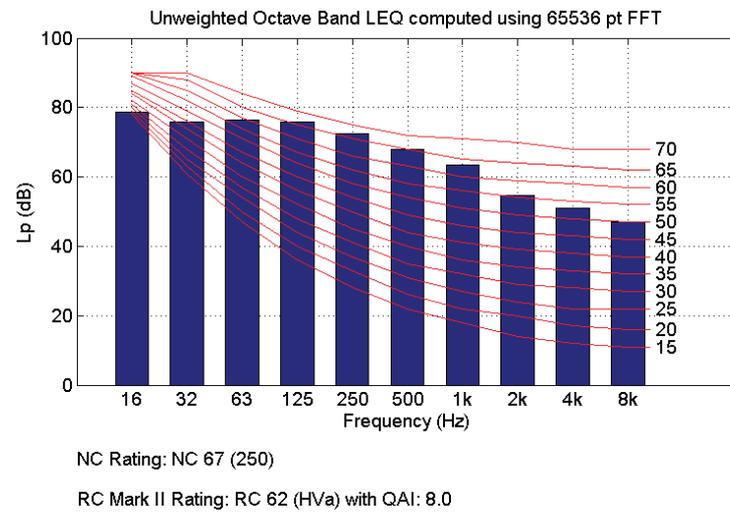
Pode-se observar na 4.13 que a Medição 01 possui níveis de ruído superiores à curva de 70dB, reforçando novamente a necessidade de se usar proteção no microfone.

Figura 4.13: Análise de Ruído para Medição 01 - Ponderação Nível A



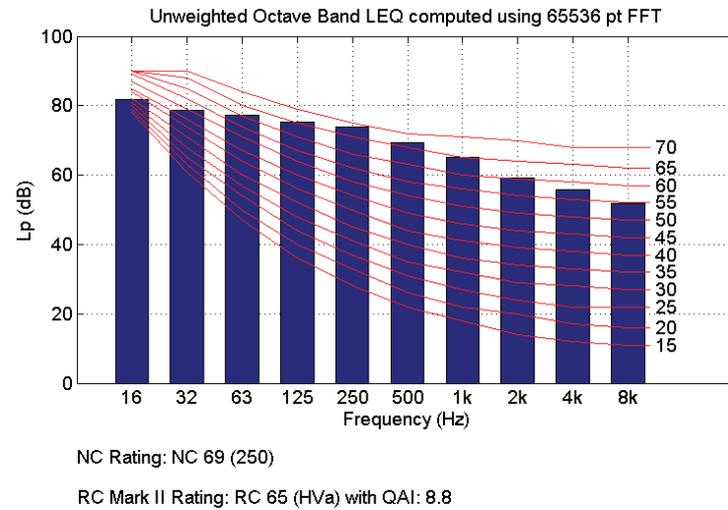
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.14: Análise de Ruído para Medição 02 - Ponderação Nível A



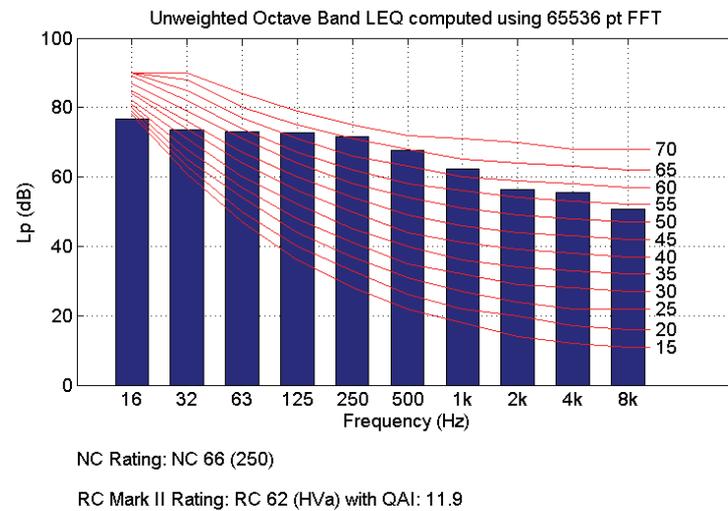
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.15: Análise de Ruído para Medição 03 - Ponderação Nível A



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.16: Análise de Ruído para Medição 04 - Ponderação Nível A



Fonte: Próprio Autor

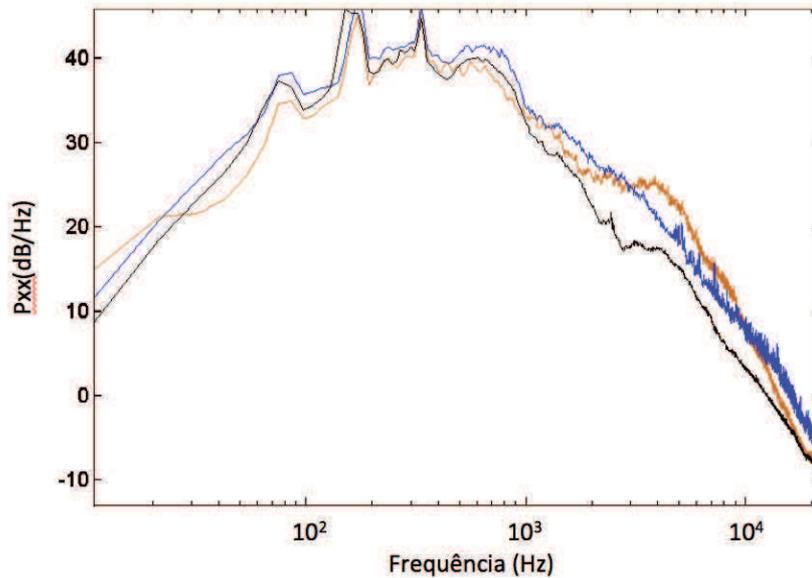
4.2.5 Densidade Espectral de Potência

Foram elaboradas as densidades espectrais de potência, utilizando o programa em questão.

Essa análise, como mencionado anteriormente, possui uma característica similar à

Análise de Frequências exibidas em Bandas de 1/3 de oitavas, pois permite a comparação do espectro de frequências de duas medições diferentes, como pode-se ver na Figura 4.17.

Figura 4.17: Comparativo entre densidade espectral de potência com Ponderação A para medições 02 (preto), 03 (azul), e 04 (marrom)

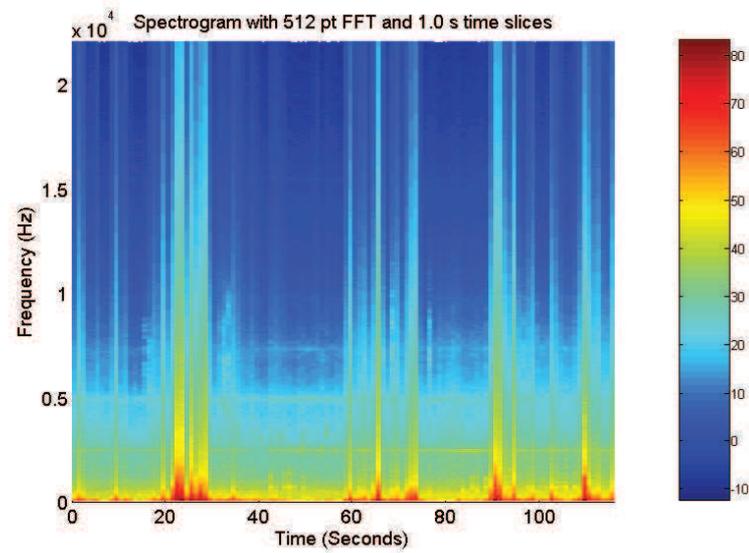


Fonte: Próprio Autor

4.2.6 Espectrograma

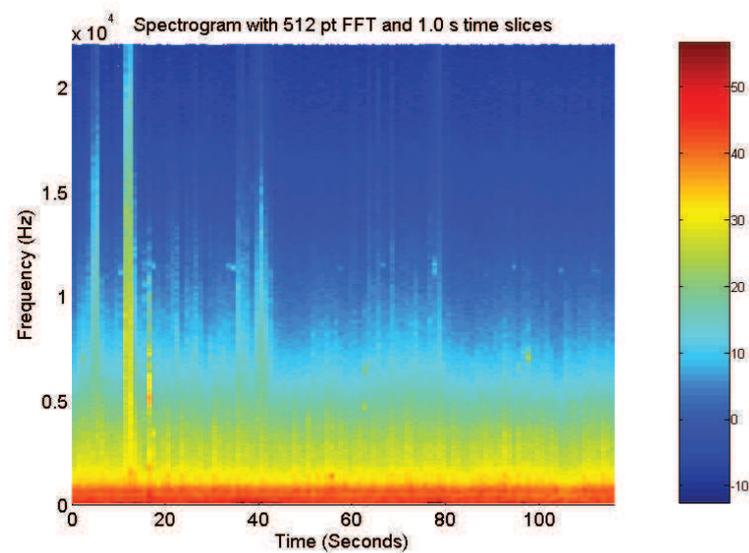
Com esse tipo de análise é possível representar visualmente o comportamento do espectro de frequências com o tempo. Dessa forma é possível identificar regiões onde existam possíveis distorções, de modo a analisar a qualidade das medições feitas. Isso pode ser visto na Figura 4.18 onde se pode ver várias distorções no espectro de frequências em alguns momentos para a medição 01. Efeito similar pode ser visto na Figura 4.19, da medição 03, entre 15 s e 20 s.

Figura 4.18: Espectrograma Medição 01 - Ponderação Nível A - Cores representando Intensidade em dBA



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.19: Espectrograma Medição 03 - Ponderação Nível A - Cores representando Intensidade em dBA



Fonte: Próprio Autor

4.2.7 Níveis de Potência Sonora

A norma IEC 61400-11 estabelece uma metodologia para o cálculo da Potência Sonora de uma fonte. Seu equacionamento pode ser visto na Equação 4.1, onde R_1 é a distância entre o microfone e o centro do rotor e $L_{Aeq,c}$ é o Nível de Pressão Acústica Equivalente corrigido levando em conta o ruído de fundo. No presente caso, R_1 é 104 metros, e $L_{Aeq,c}$ é definido na Equação 4.2, onde L_{s+n} é o nível de pressão equivalente da máquina somado ao ruído de fundo e L_n é o nível de pressão equivalente ao ruído de fundo.

$$L_{WA} = L_{Aeq,c} - 6 + 10 \log \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right] \quad (4.1)$$

$$L_S = 10 \log (10^{(0,1L_{s+n})} - 10^{(0,1L_n)}) \quad (4.2)$$

Considerando que a primeira medição foi descartada pela qualidade e que a quarta é o ruído de fundo, pode-se obter os níveis de Potência sonora para as medições 2 e 3. A medição 2, entretanto, exibiu valores de Pressão acústica menores que a medição 4, sendo portanto descartada. Aplicou-se então as Equações 4.1 e 4.2 aos resultados da medição 3, chegando ao valor de 112,39 dB, exibido na Figura 4.2.

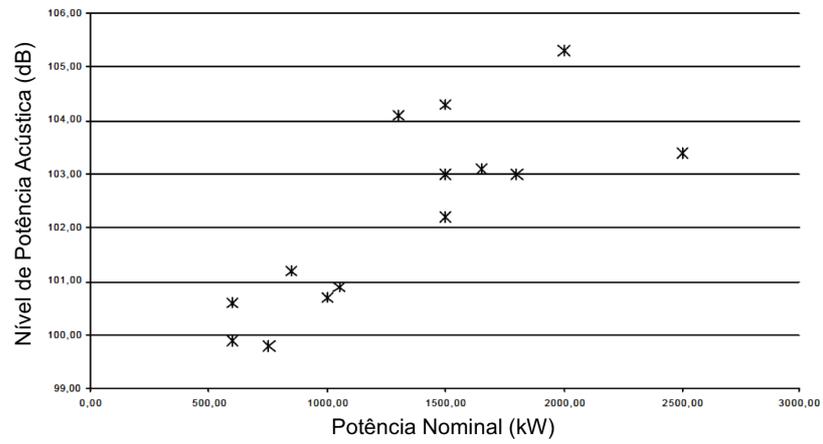
Tabela 4.2: Níveis de Pressão e Potência Acústica para as medições realizadas

	Velocidade (m/s)	L_{Aeq} (dB)	L_s (dB)	L_{WA} (dB)
Medição 2	8,8	70,6	-	-
Medição 3	8,5	72,4	67,05	112,39
Medição 4	10	70,9	-	-

Fonte: Próprio Autor

Comparando esse resultado com a literatura, observa-se que o resultado encontrado é da ordem de grandeza de resultados medidos em outros trabalhos (KLUG, 2002).

Figura 4.20: Níveis de Potência Acústica medidos por potência nominal



Fonte: (KLUG, 2002)

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusão

O presente trabalho apresentou características mundiais inerentes à geração de energia eólica mostrando sua evolução, tecnologia envolvida, e outras características operacionais e comerciais envolvidas. Foram apresentadas as limitações ambientais, dentre elas o ruído gerado por aerogeradores. Do ponto de vista da manutenção, foi mostrado o estágio atual da manutenção de aerogeradores, suas limitações e oportunidades de se utilizar a análise de ruídos para realizar o monitoramento e a manutenção preditiva, a fim de se diminuir custos com manutenção.

Posteriormente foram apresentadas características físicas do som, como se propaga, equacionamento e características ondulatórias de um tom puro. Foi mostrado que o som é composto de várias ondas de pressão superpostas, e que cada fonte emite um determinado tipo de onda característica com frequência e amplitude próprios. Cada som pode ser dividido em várias ondas diferentes, com um espectro de infinitas amplitudes, sendo assim, para realizar uma análise de frequências, são necessárias algumas ferramentas, que foram apresentadas. Também foi mostrado que alguns filtros devem ser aplicados, devido à variação da sensibilidade do ouvido humano com a frequência.

A fonte dos ruídos de um aerogerador também foram abordadas, explicando suas causas e frequências associadas. Os tipos de ruídos associados a aerogeradores foram apresentados, dentre eles, pode-se destacar os ruídos de baixa frequência, que ainda que não sejam ouvidos, são sentidos, e apesar de não serem totalmente compreendidos são objetos de estudos atuais, pois se configuram como os maiores limitantes ambientais atuais. Destacou-se também a modulação de amplitude ou o som "swish-swish". Foi visto o modo que o ruído de aerogeradores influencia na saúde humana, e estudos com seus impactos.

A fim de se elaborar a metodologia, a norma IEC 61400-11 foi estudada e um resumo apresentado nesse trabalho. Também foram apresentadas limitações aplicadas em vários países, e estabelecido um paralelo com a legislação brasileira.

O objetivo principal do trabalho foi elaborar e validar a metodologia de medição de ruídos em aerogeradores de grande porte. A metodologia foi feita, com exposição dos instru-

mentos, montagem dos equipamentos, posicionamento, procedimentos de obtenção dos dados e as tratamento dos dados obtidos. Dentre esses tratamentos, destaca-se os tratamentos que facilitam uma análise de frequência, o espectrograma , a análise de frequência em bandas e a densidade espectral de Potência. Com essas ferramentas torna-se possível estudos de bandas de frequência específicas, como baixa frequência e frequências específicas para cada máquina e pá. A análise dos resultados foi feita utilizando um software de código-livre, o *Virtual Sound Level Meter*.

É possível concluir, das medições, que as análises feitas são complementares, e necessárias para se realizar um estudo completo de ruído. Com as análises feitas, é possível identificar regiões de interesse previamente, comparar níveis absolutos de pressão sonora, espectros de frequência e níveis de ruído de medições, de forma a caracterizar as ondas sonoras emitidas por um aerogerador. Utilizando análises, descartou-se inclusive as medições feitas sem a proteção do microfone (medição 01), pois suas anormalidades se mostraram de forma evidente nos resultados.

Dessa forma, o trabalho presente pode ser facilmente replicado, desde o momento de sua configuração até o momento da análise dos resultados. Pode assim ser usado como auxílio para estudos futuros de ruído em aerogeradores de grande porte.

5.2 Recomendações de trabalho futuro

O presente trabalho pode servir de ponto de partida para dois campos principais no ramo da energia eólica, o de Engenharia de Manutenção e do da Engenharia Ambiental.

No primeiro pode-se realizar o estudo de frequências características de ruído de pás, e realizar monitoramentos periódicos a fim de se identificar como se alteram essas frequências. O resultado pode ser utilizado como manutenção preditiva, e ter como resultado prático a economia do operador do aerogerador. Nesse caso é recomendável que o pesquisador utilize a tela secundária de proteção do microfone, de modo a obter frequências mais baixas de forma mais limpa; também é interessante que se utilize de filtros voltados para o estudo de baixa frequência, como o filtro G. É importante notar que para se caracterizar o ruído de um aerogerador, é importante que se realize um acompanhamento que envolva pelo menos um ciclo climático (no caso, um ano).

No caso da Engenharia Ambiental, um estudo qualitativo de psico acústica poderia ser feito aliado a estudos de ruído in loco, de forma a buscar uma correlação de efeitos e causas.

REFERÊNCIAS

- AMBROSE, S. E.; RAND, R. W.; KROGH, C. M. E. Wind turbine acoustic investigation: Infrasound and low-frequency noise—a case study. *Bulletin of Science Technology & Society*, v. 32, p. 128–141, 2012.
- BAKKER, R. et al. Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of The Total Environment*, v. 425, p. 42 – 51, 2012. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712003373>>.
- DODGE, D. M. *The illustrated history of wind power development*. 2006. Disponível em: <<http://www.telosnet.com/wind/>>. Acesso em: 30 out. 2013.
- EVEREST, F.; POHLMANN, K. *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill Education, 2009. ISBN 9780071603331. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6tiJ1cwnwxoC>>.
- GIPE., P. *Wind energy comes of age*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 1995.
- GIPE, P. *Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business*. 2nd. ed. [S.l.]: Chelsea Green Publishing, 2004.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *Global statistics*. 2015. Disponível em: <<http://www.gwec.net/>>. Acesso em: 20 abr. 2015.
- GOELZER, B.; HANSEN, C. H.; SEHRNDT, G. *Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control*. [S.l.]: World Health Organisation, 2001.
- IEC. *Electroacoustics - Sound level meters Part 1: Specifications*. 2002.
- IMPSA.COM. *produtos*. 2015. Disponível em: <<http://www.impsa.com/pt/produtos/impsawind/SitePages/produtos.aspx>>.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Wind Turbine Generator Systems-Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques. IEC 61400-11*. 2002.
- ISO226:2003 - Acoustics. Normal Equal-Loudness-Level Contours. Geneva, CH, 2003. v. 2003.
- ISO7196:1995 (E) Acoustics - Frequency weighting characteristic for infrasound measurements. Geneva, CH, 1995. v. 1995.
- JAMES, R. R. Wind turbine infra and low-frequency sound: Warning signs that were not heard. *Bulletin of Science, Technology & Society*, v. 32, p. 108–127, 2012.
- KALDELLI, J. K.; D.ZAFIRAKIS. The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*, v. 36, p. 1887–1901, 2011.

KINSLER, L. *Fundamentals of acoustics*. Wiley, 2000. ISBN 9780471847892. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=76IRAQAIAAJ>>.

KLUG, H. Noise from wind turbines standards and noise reduction procedures. In: *Forum Acusticum, Sevilla, Spain*. [S.l.: s.n.], 2002.

LAGROYE, I. et al. {ELF} magnetic fields: Animal studies, mechanisms of action. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, v. 107, n. 3, p. 369 – 373, 2011. ISSN 0079-6107. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610711001027>>.

LEVENTHALL, G. Infrasound from wind turbines - fact, fiction or deception. *Canadian Acoustics / Acoustique canadienne*, v. 34, n. 2, p. 29 – 36, 2006.

LI, J. et al. A new noise-controlled second-order enhanced stochastic resonance method with its application in wind turbine drivetrain fault diagnosis. *Renewable Energy*, v. 60, p. 7–19, 2013.

LYON, F. -. J. . IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to H. *Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*. Lyon: WHO International Agency for Research on Cancer., 2002. ((IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans; vol. 80 part 1).).

MANWELL, J.; MCGOWAN, J.; ROGERS., A. *Wind energy explained : theory, design, and application*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2009.

METERS, A. S1. 4-1983. *New York, NY, Feb.*

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. *Resultado dos Leiloes de Energia Eletrica - 17o Leilao de Energia Nova*. 2013. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

MUEHLEISEN, R. *Virtual Sound Level Meter versão 0.4.1*. Chicago, EUA, 2013. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/vslm/>>.

NBR10.151 - Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. [S.l.], 2000.

PEREZ, J. M. P. et al. Wind turbine reliability analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 463–472, 2013.

PIGGOTT, H. *Travel Diaries to Denmark*. 2013. Disponível em: <<http://www.scoraigwind.com/dk99>>. Acesso em: 2013.11.24.

PUNCH, J.; JAMES, R.; PABST, D. Wind turbine noise: What audiologists should know. *Audiology Today*, p. 20 – 31, Jul / Ago 2010.

SALT, A. N.; HULLAR, T. E. Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research*, v. 268, n. 1a2, p. 12 – 21, 2010. ISSN 0378-5955. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378595510003126>>.

SCHMIDT, J. H.; KLOKKER, M. Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review. *PLoS ONE*, v. 9, n. 12, p. e114183, 2014.

SMALES, I. *Impacts of avian collisions with wind power turbines: an overview of the modelling of cumulative risks posed by multiple wind farms*. [S.l.], 02 2006.

SYSTEMS, E. A. *Acoustical 101 - Empire Acoustical Systems*. 2015. Disponível em: <<http://www.empireacoustical.com/acoustical-101/>>.

VER, I. L.; BERANEK, L. L. Noise and vibration control engineering. *Principles and Applications, Second Edition, ISBN*, Wiley Online Library, v. 471449423, p. 15–18, 2008.

WAGNER, S.; BAREIS, R.; GUIDATI, G. *Wind Turbine Noise*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1996. 183-194 p. ISBN 978-3-642-88712-3.

WELCH, P. D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967.

ZHU, W. J. *Modelling of Noise rom Wind Turbine*. Dissertação (Mestrado) — Technical University of Denmark, 2004.