



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

FELIPE MARTINS DE SOUSA

**PREDIÇÃO DO RUÍDO AERODINÂMICO DA PÁ DE UM TÍPICO
AEROGERADOR DE GRANDE PORTE**

FORTALEZA

2017

FELIPE MARTINS DE SOUSA

PREDIÇÃO DO RUÍDO AERODINÂMICO DA PÁ DE UM TÍPICO AEROGERADOR DE
GRANDE PORTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S696p Sousa, Felipe Martins de.
Predição do ruído aerodinâmico da pá de um típico aerogerador de grande porte / Felipe Martins de Sousa.
– 2017.
78 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior.

1. Ruído. 2. Ffowcs-Williams e Hawkins. 3. Energia eólica. I. Título.

CDD 620.1

FELIPE MARTINS DE SOUSA

PREDIÇÃO DO RUÍDO AERODINÂMICO DA PÁ DE UM TÍPICO
AEROGERADOR DE GRANDE PORTE

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 28/11/2017

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. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

À minha namorada, Paula Eva.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior, pela excelente orientação.

À minha mãe, Tarcísia.

À minha namorada, Paula Eva.

Ao secretário do programa de pós-graduação Valdi Matos, por sempre ajudar quando preciso.

Aos professores da banca examinadora, prof. Dr. Emerson Mariano da Silva e Prof.^a Dra. Carla Freitas de Andrade.

Aos colegas de Mestrado.

Aos professores do programa de pós-graduação, em especial ao Prof. Dr. Paulo Alexandre.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

“Não conte os dias, faça com que os dias contem.”

Muhammad Ali

RESUMO

Estudos e pesquisas apontam que o Nordeste do Brasil é a região deste país mais propícia para a geração de energia eólica, com destaque para os estados do Ceará e Rio Grande do Norte. Além do potencial eólico, o ruído emitido é um fator importante na determinação do local de instalação de turbinas eólicas, o que dificulta a aceitação de sua instalação em virtude do incômodo e problemas de saúde causados pela emissão de ruído. Desta forma, a estimativa do ruído é um aspecto relevante na instalação de um aerogerador. O presente trabalho tem como principal objetivo a predição do ruído aerodinâmico da pá de um típico aerogerador de grande porte, baseado na analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkings (FW-H) com o auxílio do CFD (*Computational Fluid Dynamics*) comercial ANSYS Fluent. Foram realizadas simulações com o modelo de turbulência LES em duas dimensões em diferentes secções ao longo da pá e em três dimensões na pá completa sem rotação. Os resultados obtidos nas simulações pela analogia acústica FW-H mostram que o ruído é mais elevado nas secções mais próximas da ponta da pá, devido ao escoamento do vento ser cada vez maior à medida que se aproxima desta região. Os dados obtidos nas simulações em três dimensões indicam que o ruído na direção à jusante e a montante do plano do rotor apresentam os valores mais elevados em comparação com os obtidos no plano do rotor.

Palavras-chave: Ruído. Ffowcs-Williams e Hawkings. Energia Eólica.

ABSTRACT

Studies and research indicate that the Northeast of Brazil is the region of this country more propitious for the generation of wind energy, especially in the states of Ceará and Rio Grande do Norte. In addition to the wind potential, the emitted noise is an important factor in determining the location of wind turbine installation, which makes it difficult to accept its installation due to the annoyance and health problems caused by the noise emission. In this way the noise estimation is one of the most relevant aspects in the installation of a wind turbine. The present work has as main objective the prediction of the aerodynamic noise of the blade of a typical large aerogenerator, based on the acoustic analogy of Ffowcs-Williams and Hawkings (FW-H) with the help of CFD (Computational Fluid Dynamics) commercial ANSYS Fluent. Simulations were performed with the LES turbulence model in two dimensions in different sections along the blade and in three dimensions in the complete blade without rotation. The results obtained in the simulations by the FW-H acoustic analogy show that the noise is higher in the sections closer to the blade tip, because the wind flow is increasing as it approaches this region. The data obtained in the three-dimensional simulations indicate that the noise upstream and downstream of the rotor plane have the highest values compared to those obtained in the rotor plane.

Keywords: Noise. Ffowcs-Williams and Hawkings. Wind Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Principais marcos do desenvolvimento de aerogeradores no século XX.....	16
Figura 2	– Aerogerador de eixo vertical (<i>Darreius</i>).....	24
Figura 3	– Aerogerador de eixo horizontal.....	25
Figura 4	– Fundação de uma turbina eólica antes (a) e depois (b) da betonagem de um parque eólico de Fontelas (Portugal).....	28
Figura 5	– Mecanismos fonte de ruído aerodinâmico sobre um aerofólio.....	33
Figura 6	– Ruído de influxo turbulento.....	34
Figura 7	– Ruído de bordo de fuga de camada limite turbulenta.....	35
Figura 8	– Ruído de separação-estol.....	36
Figura 9	– Ruído de vórtices de esteira da camada limite laminar.....	37
Figura 10	– Ruído de vórtices formados na ponta da pá.....	38
Figura 11	– Ruído de vórtices de esteira do bordo de fuga rígido.....	38
Figura 12	– Esquema representando a superfície de controle S	43
Figura 13	– Diagrama representando os algoritmos dos esquemas ITA e NITA.....	48
Figura 14	– Geometria do problema para o caso do cilindro.....	49
Figura 15	– Malha gerada para o escoamento do ar em torno do cilindro.....	49
Figura 16	– Velocidade e ângulos.....	52
Figura 17	– Malha em C usada nas simulações bidimensionais.....	53
Figura 18	– Malha em C (a) malha próximo ao perfil NREL S830 (b).....	53
Figura 19	– Pá utilizada nas simulações em três dimensões.....	54
Figura 20	– Volume de Fluido.....	54
Figura 21	– Malha na superfície da pá (a) e malha no volume de fluido (b).....	55
Figura 22	– Esquema do efeito convectivo no cálculo do tempo retardado.....	56
Figura 23	– Posição e distância dos receptores.....	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Capacidade instalada (2001-2016).....	22
Gráfico 2	– Comparação dos algoritmos ITA e NITA.....	58
Gráfico 3	– Diretividade do ruído no elemento de pá 1	60
Gráfico 4	– Diretividade do ruído no elemento de pá 2.....	61
Gráfico 5	– Diretividade do ruído no elemento de pá 3.....	62
Gráfico 6	– Diretividade do ruído no elemento de pá 4.....	63
Gráfico 7	– Diretividade do ruído no elemento de pá 5.....	63
Gráfico 8	– Diretividade do ruído no elemento de pá 6.....	64
Gráfico 9	– Diretividade do ruído no elemento de pá 7.....	65
Gráfico 10	– Diretividade do ruído no elemento de pá 8.....	65
Gráfico 11	– Diretividade do ruído no elemento de pá 9.....	66
Gráfico 12	– Diretividade do ruído no elemento de pá 10.....	67
Gráfico 13	– Nível de pressão sonora x frequência na direção mais a jusante (90°) do plano do rotor a 100 m.....	68
Gráfico 14	– Nível de pressão sonora x frequência na direção mais a jusante (90°) do plano do rotor a 300 m.....	68
Gráfico 15	– Nível de pressão sonora x frequência na direção mais a jusante (90°) do plano do rotor a 500 m.....	69
Gráfico 16	– Diretividade do ruído da pá para uma banda de frequência de 500 Hz.....	70
Gráfico 17	– Diretividade do ruído da pá para uma banda de frequência de 1kHz.....	70
Gráfico 18	– Diretividade do ruído da pá do nível de pressão sonora total (OASPL).....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade Instalada por estado em 2016	23
Tabela 2 – Mortalidade anual de aves por atividades humanas.....	27
Tabela 3 – Comparação do ruído gerado por diversas atividades humanas	30
Tabela 4 – Elementos de pá.....	51
Tabela 5 – Velocidade relativa para os elementos de pá.....	52
Tabela 6 – Comparação dos resultados obtidos de OASPL, com resultados experimentais e simulados para o problema do cilindro.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
CFD	Computational Fluid Dynamics
EWEA	European Wind Energy Association
FW-H	Ffowcs-Williams e Hawkings
GWEC	Global Wind Energy Council
ITA	Iterative Time Advancement
LBL	Laminar Boudary Layer
LES	Large Eddy Simulation
MATLAB	MATrix LABoratory
NITA	Non-Iterative Time Advancement
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OASPL	Overall Sound Pressure Level
SPL	Sound Pressure Level
TBL	Turbulent Boundary Layer
TE	Trailing Edge
VS	Vortex Shedding

LISTA DE SÍMBOLOS

Re	Número de Reynolds
ρ	Densidade do fluido
u_i	Vetor velocidade do fluido
p	Pressão do fluido
τ_{ij}	Tensor de tensões viscosas
c_0	Velocidade do som
ρ'	Flutuação de densidade
ρ_0	Densidade do meio em repouso
T_{ij}	Tensor de Lighthill
δ_{ij}	Delta de Kronecker
t_{ret}	Tempo atrasado
S	Superfície de controle
$f(x_i, t)$	Superfície de controle na equação de FW-H
n_i	Vetor normal orientado para o exterior da superfície
v_i	Velocidade da superfície de controle
$H(f)$	Função Heaviside
p'	Pressão acústica
v_j	Velocidade na direção normal da superfície da lâmina
l_i	Força por unidade de área no fluido
p_{ij}	Tensor de tensão de compressão
∇^2	Laplaciano
τ	Tempo atrasado
t	Tempo
x_i	Vetor posição da fonte
y_i	Vetor posição do observador
P_T	Ruído de espessura (<i>thickness noise</i>)
P_L	Ruído de carregamento (<i>loading noise</i>)
M_r	Número de Mach relativo
$c(r)$	Corda da pá
π	Pi

r	Distância do elemento de pá para o eixo de rotação
B	Número de pás
C_L	Coefficiente de sustentação
R	Raio do rotor
X	Velocidade de ponta da pá
$\beta(r)$	Torção da pá
φ	Ângulo de fluxo
α	Ângulo de ataque
w	Velocidade relativa do vento
v_1	Velocidade do vento
a	Fator de indução axial
ω	Velocidade angular
α'	Fator de indução tangencial
L_{sp}	Nível de pressão sonora
P	Densidade espectral de potência
p_{ref}	Pressão acústica de referência
l	Longitude característica do fluido
μ	Viscosidade dinâmica do fluido

SUMÁRIO

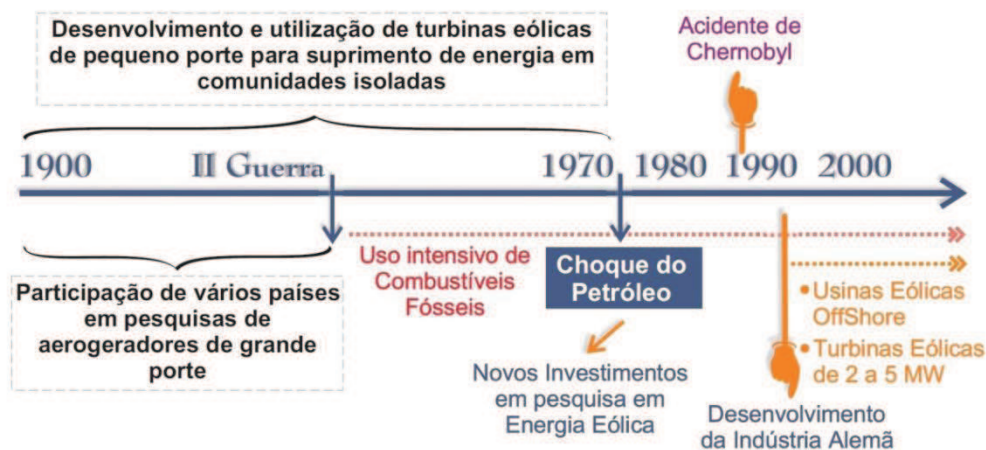
1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	Panorama da Energia Eólica	21
<i>3.1.1</i>	<i>Cenário Global</i>	21
<i>3.1.2</i>	<i>Panorama do Brasil</i>	22
3.2	Tipos de Aerogeradores	23
<i>3.2.1</i>	<i>Aerogerador de eixo vertical</i>	23
<i>3.2.2</i>	<i>Aerogerador de eixo horizontal</i>	24
3.3	Impactos Ambientais	26
<i>3.3.1</i>	<i>Meio Biótico</i>	26
<i>3.3.2</i>	<i>Meio Físico</i>	27
<i>3.3.3</i>	<i>Meio Socioeconômico</i>	29
3.4	Fontes de Ruídos em Turbinas Eólicas	31
<i>3.4.1</i>	<i>Ruído Mecânico</i>	31
<i>3.4.2</i>	<i>Ruído Aerodinâmico</i>	32
3.5	Autoruído do Aerofólio	34
<i>3.5.1</i>	<i>Ruído Bordo de Fuga de Camada Limite Turbulenta</i>	35
<i>3.5.2</i>	<i>Ruído de Separação–Estol</i>	36
<i>3.5.3</i>	<i>Ruído de Vórtices de Esteira da Camada Limite Laminar</i>	37
<i>3.5.4</i>	<i>Ruído de Vórtices Formados na Ponta da Pá</i>	37
<i>3.5.5</i>	<i>Ruído de Vórtices de Esteira do Bordo de Fuga Rígido</i>	38
3.6	Analogia Acústica	39
<i>3.6.1</i>	<i>Analogia de Lighthill</i>	40
<i>3.6.2</i>	<i>Analogia de Ffowcs Williams-Hawkings</i>	43
4	METODOLOGIA	47
4.1	Comparação dos algoritmos ITA e NITA	47
4.2	Validação	48
4.3	Elementos de pá	50

4.4	Simulações Bidimensionais	51
4.5	Simulações Tridimensionais	54
5	RESULTADOS	58
5.1	Comparação dos algoritmos ITA e NITA	58
5.2	Validação	59
5.3	Simulações Bidimensionais	60
5.4	Simulações Tridimensionais	69
6	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

O primeiro registro histórico do emprego da energia eólica remonta da Pérsia (por volta de 200 A.C.), onde cata-ventos de eixo vertical eram utilizados para o bombeamento de água e moagem de grãos, por meio da força motriz do vento. Através do retorno das cruzadas estas máquinas primitivas foram inseridas na Europa, persistindo até o século XII quando começaram a utilizar moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda, entre outros. O primeiro cata-vento destinado à geração elétrica surgiu em 1888, em Cleveland, Ohio desenvolvido por Charles F. Brush. Com a Segunda Guerra Mundial (1939 - 1945) os países em geral empenharam grandes esforços em economizar combustíveis fósseis, o que contribuiu para o desenvolvimento de aerogeradores de médio e grande porte, Figura 1. O petróleo e as grandes hidrelétricas se tornaram competitivas após a Segunda Guerra Mundial, assim os aerogeradores foram construídos para fins de pesquisa (CRESESB, 2008).

Figura 1 – Principais marcos do desenvolvimento de aerogeradores no século XX.



Fonte: CRESESB (2008).

A alta do preço do petróleo na década de 70 e problemas encontrados na operação de usinas nucleares contribuíram para um grande aumento no interesse em energias alternativas, com destaque para a energia dos ventos, pela sua disponibilidade e por serem uma fonte de energia renovável e de exploração técnica e economicamente viável (SILVA, 1999).

Estudos e pesquisas assinalam que o Nordeste do Brasil é a região mais propícia para a geração de energia eólica e solar, em virtude de suas condições meteorológicas e localização geográfica, com destaque para os estados do Ceará e Rio Grande do Norte (CARVALHO, 2012). Segundo Reinaldo (2013), mapas eólicos desenvolvidos pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica indica que a região Nordeste tem um dos melhores reservatórios do mundo, com boa velocidade do vento, baixa turbulência e uniformidade, com um potencial estimado em 30 mil megawatts (MW) e maior intensidade dos ventos nos períodos de seca (de junho a dezembro), quando a geração de energia das hidrelétricas diminui.

De acordo com Costa (2014), além do potencial eólico o ruído emitido é um fator importante na determinação do local de instalação de turbinas eólicas de pequeno e grande porte, o que dificulta a aceitação de sua instalação, pelo fato de seu ruído ser percebido.

Desta forma, embasado no que foi apresentado, a predição do ruído é um dos aspectos mais relevantes na instalação de um aerogerador. Portanto, um método capaz de prever o ruído gerado por turbinas eólicas, torna-se necessário.

1.1 Justificativa

O emprego de energia eólica vem crescendo de forma rápida como uma energia renovável e limpa, porém, o ruído gerado por uma turbina eólica moderna é um dos principais problemas para a comunidade próxima de um parque eólico. As principais fontes de ruído de turbinas eólicas modernas são o ruído de influxo turbulento (induzido pela dispersão de flutuações de turbulência atmosférica no bordo de ataque da pá, por vezes referido como ruído do bordo de ataque) e o ruído do bordo de fuga (devido à passagem da camada limite turbulenta por meio de um bordo afiado, como o bordo de fuga), ambos os mecanismos são ruídos de banda larga e dependem das dimensões da turbina e condições de turbulência da atmosfera (TIAN *et al.*, 2013).

Segundo Simões (2015), as preocupações na instalação de aerogeradores são em virtude da emissão de ruído causando incômodo nas pessoas, assim como problemas de saúde. Populações vizinhas a parques eólicos, após a sua instalação, reclamam de perturbações de sono, dores de cabeça, zumbido, pressão no ouvido, estontamento, vertigem, náuseas, turvamento visual, taquicardia, irritabilidade, problemas com concentração e memória, e episódios de pânico associados com sensações de pulsação interna ou vibração,

geralmente ao acordar ou adormecer. Quando estas pessoas passavam vários dias longe de casa os sintomas desapareciam, mas reapareciam quando voltavam para casa.

Uma das áreas de pesquisa que tem mais crescido atualmente é a do ruído sonoro que tem despertado a atenção da população, sendo assim essencial a sua redução para o bem-estar da mesma, proporcionando economia de recursos financeiros em função da maior produtividade, redução de gastos com tratamentos de saúde, redução da incidência de doenças relacionadas ao estresse entre outros (NOVAK, 2011).

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo a predição do ruído aerodinâmico da pá de um típico aerogerador de grande porte de eixo horizontal (*onshore*), baseado na analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkins (FW-H) com o auxílio do CFD (*Computational Fluid Dynamics*) comercial ANSYS Fluent. Os objetivos específicos foram:

- Utilizar a analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkins para predizer o ruído aerodinâmico da pá de uma turbina eólica de grande porte.
- Comparar os algoritmos com esquema de tempo de avanço iterativo (ITA) e tempo de avanço não iterativo (NITA).
- Comparar os resultados simulados para um escoamento em torno de um cilindro, com resultados experimentais e simulados por outros autores.
- Obter a diretividade do ruído e o nível de pressão sonora a jusante do plano do rotor em diferentes secções da pá utilizando a equação da velocidade relativa do vento.
- Obter a diretividade do ruído da pá em três dimensões sem rotação (estática).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta alguns dos principais trabalhos sobre o ruído de turbinas eólicas, uma vez que existem muitos trabalhos disponíveis na literatura, sendo este um tema de grande interesse pela comunidade científica.

Oerlemans *et al.* (2007) realizaram medições de campo acústico para caracterizar fontes de ruído e examinar se o ruído no bordo de fuga de uma turbina eólica de três pás e rotor com diâmetro de 58 metros era dominante. Um grande conjunto de microfones horizontais foi usado para medir a distribuição das fontes de ruído no plano do rotor e sobre as lâminas individuais, tendo um total de mais de 100 medições realizadas com velocidades de vento entre 6 e 10 m/s. Os resultados revelam que praticamente todo o ruído é produzido durante o movimento de descida das pás e mostraram de forma expressiva que o ruído bordo de fuga de banda larga é a fonte de ruído dominante para esta turbina eólica.

Tadamasa e Zangeneh (2011) desenvolveram e validaram um método numérico para prever o ruído irradiado a partir da rotação das pás de uma turbina eólica de eixo horizontal. O ruído irradiado no campo distante foi previsto pelo código baseado na equação de Ffowcs-Williams e Hawkins (FW-H) usando tanto a formulação original não permeável quanto a permeável. Para calcular os parâmetros de escoamento em torno e sobre a superfície da lâmina necessários para os códigos FW-H foi utilizado o CFD comercial ANSYS CFX. Os códigos FW-H foram validados com resultados acústicos de rotor de helicóptero UH-1H que foram medidos em túnel de vento anecóica (à prova de som). Posteriormente, os códigos acústicos FW-H desenvolvidos foram utilizados para calcular o ruído irradiado de pás de turbinas eólicas NREL Fase VI.

Jianu *et al.* (2012) revisaram estudos recentes na área da poluição sonora a partir de aerogeradores, tendo como objetivo analisar e comparar os diferentes métodos atualmente a serem implementados e investigados para reduzir a produção de ruído de turbinas eólicas, com foco sobre o ruído gerado a partir do bordo de fuga da pá de uma turbina eólica. Estratégias para reduzir o ruído aerodinâmico incluem abordagens adaptativas e métodos de modificação de pás de turbinas eólicas.

Tian *et al.* (2013) examinou em detalhes os dois principais mecanismos de ruído de banda larga (ruído de influxo turbulento e ruído do bordo de fuga) utilizando modelos de previsão de ruído no domínio da frequência baseado na teoria analítica de Amiet, tendo como objetivo propor melhorias em turbinas eólicas. Primeiro, um modelo espectral de pressão

lateral recentemente proposto é aplicado ao modelo de Amiet, em seguida uma correção empírica da espessura do aerofólio é proposta no modelo de ruído de influxo turbulento. Os resultados dos cálculos são validados por comparação com dados experimentais de túnel de vento e com medições realizadas em um aerogerador. Este modelo também é utilizado para quantificar a modulação de amplitude que pode ser uma fonte de incômodo na vizinhança de um parque eólico.

Lee *et al.* (2013) modelaram numericamente o ruído aerodinâmico no domínio do tempo para comparar as características acústicas de uma turbina eólica em função da localização do observador. O modelo analítico do ruído de bordo de fuga proposto por Amiet é utilizado para determinar a pressão instável na superfície da pá e o ruído de campo distante devido à pressão instável é calculado através da analogia acústica. Os resultados numéricos obtidos indicam que as características acústicas do ruído de um aerogerador podem ser bastante distintas em relação à distância e a direção de uma turbina eólica, embora as condições de operação e atmosféricas sejam idênticas.

Wasala *et al.* (2015) realizaram simulações de grandes escalas (LES) na região da pá que produz as fontes acústicas mais significativas, usando um domínio computacional anular, o que leva a uma redução significativa da despesa computacional em comparação com simulações de pá completa. A analogia de Ffowcs-Williams e Hawkings foi utilizada para prever o som do campo distante. Os resultados numéricos obtidos para simulações de turbina eólica CART-2 mostraram bom acordo com os dados experimentais disponíveis.

Van der Velden *et al.* (2016) realizaram uma simulação numérica do escoamento do bordo de fuga utilizando o método de Lattice-Boltzmann que fornece uma alternativa eficiente para a solução numérica de problemas complexos de escoamento em diferentes números de Reynolds e Mach. O pacote do software comercial Exa PowerFLOW 5.0b foi utilizado para resolver a equação de Lattice-Boltzmann para um número finito de direções. A validação dos resultados numéricos é baseada em dados experimentais obtidos de Velocimetria por imagem de partículas e anemômetro de fio quente com número de Reynolds e Mach idênticos. Os resultados obtidos em simulação se comparam de forma satisfatória com os dados experimentais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as bases fundamentais sobre as quais o trabalho é realizado. A seção 3.1, apresenta o panorama da energia eólica no Brasil e no mundo e a seção 3.2, os tipos de aerogeradores (rotores de eixo vertical e horizontal). A seção 3.3, explana de modo geral os impactos ambientais gerados por aerogeradores.

Na seção 3.4, são apresentados os tipos de fontes de ruído em aerogeradores (ruído mecânico e aerodinâmico). O ruído aerodinâmico de interesse neste estudo (autoruído do aerofólio) está na seção 3.5 e a seção 3.6 apresenta a teoria da analogia acústica (de Lighthill e a de Ffowcs-Williams e Hawkings) utilizado neste trabalho para predizer o ruído aerodinâmico.

3.1 Panorama da Energia Eólica

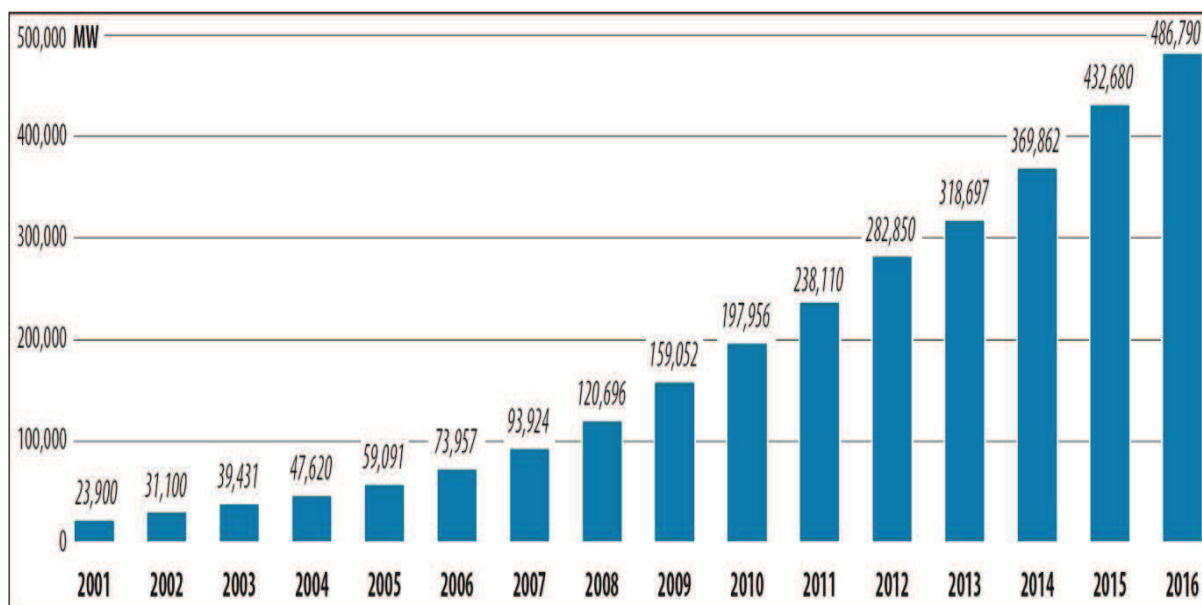
3.1.1 Cenário Global

A pioneira no aproveitamento da energia eólica foi a Europa, onde historicamente ocorreram os maiores desenvolvimentos tecnológicos, em especial na Alemanha e Espanha, de onde nasceram os principais fabricantes de aerogeradores (LAGE e PROCESSI, 2013).

De acordo com o relatório da *Global Wind Energy Council* (GWEC) de 2017, no final do ano de 2016, a capacidade instalada de energia eólica no mundo atingiu 486,8 gigawatts (GW), um setor que hoje está presente em mais de 80 países, o que representa um crescimento de mais de 2000% em relação ao final de 2001 (Gráfico 1).

O setor de energia eólica *offshore* em 2016 alcançou um total acumulado de 14.384 MW de capacidade instalada, com 2.219 MW de novas instalações de janeiro a dezembro, quase 88% (12.631 MW) de todas as instalações eólicas offshore localizam-se na costa de 10 países europeus.

Gráfico 1 – Capacidade instalada (2001-2016).



Fonte: Adaptado de GWEC (2017).

3.1.2 Panorama do Brasil

No ano de 2016, o Brasil adicionou 2.014 MW de nova capacidade de energia eólica (Instalando 947 turbinas eólicas em 81 parques), estando entre os 10 países em capacidade eólica instalada ao final de 2016 com mais de 10,74 GW, equivalente a 7% da capacidade nacional de eletricidade (GWEC, 2017).

De acordo com o boletim anual de geração eólica da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) de 2016, o Brasil conta com um total de 430 usinas eólicas, destas 81 usinas foram instaladas no ano de 2016, trazendo um aumento de mais de 2,0 GW de capacidade instalada, o que representa 7,1% da matriz elétrica brasileira.

O estado do Ceará instalou mais de 485 MW de nova capacidade no ano de 2016, ficando atrás do estado do Rio Grande do Norte com 640 megawatts de nova capacidade instalada. O Rio Grande do Norte é o estado com a maior capacidade instalada até o final de 2016 com 3.420 MW, o estado do Ceará é o terceiro com 1.789 MW, Tabela 1.

Tabela 1 – Capacidade Instalada por estado em 2016.

Estado	Capacidade Instalada	Número de parques eólicos
Rio Grande do Norte	3,420	125
Bahia	1,898	73
Ceará	1,789	68
Rio Grande do Sul	1,695	72
Piauí	915	33
Pernambuco	651	29
Santa Catarina	239	14
Paraíba	69	13
Sergipe	35	1
Rio de Janeiro	28	1
Paraná	3	1
Total	10,742	430

Fonte: Adaptado de GWEC (2017).

3.2 Tipos de Aerogeradores

A configuração do eixo do rotor é a principal forma de caracterizar uma turbina eólica. Basicamente, existem dois tipos de aerogeradores: com rotor de eixo vertical e com eixo horizontal. O presente trabalho tem como objetivo, a predição do ruído aerodinâmico da pá de uma turbina eólica com rotor de eixo horizontal *onshore*.

3.2.1 Aerogerador de eixo vertical

Segundo Santos *et. al.* (2006), de modo geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, reduzindo a complexidade do projeto e os esforços devido às forças de *Coriolis*. Estes aerogeradores também podem ser movidos por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são *Darrieus* (Figura 2), *Savonius* e turbinas com torre de vórtices.

Figura 2 – Aerogerador de eixo vertical (*Darrieus*).



Fonte: Sutherland *et al.* (2012).

3.2.2 Aerogerador de eixo horizontal

De acordo com Santos *et al.* (2006), os rotores de eixo horizontal (Figura 3) são movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (que dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque) e forças de arrasto, sendo os mais comuns, e grande parte da experiência mundial estão voltadas para a sua utilização. Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação, permitem liberar muito mais potência em comparação com os que giram sob o efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade do vento.

Figura 3 – Aeroerador de eixo horizontal.



Fonte: Hau (2006).

Os aerogeradores de eixo horizontal convencionais são predominantemente movidos por forças de sustentação, e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser construídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás, que podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais (CRESESB, 2008).

Quanto a posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (*downwind*) ou a montante do vento (*upwind*). Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento, a orientação realiza-se automaticamente. Os rotores mais utilizados para a geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) de 1 ou 2 pás (CRESESB, 2008).

3.3 Impactos Ambientais

Os principais impactos ambientais gerados pela instalação de turbinas eólicas são sobre o meio biótico (alteração no ecossistema, colisões de aves e morcegos com turbinas eólicas e mudança na rota migratória de aves), o meio físico (impermeabilização e compactação do solo e alteração no nível do lençol freático) e o meio socioeconômico (ruídos, impacto visual e interferência eletromagnética).

3.3.1 Meio Biótico

De acordo com a *European Wind Energy Association* (EWEA, 2009), parques eólicos com estrutura vertical, podem representar riscos para as aves migratórias e residentes. Porém, uma conclusão sobre os impactos da energia eólica em aves é difícil por várias razões, pois variam entre as diferentes espécies e dependem das características de cada local. Os tipos de riscos que podem afetar as aves são as colisões com as turbinas causando morte ou ferimentos, a perturbação e a redução ou perda de seu habitat.

No final de 1993, nas proximidades de Tarifa, na Espanha, onde foram instaladas 296 turbinas eólicas (de um total de 2.000) ocorreu o pior caso de colisão de pássaros com aerogeradores, devido à dificuldade de visualização (TERCIOTE, 2002). No entanto, o número médio de fatalidades em Tarifa é baixo, entre 0,02 e 0,15 colisões por turbina (EWEA, 2009).

Erickson *et al.* (2005) realizaram um estudo comparativo de mortalidade das aves por atividades humanas, Tabela 2. Um estudo mais recente afirma que a energia eólica é responsável por apenas 0,003 % da mortalidade de aves causadas por atividades humanas (EWEA, 2009).

Estudos realizados com radares na Dinamarca onde foi instalada uma turbina eólica, com 60 m de diâmetro e 2 MW de potência, mostraram que os pássaros tendem a alterar sua rota de voo entre 100 a 200 metros, que sobrevoam por cima ou ao redor dos aerogeradores (GAVINO, 2011).

Tabela 2 – Mortalidade anual de aves por atividades humanas.

Causas	Estimativa de mortalidade anual	%
Edifícios	550 milhões	58.2
Linhas de alta tensão	130 milhões	13.7
Gatos	100 milhões	10.6
Automóveis	80 milhões	8.5
Pesticidas	67 milhões	7.1
Torres de comunicação	4.5 milhões	0.5
Turbinas Eólicas	28.5 mil	<0.01
Aviões	25 mil	<0.01

Fonte: Adaptado de Erickson *et al.* (2005).

Segundo Sovernigo (2009), nos últimos tempos tem-se detectado um número cada vez maior de morcegos mortos próximos a turbinas eólicas, devido ao fato dos estudos sobre impacto ambiental de aerogeradores não abranger a quiropterofauna uma década atrás. Para explicar e reduzir essa mortalidade em morcegos que possuem ecolocalização, várias explicações têm sido propostas, a maioria sobre a atração de morcegos por insetos para a sua alimentação, outra hipótese afirma que durante a migração, os morcegos não utilizam ecolocalização.

Com relação à flora, a instalação de parques eólicos em áreas florestais resulta em alteração do habitat original, causando perda imediata ou de longa duração da floresta que pode estender-se de 150 a 300 metros da fronteira do parque eólico (TUPI, 2010).

3.3.2 Meio Físico

Geralmente, 99% da área construída de um parque eólico permanece fisicamente disponível para uso, o que permite qualquer atividade agrícola ou pecuária nas proximidades da base da torre (TERCIOTE, 2002).

Resultados de um estudo realizado no Texas (EUA) em quatro dos maiores parques eólicos do mundo, com dados obtidos entre 2003 e 2011 após observação de satélites, indicam um aquecimento do solo durante a noite e um arrefecimento durante o dia com

temperaturas variando entre $-0,4$ e $1,5^{\circ}$ C por década, podendo influenciar na produção agrícola e nas comunidades próximas ao parque (TENDERO, 2013).

Num aerogerador de 1,5 MW, a carcaça ou nacele de uma turbina pesa mais de 56 toneladas e o conjunto de pás mais de 36 toneladas, a torre totalmente montada ultrapassa as 163 toneladas (ROSENBLOOM, 2006). Segundo Maia (2010), a fundação de uma turbina eólica deve ser capaz de suportar todas as cargas e ações envolvidas, pelo fato de todos os componentes de um aerogerador pesar toneladas, assegurando que não exista ruptura e que futuros assentamentos diferenciados sejam reduzidos no local onde foi instalada a torre eólica, Figura 4.

Figura 4 – Fundação de uma turbina eólica antes (a) e depois (b) da betonagem no parque eólico de Fontelas (Portugal).



Fonte: Adaptado de Maia (2010).

De acordo com Filho e Azevedo (2013), o nível hidrostático do lençol freático pode ser alterado por meio de atividades de terraplanagem (devido obras de cortes e aterros para a estabilidade dos taludes e compactação de vias para o tráfego de caminhões) no processo de instalação de um parque eólico, o que influencia no fluxo de água subterrânea, e pela fabricação de concreto (devido ao elevado volume de material utilizado) para a construção das fundações das torres eólicas, elevando o consumo de água em sua fabricação.

3.3.3 Meio Socioeconômico

As estruturas de parques eólicos são de grande porte, podendo chegar a 100 metros de altura, com pás que se movimentam em meio estático gerando impactos visuais (COUTINHO, 2012). Contudo, a implantação de um parque eólico não é permanente, assim a área onde as turbinas eólicas foram instaladas pode voltar ao seu estado original após a sua desativação (EWEA, 2009).

Segundo Terciote (2002), para que parques eólicos sejam comercialmente viáveis, devem ser instalados em áreas sem obstáculos naturais. Um parque eólico causa reações subjetivas, enquanto muitas pessoas reagem de forma negativa à nova paisagem, outras veem como um símbolo de energia limpa.

Num estudo realizado na Escócia, 27% de 1810 adultos entrevistados por telefone que residiam próximos de um parque eólico (num raio inferior a 20 km), pensaram que problemas seriam causados sobre a paisagem antes da instalação, no entanto apenas 12% dizem que a paisagem foi estragada. Quanto a uma ampliação do parque eólico existente, 54% apoiariam a expansão se o número de novas turbinas fosse a metade das já existentes, enquanto 9% se opõem. Se a proposta é dobrar o número de turbinas, 42% seria a favor e 21% contra a instalação (BRAUNHOLTZ, 2003).

As turbinas eólicas podem interferir em sinais eletromagnéticos empregados em serviços de telecomunicações, de navegação e de radar. O grau e a natureza destas interferências dependerão de fatores como a localização entre receptor e o transmissor, características das pás do rotor e do receptor, frequência do sinal e da propagação das ondas de rádio na atmosfera local. A torre, as pás rotativas e o gerador são os componentes que causam a interferência em aerogeradores, a torre e as pás podem refletir e refratar as ondas eletromagnéticas. Porém, as pás de turbinas modernas são feitas de materiais sintéticos tendo um impacto mínimo sobre a propagação de radiação eletromagnética (EWEA, 2009).

De acordo com Melo (2009), turbinas eólicas de pequeno porte não geram interferências em aparelhos eletrônicos em virtude de suas pás serem fabricadas em madeira, fibra de vidro e outros compostos não metálicos.

Durante a década de oitenta e início da década de noventa, o impacto ambiental causado pelo ruído de um aerogerador ao girar suas pás foi um dos mais importantes temas de discussão e uma barreira na expansão da energia eólica. Com as novas exigências de um mercado crescente e promissor e o desenvolvimento tecnológico, houve um avanço significativo na diminuição dos níveis de ruído gerados pelas turbinas eólicas (TERCIOTE, 2002).

Segundo Melo (2009), o som é o efeito do movimento ondulatório em gases, líquidos e sólidos, que é determinado por vários mecanismos associados a rápidas flutuações de pressão em baixa escala produzindo sensações ao ouvido humano, sendo o ruído definido como um som indesejável.

O ruído de um aerogerador tem sido um dos impactos ambientais mais estudados desta tecnologia, que em comparação com os impactos visuais, pode ser medido e predito com bastante facilidade. O ruído dentro ou em torno de um parque eólico sofre variações consideráveis dependendo de uma série de fatores, como a disposição das turbinas, o modelo dos aerogeradores instalados, a topografia, o ruído de fundo e a velocidade e direção do vento (EWEA, 2009).

As predições de níveis sonoros medido em decibéis (dB) em futuros parques eólicos são de extrema importância, a fim de prever o impacto do ruído. Com base em dados obtidos do Governo escocês, a Tabela 3 compara o ruído gerado em turbinas eólicas com outras atividades diárias (EWEA, 2009).

Tabela 3 – Comparação do ruído gerado por diversas atividades humanas.

Fonte/atividade	Nível de ruído (dB)
Limite da audição	0
Som noturno em zona rural	20–40
Quarto silencioso	35
Parque eólico a 350 m	35–45
Estrada movimentada a 5 km	35–45
Carro a 65 km/h, a 100 m	55
Escritório movimentado	60
Conversação	60
Caminhão a 50 km/h, a 100 m	65
Trânsito da cidade	90
Martelo pneumático a 7 m	95
Jato a 250 m	105
Limite da dor	140

Fonte: Adaptado de EWEA (2009).

Medidas devem ser adotadas quando há pessoas que vivem nas proximidades de um parque eólico para assegurar que o som gerado pelas turbinas esteja num nível razoável em comparação com o som ambiente. As zonas rurais são mais silenciosas do que as cidades, desta forma o ruído de fundo é geralmente menor. Os parques eólicos estão localizados em zonas de grande circulação de vento, onde o ruído de fundo é maior, disfarçando assim o ruído produzido pelas turbinas. Assim, o objetivo é evitar aborrecimento e interferência na qualidade de vida dos habitantes nas proximidades de um parque eólico (EWEA, 2009).

Segundo Tendero (2013), os ruídos causam uma sensação de desconforto e irritação nas pessoas, que aumenta na proporção que a potência do som se eleva. O ruído próximo de uma turbina eólica de 2,0 MW é de 98 a 109 dB e diminui para 45 dB a uma distância de 250 m do aerogerador, valor próximo do ambiente noturno em zona rural, enquanto que o nível de ruído permanente aconselhado internacionalmente é de 85 dB.

3.4 Fontes de Ruídos em Turbinas Eólicas

Dependendo do desenho da pá, do modelo de torre e da complexidade dos seus componentes mecânicos, os aerogeradores produzem uma vasta variedade de níveis sonoros (COSTA, 2014). As turbinas eólicas geram ruídos de dois tipos, o ruído mecânico com origem na caixa de engrenagens e no gerador, e o ruído aerodinâmico produzido pelo escoamento de ar nas diferentes partes das pás de uma turbina. Por meio de bons materiais de isolamento na nacelle, os aerogeradores modernos praticamente eliminaram o ruído mecânico, assim o ruído aerodinâmico possui a maior parcela na contribuição do ruído de uma turbina eólica (EWEA, 2009).

3.4.1 Ruído Mecânico

Os ruídos mecânicos em aerogeradores de grande porte têm origem no movimento e interação dos seus componentes (multiplicador de velocidades, gerador elétrico, motores de direcionamento, ventiladores do sistema de resfriamento e equipamentos auxiliares), enquanto que a fonte de ruído dos aerogeradores de pequeno porte é do seu gerador elétrico, pelo fato

de possuir uma maior velocidade de operação, não utilizando multiplicadores de velocidade, sistemas de resfriamento e equipamentos hidráulicos de direcionamento do rotor, componentes que contribuem fortemente com o ruído mecânico (MELO, 2009).

De acordo com Tercio (2002), a caixa de engrenagens (funciona com 1000 a 1500 rpm) que multiplica a rotação das pás é o principal componente na geração do ruído mecânico, onde sua vibração é transmitida para as paredes da nacela. A própria torre pode ocasionar ruído, por meio do contato com a nacela.

Com a utilização de dentes de engrenagens bem polidos (minimizando o atrito gerado), de abafadores e isoladores de vibrações, de equipamentos que produzam ruídos na gôndola e de sistemas de resfriamento a óleo (invés de ar), os ruídos mecânicos de aerogeradores de grande porte sofrem redução significativa (COUTINHO, 2012).

Segundo Costa (2014), por meio de melhorias no desenho mecânico qualquer ruído existente é eliminado ou reduzido em comparação com o ruído aerodinâmico. Ocasionalmente, devido às falhas nos rolamentos ou nas partes eletromecânicas, ruídos mecânicos podem ser percebidos.

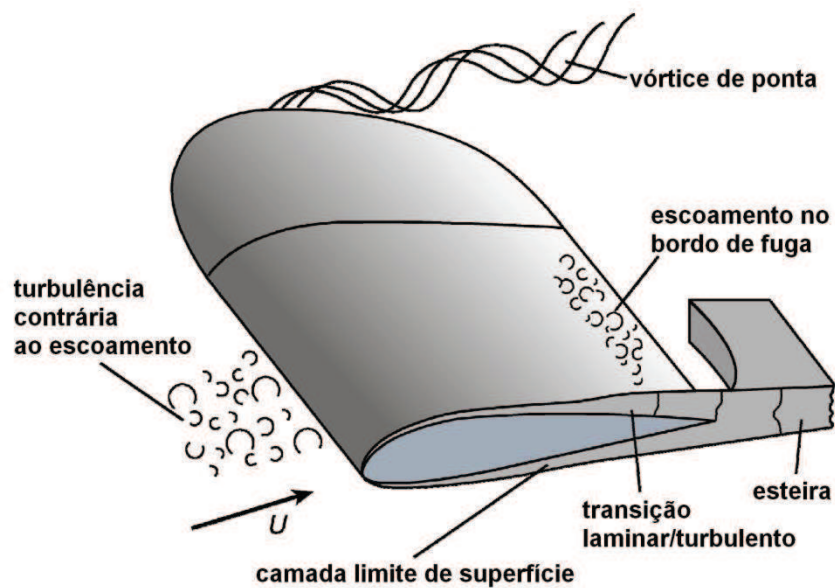
3.4.2 Ruído Aerodinâmico

O som de banda larga aerodinâmico tem normalmente a maior parcela das emissões acústicas de um aerogerador, tendo origem a partir do escoamento do ar em torno das pás, que geralmente aumenta com a velocidade do rotor. Diversos fenômenos complexos de escoamento ocorrem em uma pá de um aerogerador, onde cada um destes gera um tipo de som dividido em três grupos: som de baixa frequência; som de influxo turbulento; e autoruído do aerofólio (ROGERS *et al.*, 2006).

Segundo Jianu *et al.* (2012), de modo geral existem seis regiões ao longo do perfil da pá que produzem ruído, Figura 5. Estas regiões são independentes e geram ruídos específicos não interferindo uns com os outros, pelo fato de ocorrerem em diferentes regiões ao longo do aerofólio. As seis regiões estão divididas em ruído do bordo de fuga de camada limite turbulenta, ruído de desprendimento de vórtices da camada limite laminar, ruído de separação-estol, ruído de desprendimento de vórtices do bordo de fuga rígido, ruído de vórtices formados na ponta e ruído devido ao influxo turbulento.

De acordo com Oerlemans (2009), de modo geral, um escoamento turbulento aproxima-se do bordo de ataque, uma camada limite desenvolve-se ao longo da superfície e a turbulência desta camada limite propaga-se após o bordo de fuga. A diferença de pressão entre a sucção e a pressão na pá causa um vórtice na ponta. O ruído aerodinâmico do aerofólio será dominado pela interação entre turbulência e superfície do aerofólio, onde está turbulência é uma fonte de ruído muito ineficiente em baixos números de Mach.

Figura 5 – Mecanismos fonte de ruído aerodinâmico sobre um aerofólio.



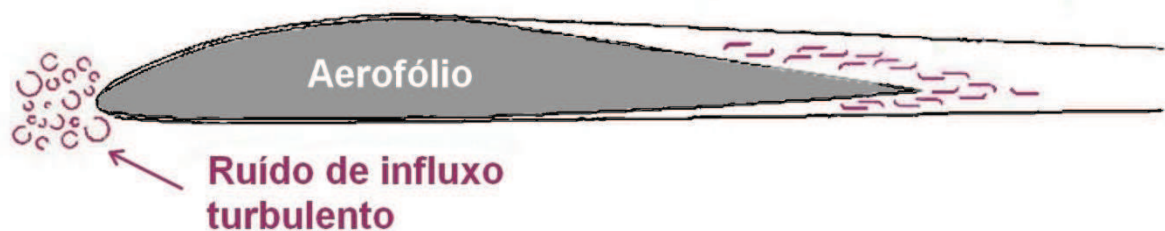
Fonte: Adaptado de Oerlemans (2009).

Segundo Rogers *et al.* (2006), o som de baixa frequência (*Low Frequency Sound*) é gerado quando as pás rotativas encontram anomalias no escoamento do ar devido a mudanças na velocidade do vento e escoamento em torno da torre ou por outras pás. O ruído de influxo turbulento (*Inflow Turbulence Sound*) é resultado da turbulência atmosférica em virtude de forças locais ou de flutuações de pressão local em torno das pás. O autoruído do aerofólio é gerado pelo escoamento de ar ao longo da superfície do perfil da pá, sendo de natureza de banda larga.

A Figura 6 mostra o ruído de influxo turbulento, onde o perfil aerodinâmico encontra vórtices turbulentos presentes em condições atmosféricas instáveis, que modifica o ângulo de ataque do aerofólio fazendo uma carga instável na pá. A frequência e a amplitude do ruído gerado dependem do tamanho dos vórtices. Se os vórtices são maiores que o

comprimento da corda do aerofólio, o ruído é de baixa frequência, e se os vórtices turbulentos forem menores que o comprimento da corda do aerofólio, o ruído será de alta frequência. A camada limite atmosférica é constituída por padrões de escoamento aleatório que mudam de forma constante, portanto, é muito difícil quantificar matematicamente o ruído de influxo turbulento (TAYLOR, 2011).

Figura 6 – Ruído de influxo turbulento.



Fonte: Adaptado de Taylor (2011).

Segundo Taylor (2011), o escoamento de ar atmosférico em torno da torre de uma turbina eólica sofre perturbações a montante e a jusante (o escoamento é desacelerado a montante da torre e há uma esteira a jusante devido a uma separação do escoamento em torno da torre). Quando as pás do rotor de um aerogerador encontram esse escoamento perturbado, há uma rápida mudança na carga da pá causando uma fonte de ruído de baixa frequência ouvido como um som batendo quando cada pá do rotor passa pela torre. Para turbinas eólicas de pequeno porte esta interação entre torre e pá tem uma menor relevância em relação às de grande porte, pelo fato da torre ter um diâmetro relativamente pequeno, assim perturbando menos o escoamento atmosférico.

3.5 Autoruído do Aerofólio

O autoruído do aerofólio ocorre entre a interação da pá e da turbulência gerada em sua própria camada limite. Para elevados números de Reynolds R_e (com base no comprimento do perfil), camadas limite turbulentas (*Turbulent Boundary Layers-TBL*) desenvolvem-se

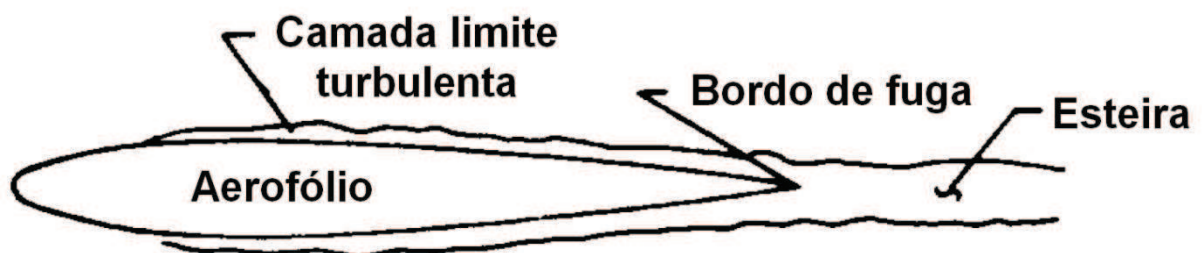
sobre a maior parte do aerofólio, o ruído produzido por esta turbulência passa sobre o bordo de fuga (*Trailing Edge-TE*). Para baixos números de Reynolds, camadas limites laminares largas (*Laminar Boundary Layer-LBL*) desenvolvem-se, cuja instabilidade resulta em desprendimento de vórtices (*Vortex Shedding-VS*) e associa o ruído a partir do TE (BROOKS *et al.*, 1989).

Para ângulos de ataque diferentes de zero, o escoamento pode separar próximo do bordo de fuga no lado da sucção do aerofólio produzindo ruído TE devido à vorticidade turbulenta desprendida. Em ângulos de ataque muito elevados, o escoamento separado próximo ao bordo de fuga dá lugar a uma separação em grande escala causando um ruído de baixa frequência irradiado para o aerofólio. Outra fonte de ruído são os vórtices desprendidos que ocorrem numa pequena separação do escoamento na região do bordo de fuga. A fonte de ruído restante é devido à formação do vórtice de ponta, que contém escoamento altamente turbulento, ocorrendo próximo as extremidades de elevação de pás e asas (BROOKS *et al.*, 1989).

3.5.1 Ruído do Bordo de Fuga de Camada Limite Turbulenta

Esta fonte de ruído é resultado da interação entre a turbulência da camada limite e do bordo de fuga do aerofólio, tal como representado na Figura 7. A camada limite turbulenta, surge para elevado número de Reynolds e/ou ângulos de ataque do perfil aerodinâmico moderado (MAIA, 2010).

Figura 7 - Ruído do bordo de fuga de camada limite turbulenta.

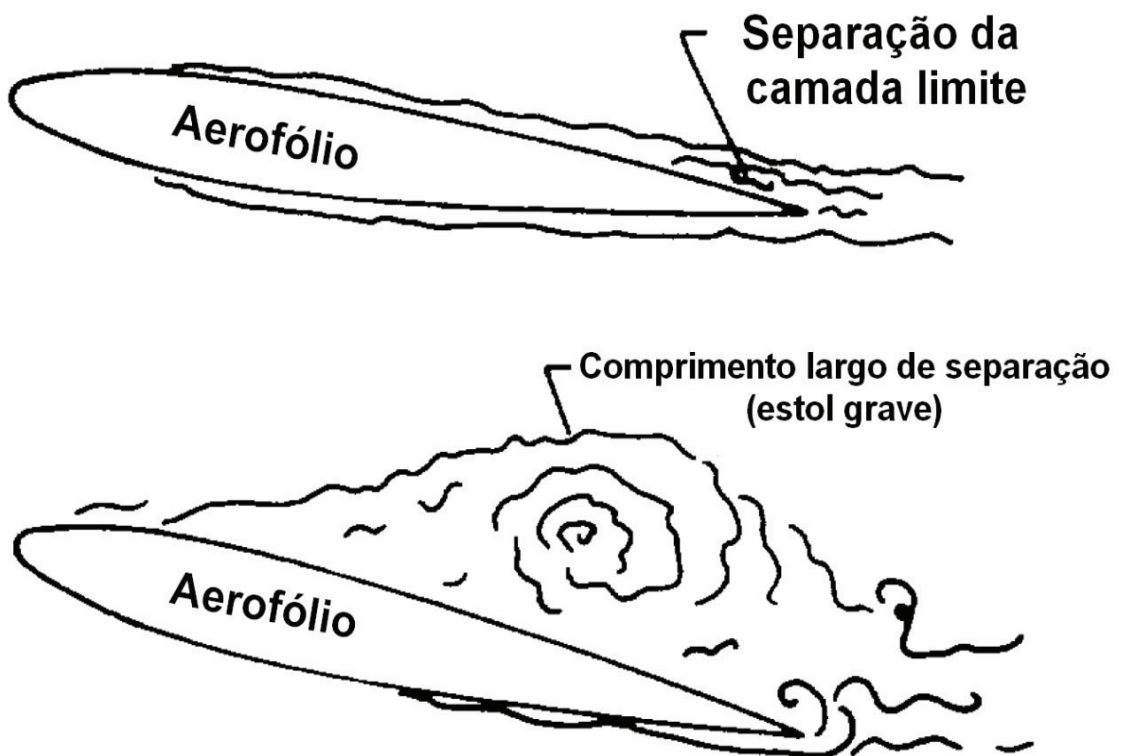


Fonte: Adaptado de Brooks *et al.* (1989).

3.4.2 Ruído de Separação-Estol

Como pode ser visto na Figura 8, o ruído por separação estol ocorre quando o ângulo de ataque aumenta de moderado para alto, sendo uma fonte de ruído de interesse significativo. À medida que o ângulo de ataque aumenta, a sucção lateral na camada limite aumenta e estruturas instáveis em larga escala começam a se formar, neste caso o ruído aumenta em mais de 10 dB em relação ao ruído TBL-TE. Este ruído é emitido a partir do bordo de fuga para escoamentos ligeiramente separados (JIUNA *et al.*, 2012.).

Figura 8 – Ruído de separação-estol.



Fonte: Adaptado de Brooks *et al.* (1989).

3.5.3 Ruído de Vórtices de Esteira da Camada Limite Laminar

Este tipo de autoruído ocorre quando uma camada limite laminar está presente sobre a maior parte ou um lado do aerofólio, tal como mostrado na Figura 9. De acordo com Maia (2010), é provável que exista em pelo menos um dos lados, uma camada limite laminar que se desenvolve mais para o bordo de fuga quando o número de Reynolds é baixo ($Re < 10^5$), produzindo ondas de instabilidade (ondas Tollmien–Schlichting) dentro do escoamento laminar. Ondas de pressão devido à formação de vórtices partindo do bordo de fuga propagam-se de baixo para cima, e instabilidades são ampliadas na camada limite.

Figura 9 – Ruído de vórtices de esteira da camada limite laminar.

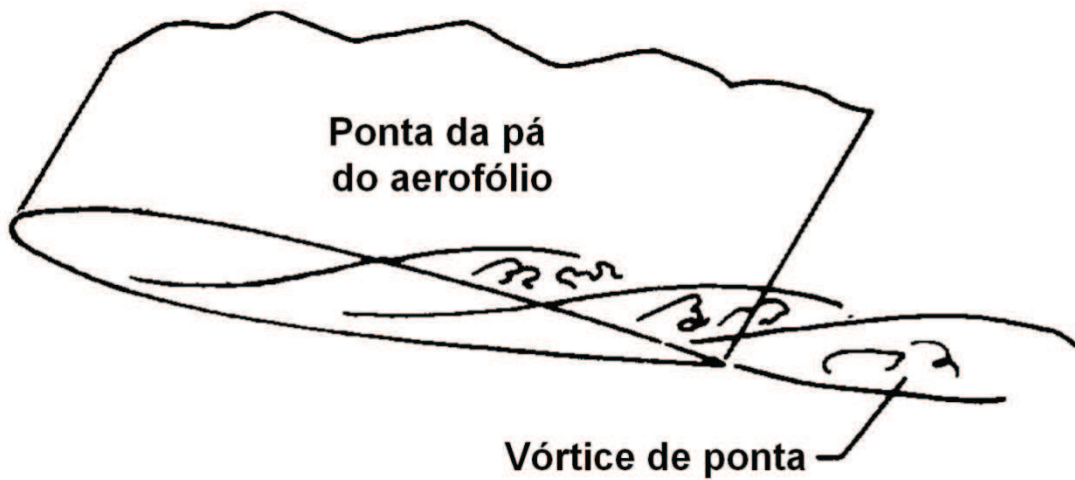


Fonte: Adaptado de Brooks *et al.* (1989).

3.5.4 Ruído de Vórtices Formados na Ponta da Pá

O escoamento assume uma característica tridimensional na região promovida pelo diferencial de pressão entre as superfícies do aerofólio, visto que não existe limitação de fronteira na ponta da pá. O escoamento é resultado da convecção da pressão lateral sobre o lado de sucção causando uma turbulência na ponta da pá. Esta turbulência é composta por um núcleo viscoso turbulento que reforça a emissão de ruído, Figura 10 (JIANU *et al.*, 2012).

Figura 10 – Ruído de vórtices formados na ponta da pá.

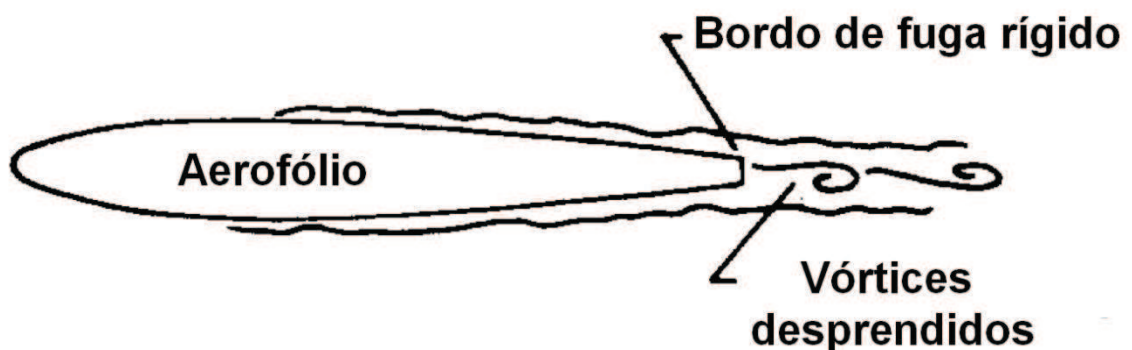


Fonte: Adaptado de Brooks *et al.* (1989).

3.5.5 Ruído de Vórtices de Esteira do Bordo de Fuga Rígido

De acordo com Jianu *et al.* (2012), a frequência e a amplitude desta fonte de ruído são determinadas pela geometria (da forma e espessura) do bordo de fuga. Se a espessura do bordo de fuga é maior do que a espessura da camada limite no bordo de fuga, esta fonte será dominante no ruído total. Por esta razão, as pás de aerogeradores devem ter arestas de saída suaves, para reduzir os níveis de ruído, Figura 11.

Figura 11 – Ruído de vórtices de esteira do bordo de fuga rígido.



Fonte: Adaptado de Brooks *et al.* (1989).

3.6 Analogia Acústica

De acordo com Souza (2012), tanto a geração de ruído aerodinâmico quanto a propagação de ondas acústicas obedecem às leis de conservação, desta forma, uma solução adequada das equações da continuidade, de quantidade de movimento e da energia é capaz de descrever de forma apropriada o campo acústico provocado por escoamentos não estacionários. Entretanto, mesmo com os avanços nos recursos computacionais disponíveis atualmente o cálculo direto das ondas sonoras através de métodos numéricos é uma tarefa inviável para situações práticas de engenharia.

O emprego de analogias acústicas é uma prática comum para calcular computacionalmente o som propagado para pontos distantes da fonte. Essa abordagem consiste em resolver a equação de propagação sonora usando como entrada o resultado de simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) transientes, desta forma apenas a região da fonte necessita de um elevado refinamento da malha. A analogia proposta por Ffowcs-Williams e Hawkings (FW-H) é uma das mais bem consolidadas em aeroacústica, e levam em conta o som gerado por fontes em movimento. Formulações baseadas na analogia de FW-H admitem o cálculo do som propagado por fontes em movimento e em repouso em relação ao observador no domínio do tempo ou da frequência.

O fenômeno da geração de som por um fluido em seus primórdios era estudado sem o uso de equações de escoamento. Então, em 1952, Lighthill apresentou um estudo, onde as equações de quantidade de movimento e de conservação de massa eram manipuladas algebricamente para que a equação resultante do processo fosse uma equação de onda com um termo fonte (o termo fonte representa todas as não-linearidades do escoamento, entre elas as fontes acústicas). Tal equação é conhecida com analogia acústica de Lighthill. O estudo de Lighthill é base para outras analogias, como a analogia de Ffowcs-Williams e Hawkings (FW-H), que propõem modificações que as tornam aplicáveis para diferentes tipos de problemas (SIMÕES, 2011).

Segundo Bonatto (2009), o procedimento de Lighthill gera uma fonte sonora sem qualquer aproximação feita nas equações, o que permite identificar vários mecanismos do escoamento como fonte de ruído.

3.6.1 Analogia de Lighthill

O ruído de jato é produzido devido às flutuações de velocidade e pressão do escoamento turbulento do jato, assim Lighthill foi motivado a escrever uma equação que representasse o ruído gerado por tal escoamento. Lighthill deduziu uma equação de onda com um termo fonte que tratava principalmente das fontes acústicas do ruído gerado por um escoamento turbulento, ao rearranjar as equações de Navier-Stokes e de conservação de massa.

A teoria de Lighthill trata apenas do escoamento gerado pelas flutuações turbulentas, desconsiderando quaisquer efeitos sonoros com paredes sólidas (como reflexão, difração, absorção e dispersão) e também assumindo que a região de escoamento turbulento é envolta por fluido em repouso. Apesar de esses fatos serem importantes no estudo de ruído gerado por aerofólios, a analogia apresenta conceitos básicos para o estudo de qualquer analogia acústica (SIMÕES, 2011).

De modo a obter a equação de Lighthill, parte-se da equação de conservação de massa, dada por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

onde $\rho(x_i, t)$ é a densidade do fluido e $u_i(x_i, t)$ é o vetor velocidade do fluido, além das equações de Navier-Stokes, dadas por

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

onde $p(x_i, t)$ é a pressão do fluido e τ_{ij} é o tensor de tensões viscosas. Ambas as equações estão escritas em notação de Einstein, ou seja, a Equação (2) representa um sistema de três equações, para $i = 1, 2, 3$.

Aplicando-se o operador $\partial/\partial x_i$ na Equação (2), tem-se

$$\frac{\partial^2 \rho u_i}{\partial x_i \partial t} + \frac{\partial^2 \rho u_i u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} - \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} = 0 \quad (3)$$

enquanto que a derivada temporal da Equação (1) resulta em

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \rho u_i}{\partial x_i \partial t} = 0 \quad (4)$$

Subtraindo a equação (3) da equação (4), obtêm-se

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij}) \quad (5)$$

Por último, adicionando-se o termo $\partial^2 p / \partial x_i^2 - c_0^2 \partial^2 \rho' / \partial x_i^2$, com $\rho' = \rho - \rho_0$ em ambos os lados da Equação (5), onde c_0 é uma constante que representa a velocidade do som no fluido, ρ' é a flutuação de densidade e ρ_0 é a densidade do meio em repouso, chega-se ao resultado obtido por Lighthill, tal qual

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij}) + \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} (p - c_0^2 \rho') \quad (6)$$

Apesar de todas as operações matemáticas realizadas até aqui, a equação (6) ainda não sofreu qualquer simplificação, ou seja, ainda representa exatamente o escoamento de um fluido, assim como descrito pelas equações de Navier-Stokes. O lado direito da equação está associado ao tensor de Lighthill (que representa o somatório das tensões em diferentes formas aplicadas a fronteira de um elemento fluido),

$$T_{ij} = \rho u_i u_j - \tau_{ij} + (p - c_0^2 \rho') \delta_{ij} \quad (7)$$

onde a parcela $\rho u_i u_j$ é chamada de tensão de Reynolds e representa a quantidade de movimento na direção i que atravessa a superfície do volume de controle normal à direção j . A dissipação de onda acústica através da condução de calor é levada em consideração pelo termo $(p - c_0^2 \rho') \delta_{ij}$ que é nulo para transformações adiabáticas e o termo δ_{ij} é o delta de Kronecker que assume o valor de 1 se $i = j$ e 0 se $i \neq j$.

A equação (6) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (8)$$

Com relação ao tensor de Lighthill, o termo viscoso pode ser desconsiderado como fonte sonora, devido à baixa viscosidade do ar e o termo $p - c_0^2 \rho' = 0$ para escoamentos com pequenas variações de temperatura. Assim o tensor de Lighthill fica

$$T_{ij} \approx \rho u_i u_j \quad (9)$$

A Equação (8) pode ser resolvida analiticamente utilizando funções de Green em espaço livre (se os termos do lado direito da equação de Lighthill são conhecidos e independentes dos termos do lado esquerdo),

$$\rho'(x_i, t) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}(y_i, t_{ret})}{r} dV(y_i) \quad (10)$$

onde ρ' é a flutuação de densidade no instante t para uma dada posição x_i do observador, y_i é a posição da fonte, $r = |x_i - y_i|$ é a distância entre eles e t_{ret} é o tempo atrasado dado por

$$t_{ret} = t - \frac{r}{c_0} \quad (11)$$

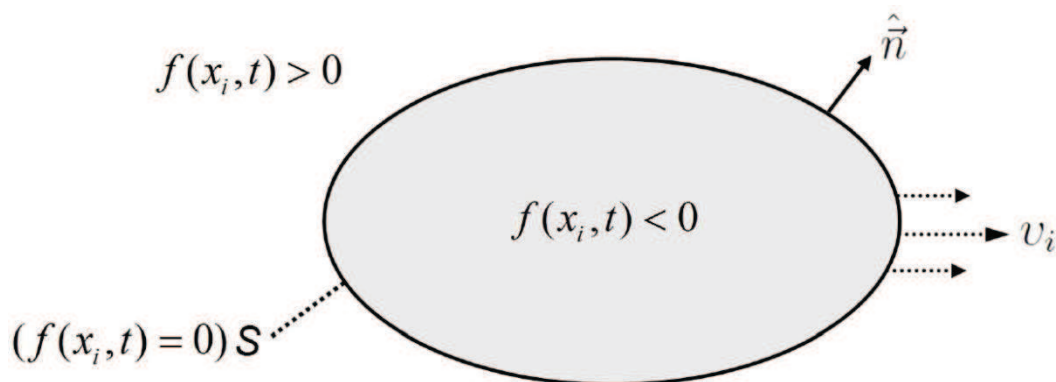
Este termo considera o tempo de propagação de uma onda acústica para que, com base no tempo t de chegada de uma onda no observador x_i , obtenha-se o tempo t_{ret} no qual essa onda foi emitida pela fonte em y_i .

3.6.2 Analogia de Ffowcs-Williams e Hawkings

A equação de FW-H trata de uma analogia acústica obtida a partir da analogia de Lighthill, levando em conta o ruído gerado ao redor de sólidos em movimento. De acordo com Bonatto (2009), o procedimento adotado por Ffowcs-Williams e Hawkings resume-se a reescrever as equações de Navier-Stokes utilizando a teoria de funções generalizadas, de modo que as equações sejam válidas em todo o espaço.

A equação FW-H é obtida considerando uma superfície de controle S qualquer fechada e indeformável, definida com $f(x_i, t) = 0$, com vetor normal orientado para o exterior da superfície representado por n_i , se movimentando com velocidade v_i através de um fluido, como pode ser visto na Figura 12. A função f é definida tal que $f < 0$ indica o interior da superfície e $f > 0$ a região externa da superfície (ORSELLI, 2012).

Figura 12 – Esquema representando a superfície de controle S .



Fonte: Orselli (2012).

Aplicando a função generalizada de Heaviside $H(f)$ nas equações de Navier-Stokes, de modo que $H(f) = 1$ fora da superfície S e $H(f) = 0$ dentro de S , faz com que as equações sejam válidas em todo o espaço. As equações são manipuladas de forma análoga as equações de Lighthill, obtendo um operador de propagação de onda de um lado da equação e termos fontes do outro (ORSELLI, 2012).

A equação de FW-H na sua forma diferencial obtida é dada por:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 v_j \delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [l_i \delta(f)] + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] \quad (12)$$

onde $p' = c_0^2(\rho - \rho_0)$ é a pressão acústica, ρ_0 e c_0 é a densidade e a velocidade do som no meio não perturbado, respectivamente, v_j é a velocidade local da superfície da pá, l_i é a força por unidade de área no fluido e T_{ij} é o tensor de tensões de Lighthill e $\delta(f)$ é o delta de Dirac. A quantidade $l_i = p_{ij} n_j$, onde $p_{ij} = p \delta_{ij} - \tau_{ij}$ é o tensor de tensão de compressão que inclui a pressão de superfície e tensão viscosa e n_j é o vetor unitário normal à superfície $f = 0$. O operador matemático ∇^2 denota o Laplaciano, dado por:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \quad (13)$$

No lado direito da Equação (12), existem três termos, cada um com significado físico definido. O último termo corresponde a fontes quadrupolo, calculado através de uma integral volumétrica em todo o volume fora da superfície de controle ($f > 0$). Este termo tem elevado custo computacional devido ao grande volume de dados necessário nesta operação, sendo descartado em diversos casos. O segundo termo é uma superfície de distribuição de dipolos com intensidade $p_{ij} n_j$, referentes às fontes formadas pelas forças aplicadas na superfície, conhecido como *loading noise*. O primeiro termo representa fontes sonoras relacionadas ao deslocamento de fluido através da superfície, ou seja, fontes do tipo monopolo, conhecido como *thickness noise* (SIMÕES, 2011).

De acordo com Maciel (2013), com a Equação (12) tem-se o modelo matemático para representar o ruído aerodinâmico que possui duas origens distintas, o movimento de superfícies sólidas (como turbinas e rotores) e a presença de superfícies sólidas em condições de escoamento turbulento.

Segundo Tadamas e Zangeneh (2011), a principal vantagem da equação FW-H é a sua capacidade de separar cada termo fonte e determinar que tipo de ruído é dominante. As diferentes características dessas fontes podem determinar a frequência e as características direcionais do campo acústico gerado, o que pode ajudar na redução de ruído de pás de turbinas eólicas.

A Equação (12) é similar a equação de Lighthill com exceção dos termos fontes adicionais que levam em conta os efeitos de superfície. A solução é obtida aplicando o produto de convolução, utilizando funções de Green no espaço livre $\delta(g)/4\pi$ onde

$$g = \tau - t + \frac{r}{c_0} \quad (14)$$

com $r = |x_i - y_j|$, τ é o tempo quando a fonte de ruído é emitida, t é o tempo em que o ruído alcança o observador e os vetores x_i e y_j são as posições da fonte e do observador respectivamente. Apenas os termos fonte de superfície são considerados e a forma integral da equação FW-H é obtida como

$$4\pi p'(x_i, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{\rho_0 v_j \delta(f) \delta(g)}{r} dy_i d\tau - \frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{l_i \delta(f) \delta(g)}{r} dy_i d\tau \quad (15)$$

A Equação (15) pode ser simplificada de diversas formas, dependendo do problema que se pretende resolver. Na formulação 1A de Farassat (1982), resolve-se a pressão acústica na forma,

$$p'(x_i, t) = P_T'(x_i, t) + P_L'(x_i, t) \quad (16)$$

onde

$$4\pi P_T'(x_i, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{v}_j}{r(1 - M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 v_j (r \dot{M}_i r_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 (1 - M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (17)$$

$$4\pi P_L'(x_i, t) = \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{l}_i r_i}{r(1 - M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{l_r - l_i M_i}{r^2 (1 - M_r)^2} \right]_{ret} dS + \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{l_r (r \dot{M}_i r_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 (1 - M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (18)$$

onde P_T é o *thickness noise*, P_L é o *loading noise* e M_r é o número relativo de Mach na direção da radiação. Os pontos em \dot{M}_i , \dot{l}_i e \dot{v}_j indica a taxa de variação em relação ao tempo de origem.

Esta é a solução mais comum para a equação FW-H que fornece a evolução temporal da pressão acústica. Esta formulação é limitada aos casos subsônicos, devido à existência do fator Doppler, $1/(1 - M_r)$, portanto, é aplicável para uma turbina eólica que funciona, de um modo geral, a um baixo número de Mach, inferior a 0,3 (TADAMASA & ZANGENEH, 2011).

4 METODOLOGIA

4.1 Comparação dos algoritmos ITA e NITA

No esquema ITA (*Iterative Time Advancement*), todas as equações são resolvidas iterativamente, até que os critérios de convergência sejam atendidos. Assim, o avanço das soluções por um passo de tempo normalmente requer uma série de iterações globais, de acordo com a Figura 13a. O esquema iterativo elimina o erro de divisão (ANSYS Fluent *Theory Guide* 15.0, 2013).

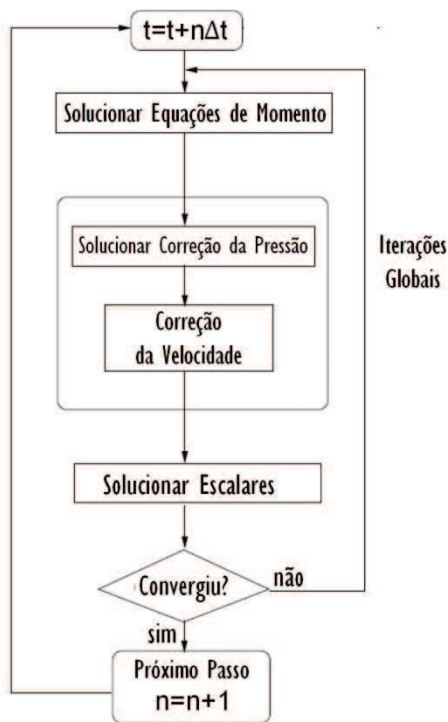
O esquema de tempo de avanço iterativo (ITA) requer uma quantidade considerável de esforço computacional, devido um grande número de iterações globais realizadas para cada passo de tempo. A ideia fundamental do esquema NITA (*Non-Iterative Time Advancement*) é que, para preservar a precisão do tempo geral, não é necessário reduzir o erro de divisão para zero, mas apenas é preciso fazer a mesma ordem que o erro de truncamento. O esquema de tempo de avanço não-iterativo (Figura 13b), não necessita das iterações globais, realizando apenas uma única iteração global por passo de tempo, o que acelera significativamente as simulações transientes. No entanto, o esquema NITA ainda permite uma iteração local para resolver o conjunto individual de equações (ANSYS Fluent *Theory Guide* 15.0, 2013).

De acordo com Orselli (2012), de modo geral, o método NITA apresenta um custo computacional bem menor, se comparado ao método ITA, na resolução do mesmo problema. Desta forma, o esquema NITA é utilizado no cálculo das simulações em regime transiente utilizando a metodologia LES.

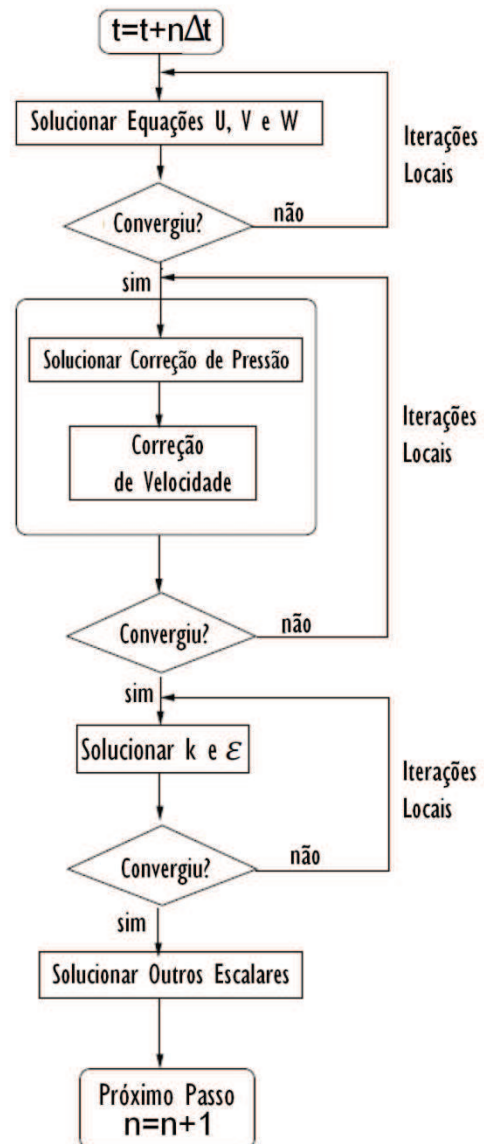
Com o objetivo de comparar os algoritmos ITA e NITA, foram realizadas simulações bidimensionais em um perfil NACA0012 com 1 metro de corda. A velocidade do vento v incidindo no perfil é de 71,3 m/s com ângulo de ataque $\alpha = 0^\circ$. Foram comparados os resultados obtidos pelos dois esquemas, com receptores a 80 metros de distância posicionados na direção da corda (0°) e perpendicular ao escoamento (90°), para um comprimento de correlação de 1 metro.

Figura 13 – Diagrama representando os algoritmos dos esquemas ITA e NITA.

a) ITA



b) NITA



Fonte: Adaptado de ANSYS Fluent *Theory Guide* 15 (2013).

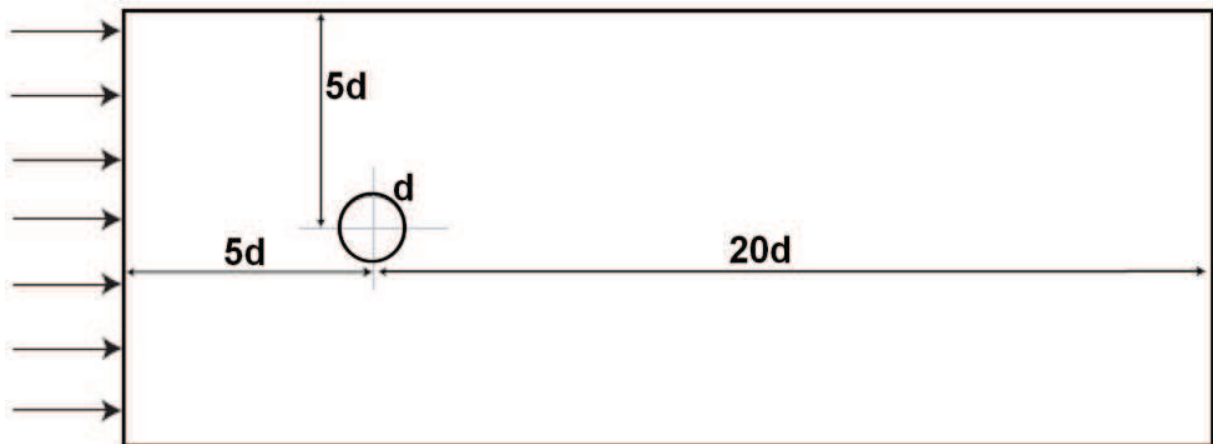
4.2 Validação

Para validação, foi utilizado um caso amplamente estudado, o de um cilindro de 19 milímetros (mm) de diâmetro (D) dentro de um escoamento de 69,2 m/s, com um número de Reynolds de aproximadamente 90.000 e de Mach de 0,2. A geometria utilizada no problema está ilustrada na Figura 14. As simulações são bidimensionais. O número de Reynolds é dado por:

$$R_e = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (19)$$

onde, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ é a densidade, $v = 69,2 \text{ m/s}^2$ é a velocidade, $l = 0,019 \text{ m}$ longitude característica e $\mu = 1,794 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ viscosidade dinâmica do fluido.

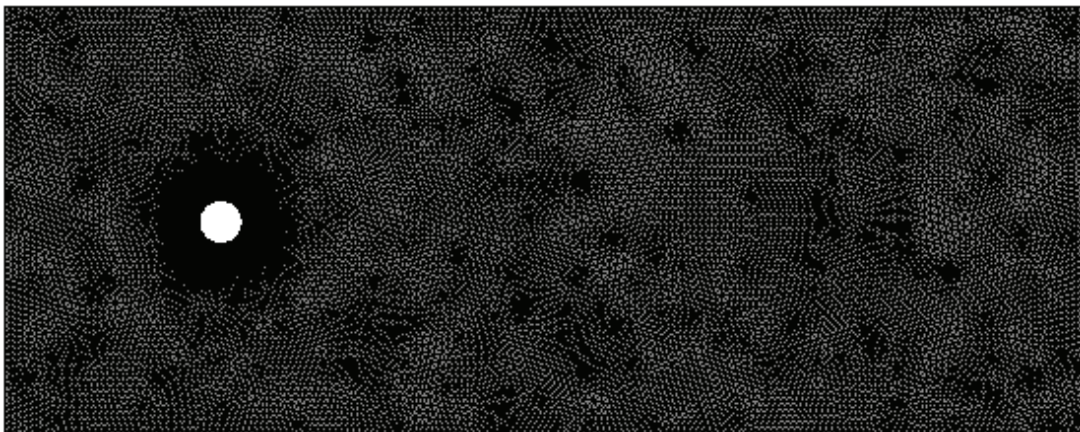
Figura 14 – Geometria do problema para o caso do cilindro.



Fonte: Adaptado de Braz (2008).

A malha gerada para o problema do cilindro possui 38.664 elementos triangulares e 19.689 nós, com um refinamento elevado próximo a fonte acústica (cilindro), de acordo com a Figura 15.

Figura 15 – Malha gerada para o escoamento do ar em torno do cilindro.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais obtidos por Revell *et al.* (1977), e com os simulados por Braz (2008) e Orselli (2012) de OASPL (*Overall Sound Pressure Level*), com receptores a 35D e 128D de distância perpendicular ao escoamento (90°), para um comprimento de correlação de 5D. O nível geral de pressão sonora (OASPL) é definido como a soma (em termos de energia ou intensidade sonora) de todas as contribuições do nível de pressão sonora de cada frequência (SPL) ao longo de todo o espectro (ORSELLI, 2012). O valor de OASPL pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$OASPL = 20 \log \sqrt{\sum_i (10^{SPL_i/20})^2} \quad (20)$$

4.3 Elementos de pá

De acordo com MANWELL *et al.* (2009), geralmente divide-se a pá entre 10 e 20 elementos. Portanto, com o objetivo de diminuir o custo computacional nas simulações bidimensionais, a pá foi dividida em 10 elementos de pá.

Os 10 elementos de pá foram calculados pelas equações de corda e torção de Schmitz para um perfil NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) S830, dadas por (GUNDTOFT, 2009):

$$c(r) = \frac{1}{B} \frac{16\pi r}{C_L} \text{sen}^2 \left(\frac{1}{3} \tan^{-1} \left(\frac{R}{Xr} \right) \right) \quad (21)$$

$$\beta(r) = \varphi - \alpha = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{R}{rX} - \alpha \quad (22)$$

onde $R = 25 \text{ m}$ é o raio do rotor, $X = 7$ é a velocidade de ponta da pá, $B = 3$ é o número de pás, $C_L = 1,2878$ é o coeficiente de sustentação, $\alpha = 6,25^\circ$ é o ângulo de ataque e r é a distância do elemento de pá para o eixo de rotação. Os valores obtidos pelas equações de Schmitz foram calculados no EXCELL e estão na tabela 4:

Tabela 4 – Elementos de pá.

Elemento de pá	r (m)	Corda c (m)	Torção β (°)	Ângulo de fluxo φ (°)
1	3,75	3,07	22,82	29,07
2	6,11	2,45	13,95	20,20
3	8,47	1,94	8,99	15,24
4	10,83	1,58	5,91	12,16
5	13,19	1,33	3,85	10,10
6	15,56	1,14	2,37	8,62
7	17,92	1,00	1,27	7,62
8	20,28	0,89	0,41	6,66
9	22,64	0,80	-0,27	5,98
10	25,00	0,73	-0,83	5,42

Fonte: Autor.

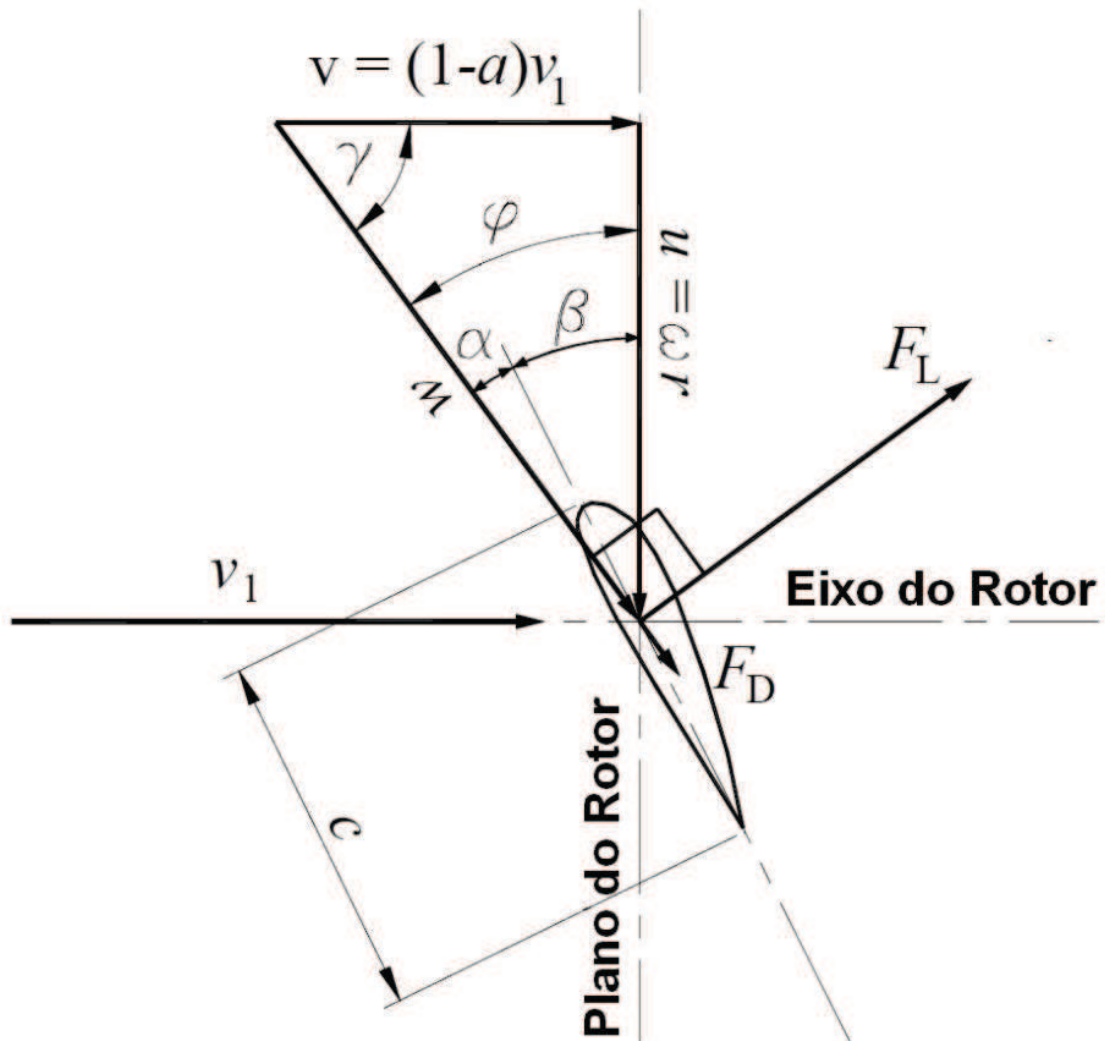
4.4 Simulações Bidimensionais

As simulações em duas dimensões foram realizadas com o objetivo de obter a diretividade do ruído e o nível de pressão sonora, nas diferentes secções da pá. O fluxo em cada um dos elementos de pá foi cálculo com a equação da velocidade relativa do vento, dada por:

$$w = \sqrt{[v_1(1 - a)]^2 - [\omega r(1 + a')]^2} \quad (23)$$

onde $v_1 = 10 \text{ m/s}$ é a velocidade do vento, $a = 1/3$ é o fator de indução axial, $\omega = 23 \text{ rpm} = 2,41 \text{ rad/s}$ (rotações por minuto) é a velocidade angular, $a' = 0$ (rotor ideal de Betz) é o fator de indução tangencial. A direção do fluxo é dada pelo ângulo de fluxo φ (Figura 16).

Figura 16 – Velocidades e ângulos.



Fonte: Adaptado de Gundtoft (2009).

Na Figura 16, F_L é a força de sustentação e F_D é a força de arrasto. Os valores obtidos pela Equação 23 encontram-se na Tabela 5.

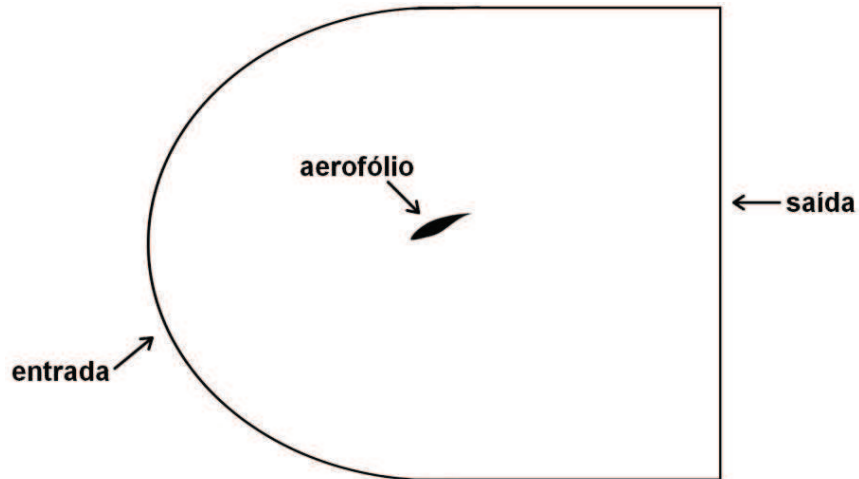
Tabela 5 – Velocidade relativa para os elementos de pá.

Elemento de pá	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Velocidade Relativa do vento w (m/s)	11,23	16,17	21,48	26,95	32,49	38,08	43,69	49,32	54,97	60,62

Fonte: Autor.

O Design Modeler do *software* comercial ANSYS® foi utilizado na criação de uma superfície de malha para simular o escoamento em torno de um perfil aerodinâmico, de acordo com a Figura 17.

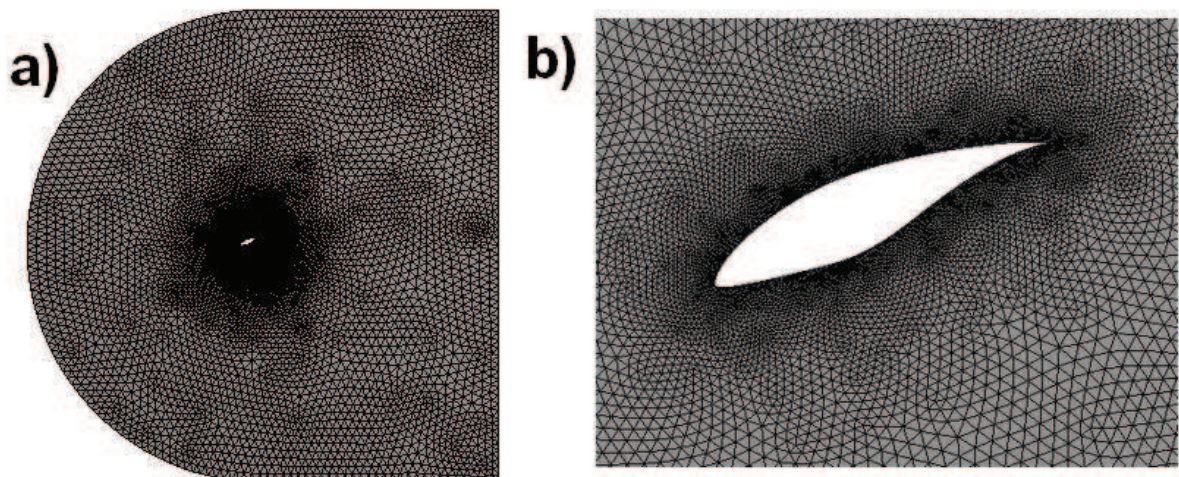
Figura 17 – Malha em C usada nas simulações bidimensionais.



Fonte: Autor.

A malha gerada para o escoamento do ar em torno do perfil NREL S830 para todas as secções da pá possuem mais de 28.000 elementos triangulares, com um refinamento elevado próximo a fonte acústica (aerofólio), como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Malha em C (a) malha próximo ao perfil NREL S830 (b).

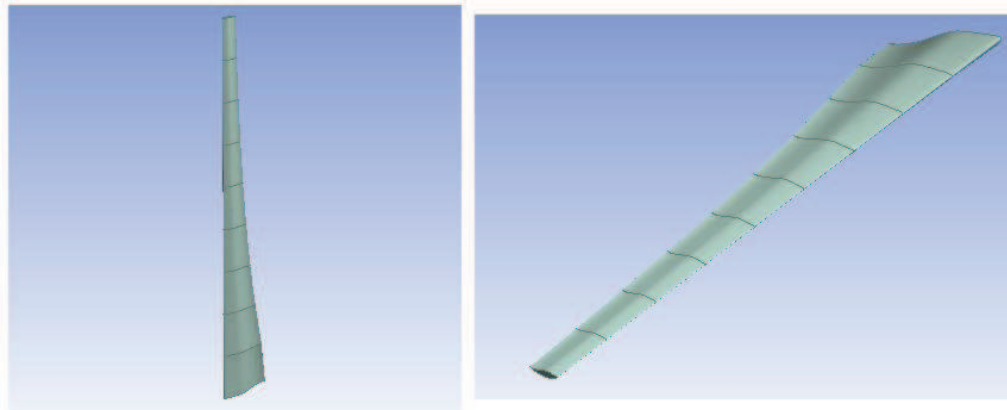


Fonte: Autor.

4.5 Simulações Tridimensionais

A pá utilizada para as simulações em três dimensões foi desenhada com o Design Modeler do ANSYS com os parâmetros apresentados na Tabela 4, ilustrado na Figura 19. O diâmetro do rotor é de 50 m e a pá possui 21,25 metros de comprimento, sem correção de ponta e nem de raiz.

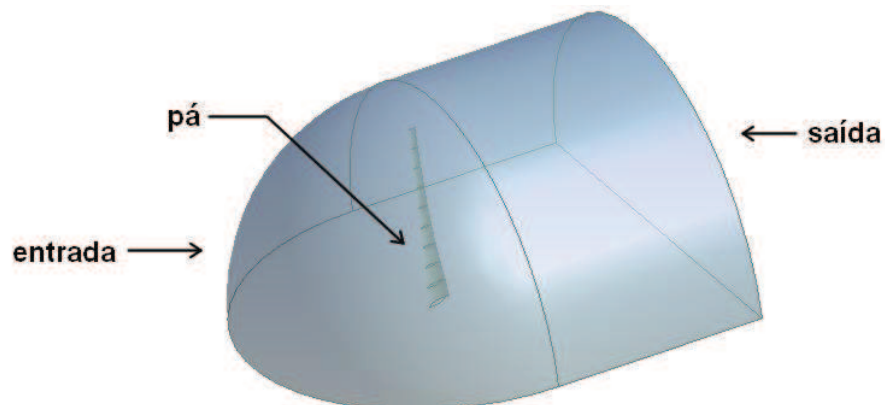
Figura 19 – Pá utilizada nas simulações em três dimensões.



Fonte: Autor.

O Design Modeler também foi usado para gerar o volume de fluido utilizado para simular o escoamento em torno da pá NREL S830, como ilustrado na Figura 20.

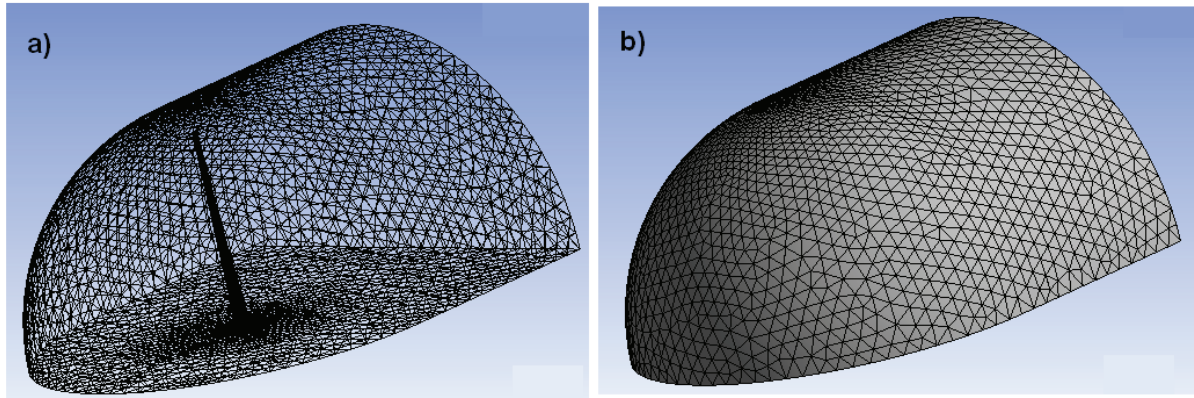
Figura 20 – Volume de Fluido.



Fonte: Autor.

A malha gerada para o escoamento do ar em torno da pá possui 1.273.509 elementos tetraédricos e 227.992 nós, com maior refinamento próximo da pá (Figura 21).

Figura 21 – Malha na superfície da pá (a) e malha no volume de fluido (b).



Fonte: Autor.

Os parâmetros de escoamento em torno do perfil aerodinâmico (bidimensional) e da pá (tridimensional) necessário para o modelo acústico e as equações da analogia acústica de FW-H, foram calculados com o CFD comercial ANSYS Fluent.

As equações governantes do escoamento foram solucionadas numericamente, empregando-se o método numérico denominado *Solver pressure-based*, baseado em volumes finitos. O campo de velocidade é obtido da equação de momentum, enquanto o campo de pressão é obtido da equação de correção de pressão, por meio da manipulação das equações de continuidade e momentum (ANSYS Fluent *Theory Guide* 15, 2013). O ANSYS Fluent resolverá as equações integrais governantes para a conservação de massa e momentum, e (quando apropriado) para energia e outros escalares, como turbulência e espécies químicas. Foi utilizada uma técnica baseada em volume de controle que consiste em:

- Divisão do domínio em volumes de controle discretos utilizando uma malha computacional;
- Integração das equações governantes nos volumes de controle individuais, com o objetivo de construir as equações algébricas das variáveis desconhecidas (velocidade e pressão);
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema linear de equações de modo a produzir a atualização das variáveis dependentes.

Foi utilizado o modelo de turbulência simulação de grandes escalas (*Large Eddy Simulation* - LES), portanto o ruído aeroacústico de banda larga pode ser previsto usando simulações LES (pois as simulações de grandes escalas resolvem os redemoinhos maiores do que a escala da grade).

Para um determinado passo de tempo Δt , a maior frequência que a análise acústica pode produzir é $f = 1/(2\Delta t)$. Portanto, o tamanho do passo de tempo adotado para a simulação foi de 5×10^{-6} , assim a frequência máxima obtida é de 100 kHz.

Os efeitos convectivos para o cálculo do som aerodinâmico causado pelo fluxo externo em torno de um corpo foram considerados, desta forma o cálculo do tempo retardado torna-se mais complexo, conforme ilustrado na Figura 22. O tempo retardado com o efeito convectivo é dado por:

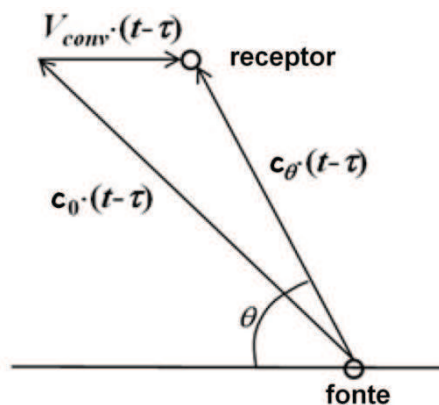
$$\tau = t - \frac{r}{c_\theta} \quad (24)$$

com

$$c_\theta = \sqrt{c_0^2 - V_{conv}^2 \sin^2 \theta} - V_{conv} \cos \theta \quad (25)$$

onde, V_{conv} é a velocidade convectiva e θ é a direção da velocidade convectiva. Uma limitação dos efeitos convectivos é que a convecção do campo distante deve ser subsônica ($V_{conv} < c_0$).

Figura 22 – Esquema do efeito convectivo no cálculo do tempo retardado.

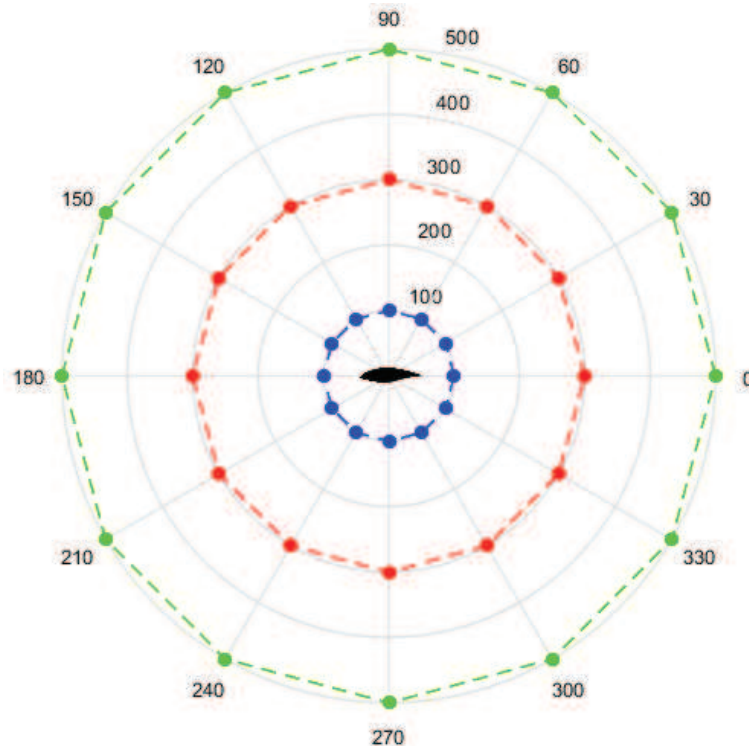


Fonte: Adaptado de ANSYS Fluent *Theory Guide* 15 (2013).

Os receptores foram distribuídos nas distâncias de 100, 200 e 300 metros da fonte em 12 direções distintas (Figura 23), no mesmo plano do elemento de pá no 2D.

No 3D o receptor está localizado em um local de referência especificado pelo padrão internacional, na altura do eixo do rotor a 80 m (diâmetro do rotor/2 + altura da torre) nas mesmas direções do 2D (TADAMASA & ZANGENEH, 2011).

Figura 23 – Posição e distância dos receptores.



Fonte: Autor.

O nível de pressão sonora (L_{sp}) em decibéis (dB) é calculado por:

$$L_{sp} = 10 \left(\frac{P}{p_{ref}} \right)^2 \quad (26)$$

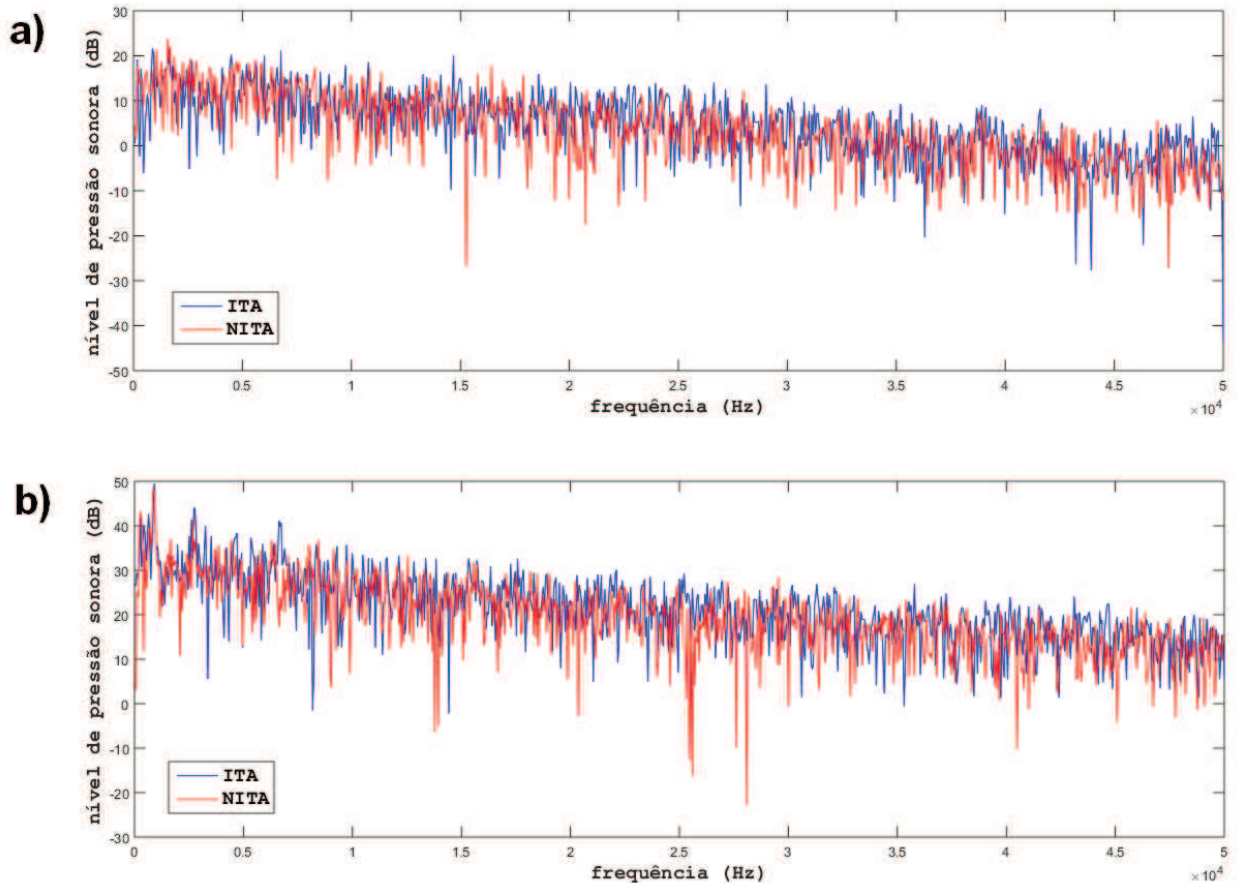
onde, P é a densidade espectral de potência e $p_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ é a pressão acústica de referência.

5 RESULTADOS

5.1 Comparação dos algoritmos NITA e ITA

O gráfico 2 compara os métodos ITA e NITA para um espectro de frequência de 0 a 50 kHz. O gráfico 2a, apresenta o nível de pressão sonora (SPL) para o receptor posicionado a 80 m na direção da corda (0°), o nível de pressão sonora total (OASPL) obtido pelos algoritmos ITA e NITA foram de 56,45 e 56,01 dB, respectivamente. O gráfico 2b, apresenta o nível de pressão sonora (SPL) para o receptor posicionado a 80 m perpendicular ao escoamento (90°), o nível de pressão sonora total (OASPL) obtido pelos algoritmos ITA e NITA foram de 75,67 e 74,56 dB, respectivamente.

Gráfico 2 – Comparação dos algoritmos ITA e NITA.



Fonte: Autor.

O esquema com tempo de avanço não iterativo (NITA) obteve um custo computacional (tempo de simulação) 34,62% menor em comparação com o método de tempo de avanço iterativo (ITA). Portanto, o algoritmo NITA apresentou resultados satisfatórios em comparação com o algoritmo ITA, com baixo custo computacional.

5.2 Validação

A tabela 6 compara os resultados obtidos, para o problema do cilindro ($R_e = 90.000$), com os resultados experimentais de OASPL obtidos por Revell *et al.* (1977), e com os resultados simulados por Orselli (2012) e Braz (2008), para um comprimento de correlação de 5D. As malhas de Orselli e Braz possuem elementos quadriláteros. Os resultados obtidos mostraram bom acordo com os resultados experimentais e com os simulados por Orselli e Braz.

Tabela 6 – Comparação dos resultados obtidos de OASPL, com resultados experimentais e simulados para o problema do cilindro.

Distância dos receptores	35D	128D
Orselli (2012), $k - \omega SST$ 69.669 elementos quadriláteros	112,2 dB	100,9 dB
Braz (2008), LES 34.894 elementos quadriláteros	116,0 dB	105,0 dB
Braz (2008), $k - \omega SST$ 34.894 elementos quadriláteros	95,0 dB	84,0 dB
Braz (2008), LES 68.284 elementos quadriláteros	114,8 dB	103,6 dB
Resultados obtidos, LES 38.664 elementos triangulares	116,52 dB	105,25 dB
Revell <i>et al.</i> (1977) Experimental	117 dB	100 dB

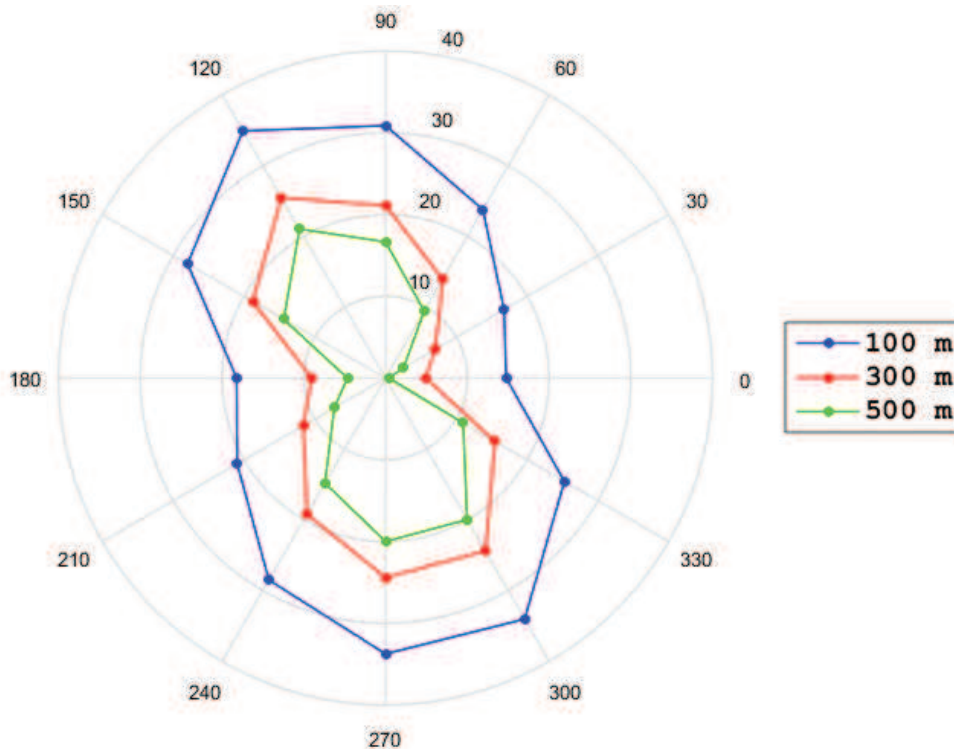
Fonte: Autor.

5.3 Simulações bidimensionais

A seguir, são apresentados os resultados da diretividade do ruído para os 10 elementos de pá (Tabela 4) do nível de pressão sonora total (OASPL), com receptores posicionados em 12 direções ao redor do perfil NREL S830 com uma distância de 100, 200 e 300 metros da fonte, posicionados no plano das respectivas secções da pá (Figura 23).

Wasala *et al.* (2015), realizaram simulações com um perfil NACA0012 em três dimensões com o vento incidindo com diferentes ângulos de ataque. Os resultados obtidos pela diretividade do ruído do nível de pressão sonora total (OASPL) mostraram que os receptores localizados perpendiculares à corda do perfil, possuem o nível de ruído mais elevado em relação a todos os outros receptores, aproximadamente 12-18 dB mais altos do que o ruído no plano da corda. Além disso, na direção do bordo de ataque (*leading edge*), o nível de pressão sonora total (OASPL) é 5-6 dB maior em comparação com a direção do bordo de fuga (*trailing edge*).

Gráfico 3 – Diretividade do ruído no elemento de pá 1.

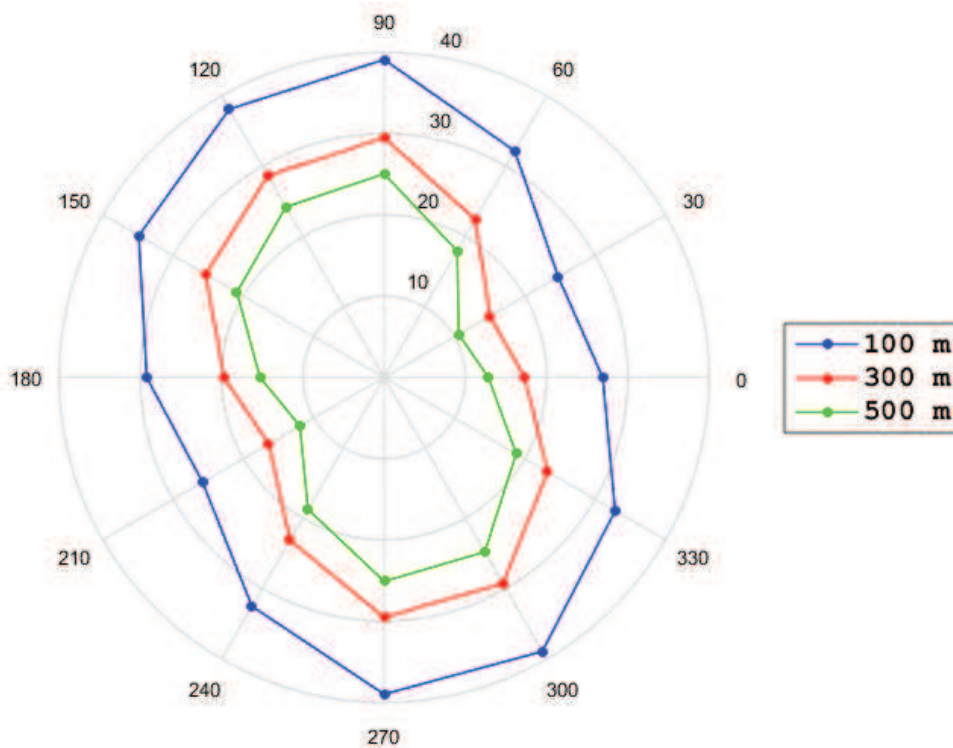


Fonte: Autor.

O Gráfico 3, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 1, com corda $c = 3,07 \text{ m}$, torção $\beta = 22,82^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 11,23 \text{ m/s}$. Os resultados apresentados, mostram que o ruído foi mais elevado nos receptores localizados na direção de 120° e 300° em comparação com os outros receptores. O ruído mais elevado nessas direções deve-se a torção da pá.

O Gráfico 4, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 2, com corda $c = 2,45 \text{ m}$, torção $\beta = 13,95^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 16,17 \text{ m/s}$. O ruído foi mais elevado nos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor, porém, o ruído dos receptores nas direções de 120° e 300° obtiveram os valores de OASPL muito próximo aos desses receptores, respectivamente, em comparação com os outros receptores, devido a torção da pá.

Gráfico 4 – Diretividade do ruído no elemento de pá 2.



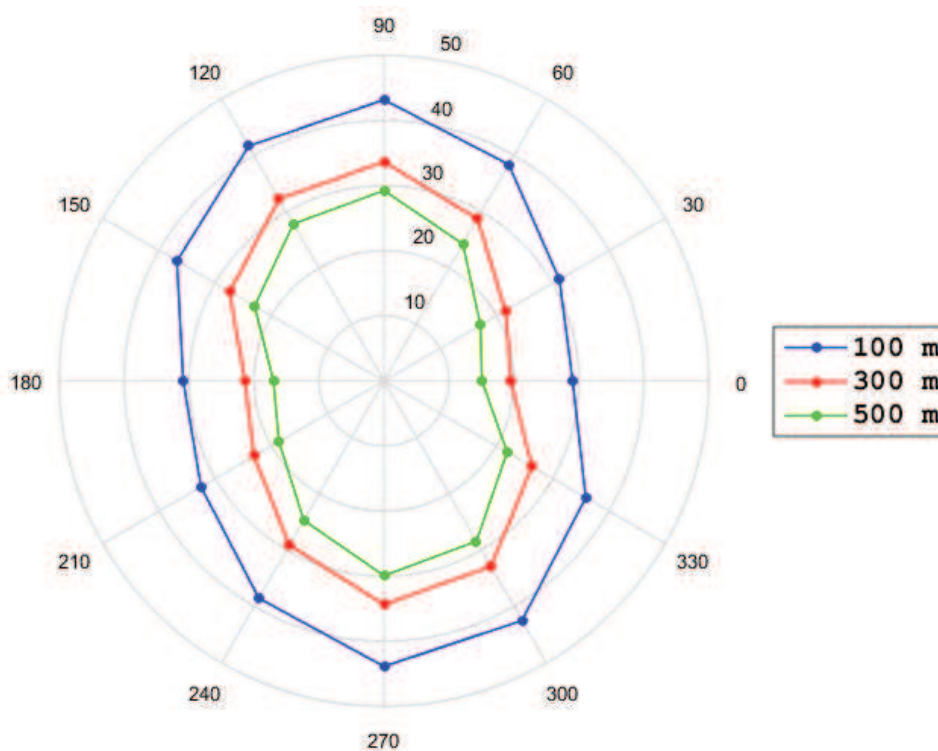
Fonte: Autor.

O Gráfico 5, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 3, com corda $c = 1,94 \text{ m}$, torção $\beta = 8,99^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 21,48 \text{ m/s}$. O ruído foi mais elevado nos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor. O ruído dos receptores nas direções de 120° e 300° obtiveram os valores de OASPL mais próximos aos desses receptores, respectivamente, em comparação com os outros receptores, porém menos do que no elemento de pá 2, pois a torção da pá é menor neste elemento de pá.

O Gráfico 6, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 4, com corda $c = 1,58 \text{ m}$, torção $\beta = 5,91^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 26,95 \text{ m/s}$. O ruído foi mais elevado nos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor. O ruído dos receptores nas direções de 120° e 300° obtiveram os valores de OASPL mais próximos aos desses receptores, respectivamente, em comparação com os outros receptores.

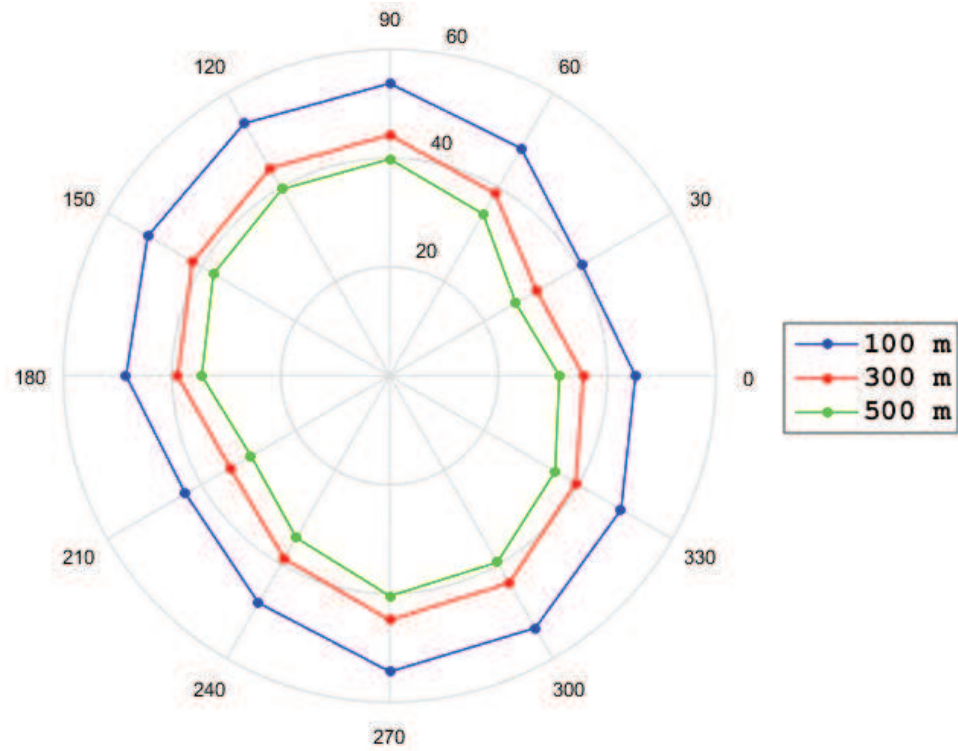
O Gráfico 7, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 5, com corda $c = 1,33 \text{ m}$, torção $\beta = 3,85^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 32,49 \text{ m/s}$. O ruído foi mais elevado nos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor. O ruído dos receptores nas direções de 120° e 300° obtiveram os valores de OASPL mais próximos aos desses receptores, respectivamente, com uma pequena influência da torção da pá.

Gráfico 5 – Diretividade do ruído no elemento de pá 3.



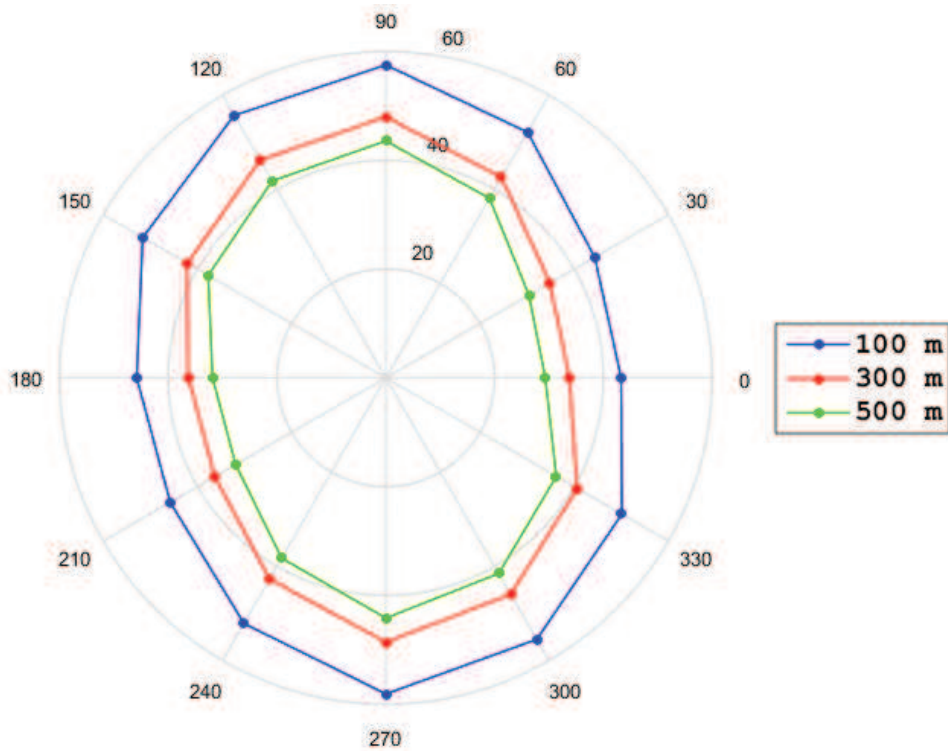
Fonte: Autor.

Gráfico 6 – Diretividade do ruído no elemento de pá 4.



Fonte: Autor.

Gráfico 7 – Diretividade do ruído no elemento de pá 5.



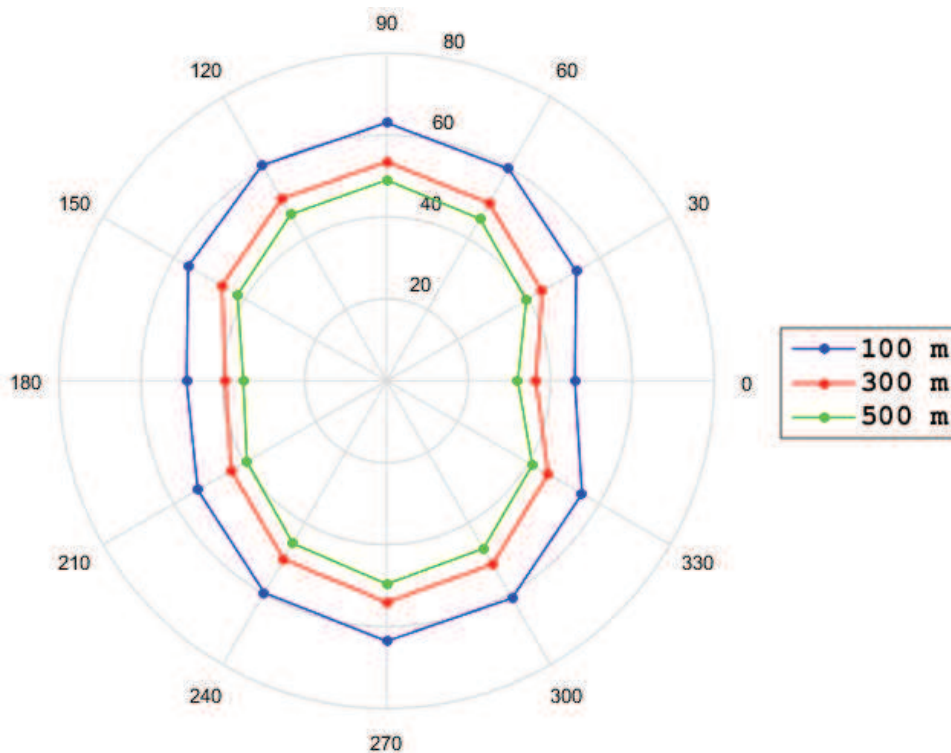
Fonte: Autor.

O Gráfico 8, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 6, com corda $c = 1,14 m$, torção $\beta = 2,37^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 38,08 m/s$. O ruído foi mais elevado nos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor, com a torção da pá quase em zero os valores de OASPL dos receptores nas direções de 120° e 60° foram bem próximos, assim como os dos receptores nas direções de 300° e 240° , com valores um pouco mais elevados em 120° e 300° .

O Gráfico 9, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 7, com corda $c = 1,0 m$, torção $\beta = 1,27^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 43,69 m/s$. Os resultados para este elemento de pá são análogos aos do anterior, com influência ainda menor da torção da pá.

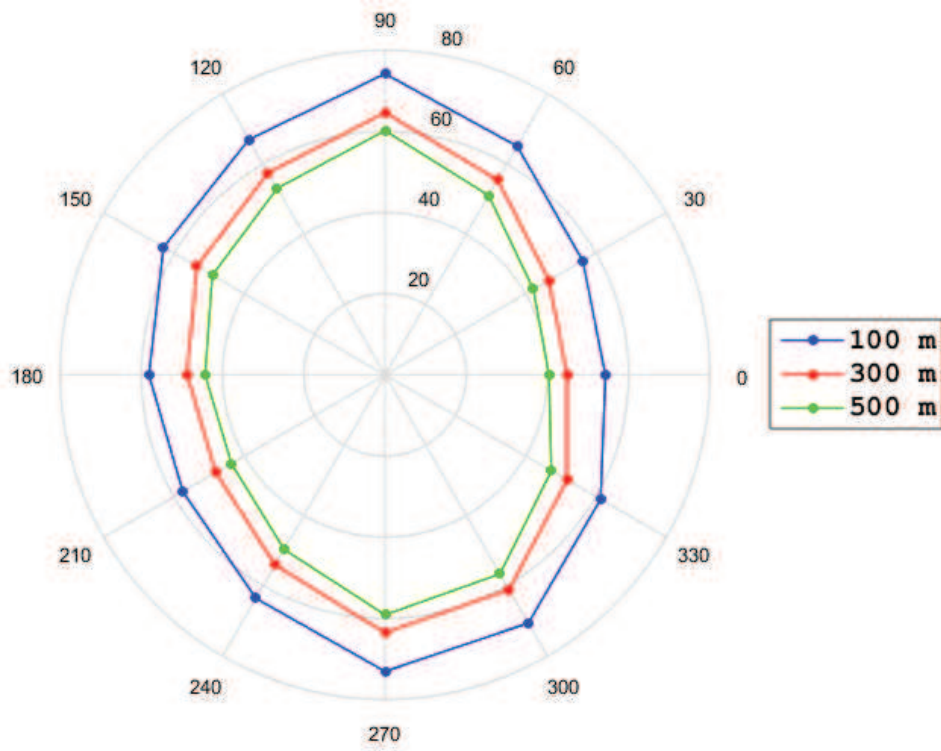
O Gráfico 10, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 8, com corda $c = 0,89 m$, torção $\beta = 0,41^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 49,32 m/s$. Com a torção da pá quase igual a zero, vê-se que o ruído na direção do bordo de ataque é maior do que no bordo de fuga em torno de 3 dB (decibéis).

Gráfico 8 – Diretividade do ruído no elemento de pá 6.



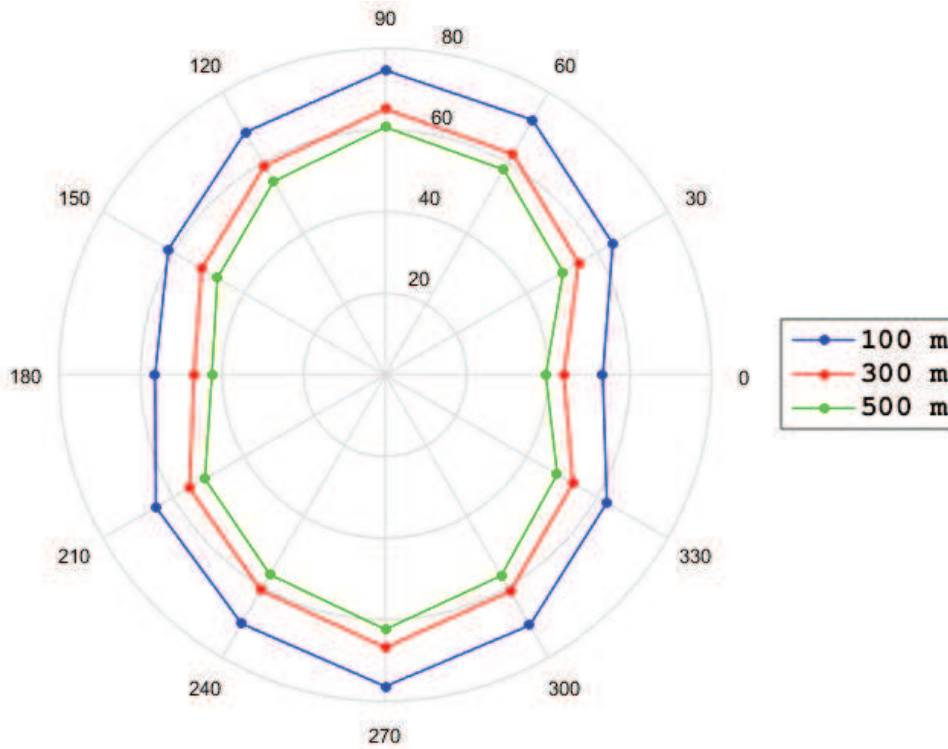
Fonte: Autor.

Gráfico 9 – Diretividade do ruído no elemento de pá 7.



Fonte: Autor.

Gráfico 10 – Diretividade do ruído no elemento de pá 8.



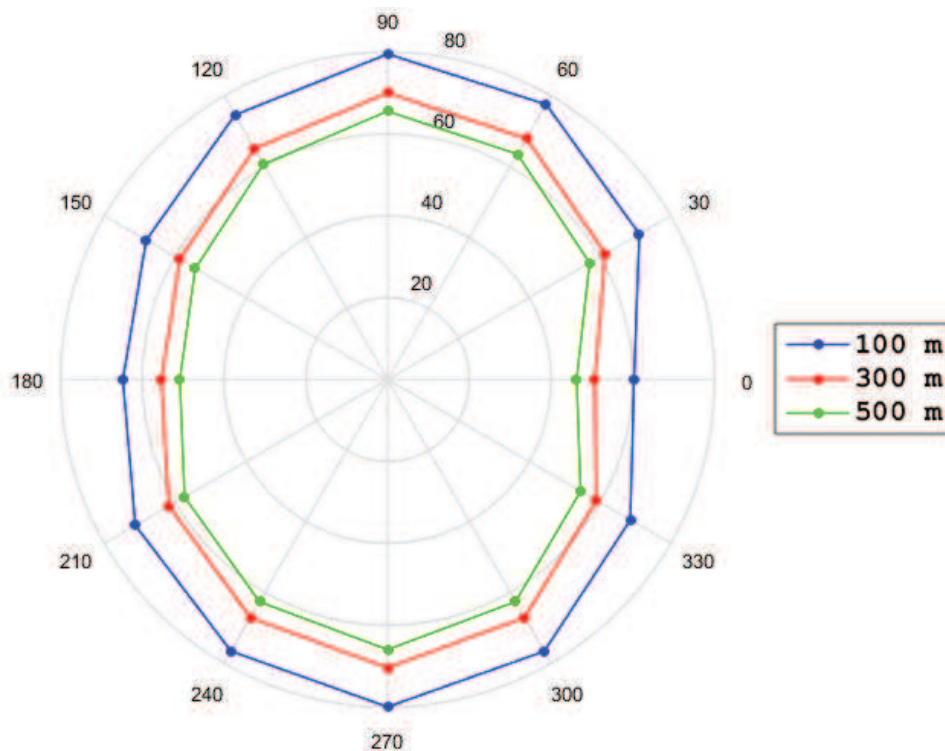
Fonte: Autor.

O Gráfico 11, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 9, com corda $c = 0,80\text{ m}$, torção $\beta = -0,27^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 54,97\text{ m/s}$. O ruído foi mais elevado nos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor em relação com os do eixo do rotor, em torno de 15-19 dB.

O Gráfico 12, apresenta a diretividade do ruído para o elemento de pá 10, com corda $c = 0,73\text{ m}$, torção $\beta = -0,83^\circ$ e velocidade relativa do vento $w = 60,62\text{ m/s}$. O ruído foi mais elevado nos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor em relação com os do eixo do rotor, em torno de 18-22 dB.

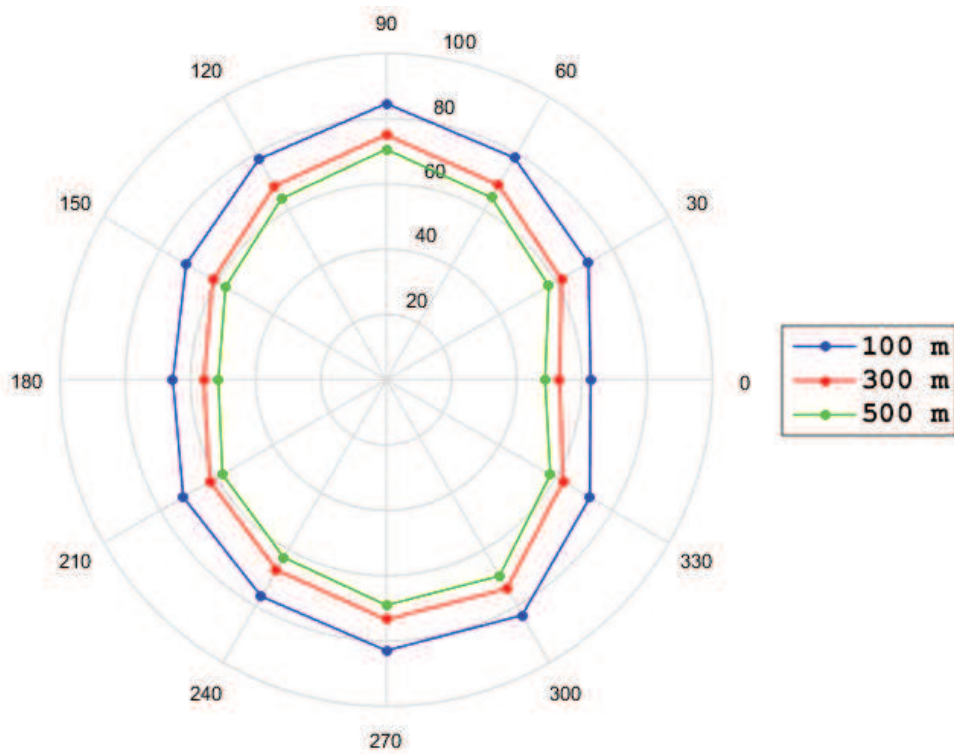
Os resultados obtidos com a analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkins, expostos nos Gráficos 3 a 12 da diretividade do ruído no aerofólio NREL S830 em diferentes secções da pá mostram que, quanto mais longe o receptor estiver da fonte sonora menor será o ruído aerodinâmico. Esta atenuação do ruído ocorre devido a dispersão das ondas: o som ao propagar-se no ar livre (ondas esféricas) tem a sua área de propagação aumentada, em função do aumento da área da esfera. Como a energia sonora (energia de vibração das moléculas de ar) é a mesma, ocorre uma diluição dessa energia, causando uma atenuação da intensidade.

Gráfico 11 – Diretividade do ruído no elemento de pá 9.



Fonte: Autor.

Gráfico 12 – Diretividade do ruído no elemento de pá 10.

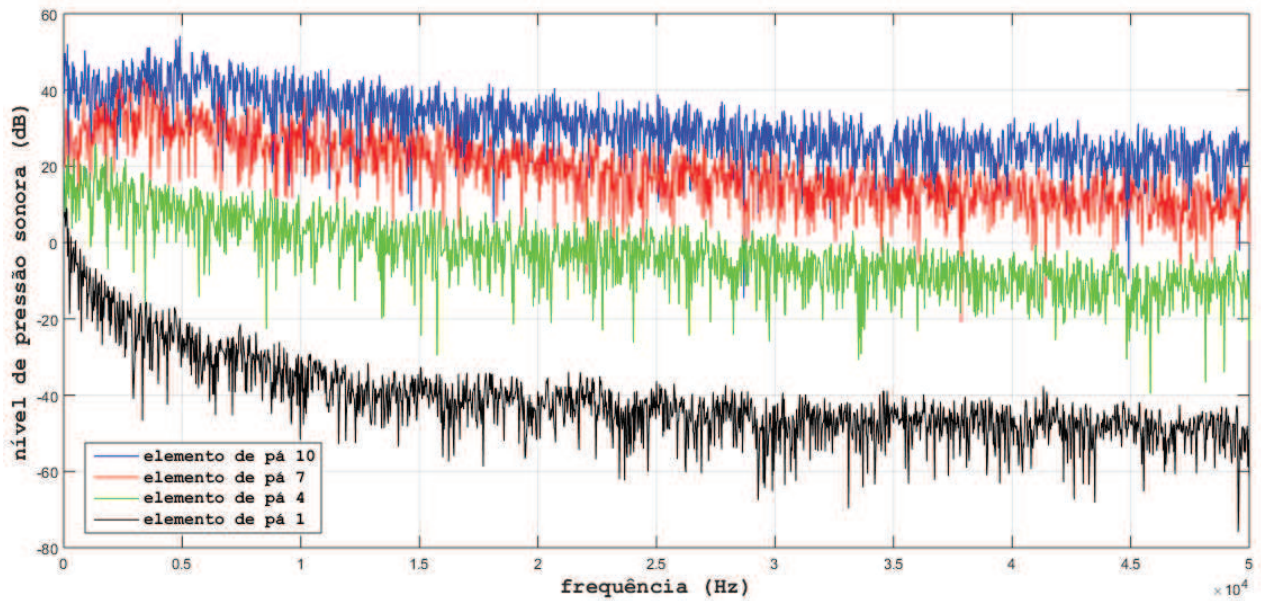


Fonte: Autor.

Os Gráficos 13, 14 e 15 apresentam o espectro de frequência (de 0 a 50 kHz) com os receptores a 100, 300 e 500 metros na direção mais à jusante (90°) do plano do rotor dos elementos de pá 1, 4, 7 e 10.

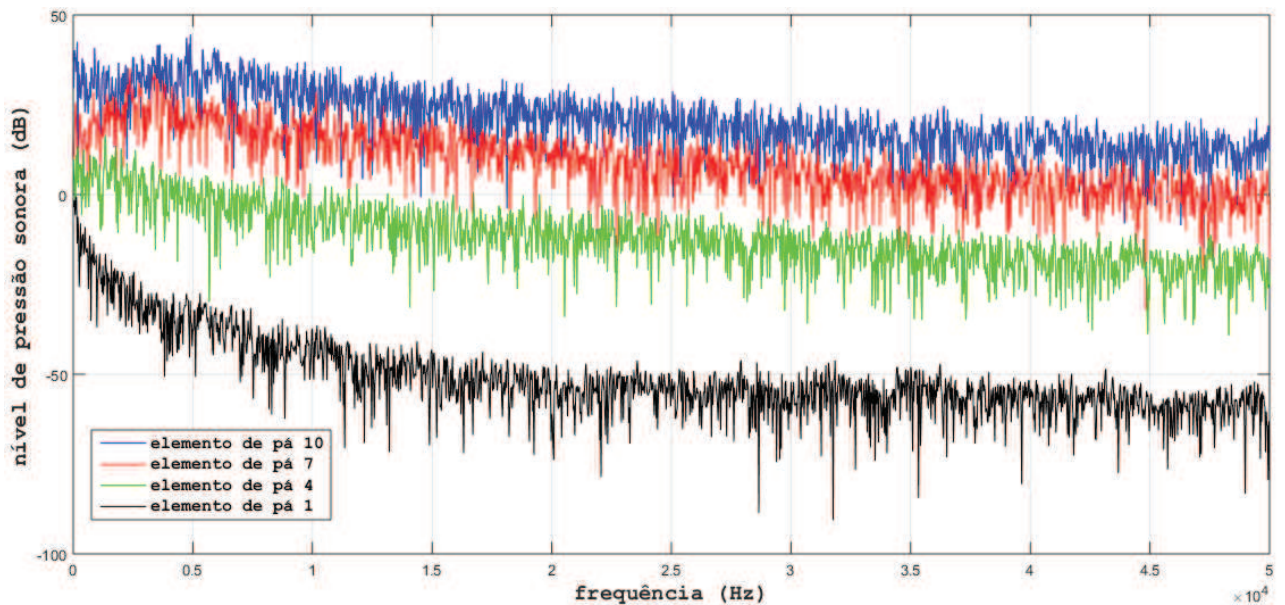
Os resultados obtidos indicam que o nível de ruído, vai aumentando à medida que o perfil aerodinâmico (NREL S830) vai ficando mais próximo da ponta da pá, devido à velocidade relativa do vento ser maior, de acordo com os valores obtidos pela equação (23) e indicados pela Tabela 5. Os dados apresentados mostram que a pressão sonora vai diminuindo quanto maior for à banda de frequência.

Gráfico 13 – Nível de pressão sonora x frequência na direção mais a jusante (90°) do plano do rotor a 100 m.



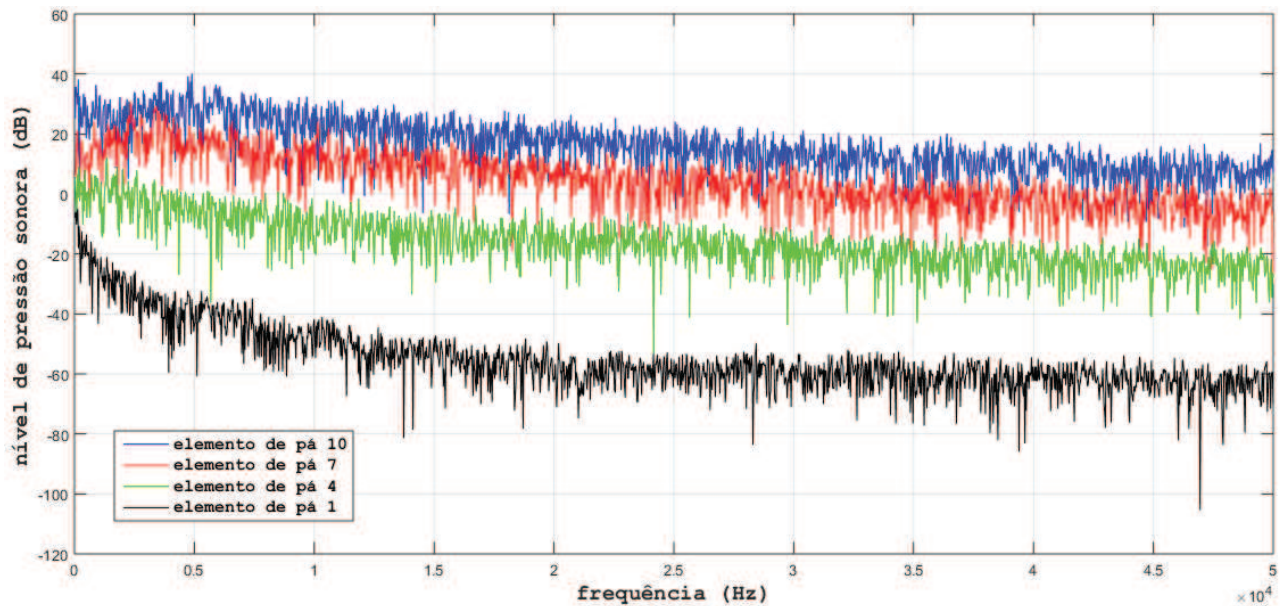
Fonte: Autor.

Gráfico 14 – Nível de pressão sonora x frequência na direção mais a jusante (90°) do plano do rotor a 300 m.



Fonte: Autor.

Gráfico 15 – Nível de pressão sonora x frequência na direção mais a jusante (90°) do plano do rotor a 500 m.



Fonte: Autor.

5.4 Simulações Tridimensionais

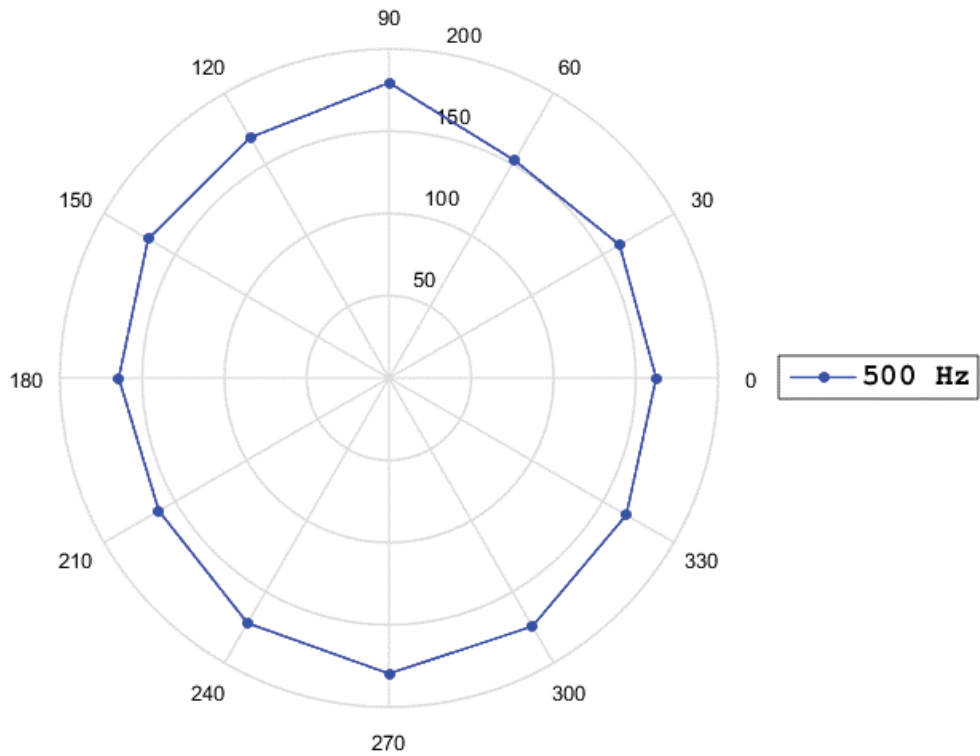
A seguir, são apresentados os resultados da diretividade do ruído para a pá estática com perfil NREL S830 em uma banda de frequência de 500 Hertz (Hz) e 1 kHz, com os receptores posicionados nas direções ilustradas na Figura 23, a 80 m de distância da fonte sonora na altura do eixo do rotor.

No Gráfico 16, vê-se que o ruído do receptor na direção 120° (168,75 dB) é maior do que no receptor na direção 60° (152,69 dB) e que o receptor na direção de 300° (174,22 dB) tem ruído mais elevado do que na direção de 240° (171,96 dB).

No Gráfico 17, vê-se que o ruído do receptor na direção 120° (168,42 dB) é maior do que no receptor na direção 60° (161,09 dB) e que o receptor na direção de 300° (165,64 dB) tem ruído quase idêntico do que na direção de 240° (165,95 dB).

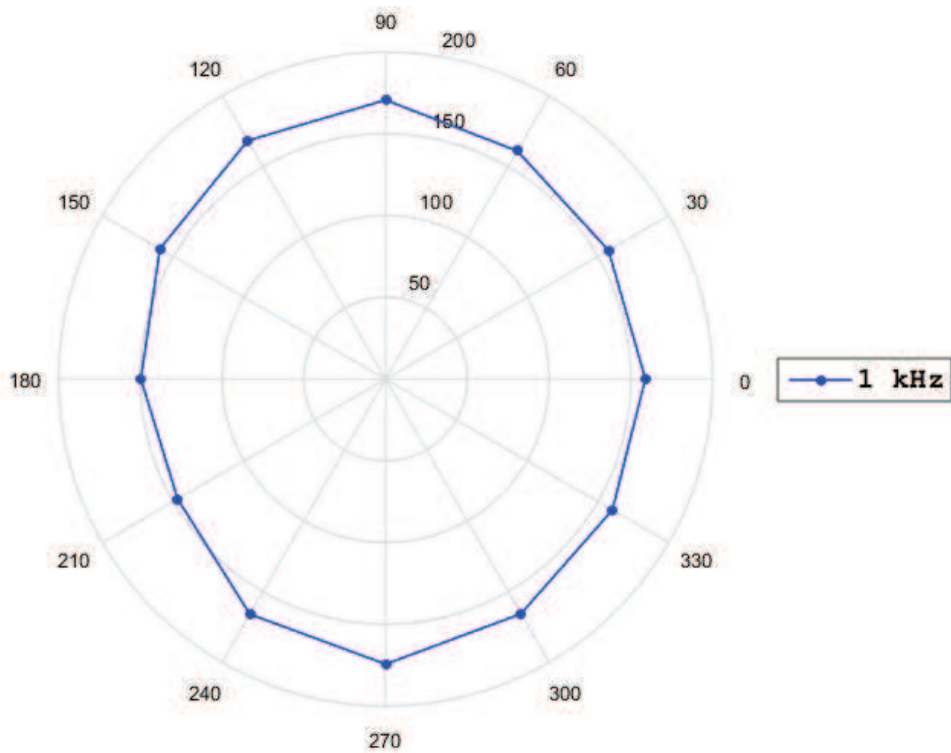
Estes resultados mostram que a torção da pá modifica a direção do ruído, assim como foi visto nas simulações bidimensionais para os diferentes elementos ao longo da pá, pois de acordo com Wasala *et al.* (2015), o ruído é maior perpendicular à direção da corda.

Gráfico 16 – Diretividade do ruído da pá para uma banda frequência de 500 Hz.



Fonte: Autor.

Gráfico 17 – Diretividade do ruído da pá para uma banda frequência de 1 kHz.

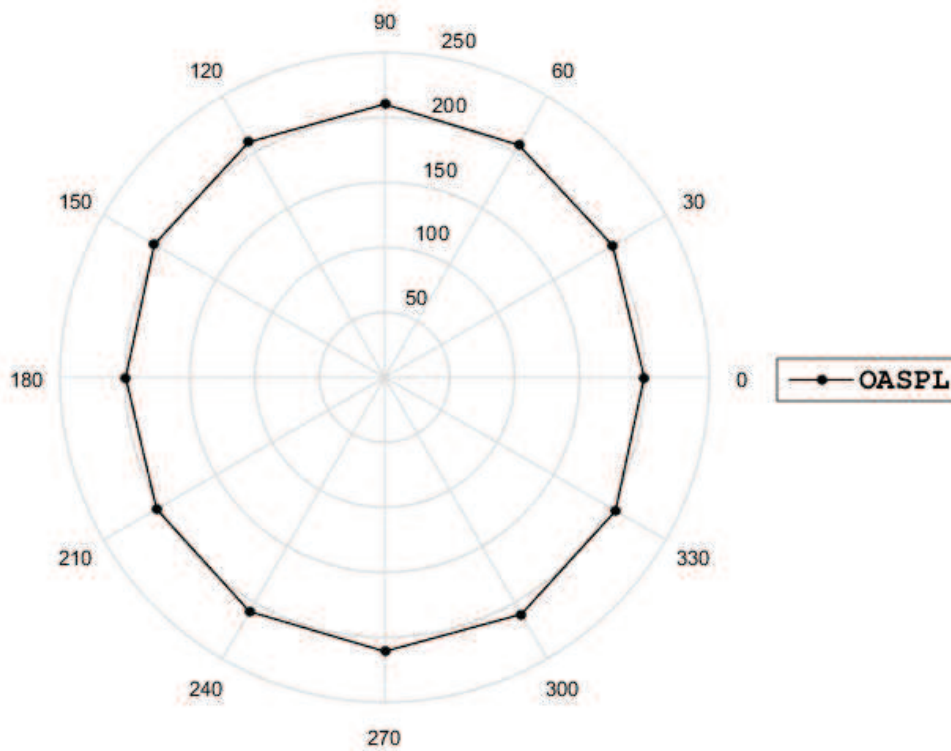


Fonte: Autor.

Os resultados obtidos com um escoamento do vento a 10 m/s na direção do ângulo de ataque da pá ($6,25^\circ$) mostram que o ruído na direção mais a jusante (90°) e mais a montante da pá (270°) apresentam os valores mais elevados em decibéis em comparação com os obtidos no plano de rotação da pá (0° e 180°), em torno de 15-17 dB para a frequência de 500 Hz e de 15-24 dB para a frequência de 1kHz (Gráficos 16 e 17, respectivamente).

O Gráfico 18, apresenta a diretividade do ruído do nível de pressão sonora total (OASPL). Os resultados mostram que o ruído é mais elevado a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor (Figura 16) em comparação com os outros receptores e que o ruído é menor no plano do rotor (0° e 180°). Devido a torção da pá, os receptores posicionados nas direções de 120° e 300° obtiveram os valores mais próximos dos receptores a jusante (90°) e a montante (270°) do plano do rotor, respectivamente.

Gráfico 18 – Diretividade do ruído da pá do nível de pressão sonora total (OASPL).



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho, teve como objetivo prever o ruído aerodinâmico da pá de uma turbina eólica de grande porte, pelas equações da analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkings. O ANSYS foi utilizado para gerar a superfície de fluido (nas simulações 2D) e o volume de fluido (nas simulações 3D), assim como a malha. O software ANSYS Fluent foi utilizado para resolver as equações de escoamento de Navier-Stokes em torno da pá e as equações do modelo acústico FW-H.

As simulações foram realizadas com o modelo de turbulência LES e os efeitos convectivos foram considerados no cálculo do tempo retardado. Os dados obtidos pelo Fluent foram pós-processados pelo software comercial MATLAB (*MATrix LABoratory*).

A comparação dos algoritmos com tempo de avanço iterativo (ITA) e com tempo de avanço não iterativo (NITA) mostraram que o esquema NITA, obteve resultados de nível de pressão sonora (SPL) e nível de pressão sonora total (OASPL) próximos ao do esquema ITA com baixo custo computacional. Portanto, o algoritmo NITA mostra-se eficaz na solução dos problemas de acústica.

Para validar o algoritmo NITA e a malha com elementos triangulares, os resultados obtidos do nível de pressão sonora total (OASPL), para o escoamento em torno de um cilindro com receptores posicionados na direção perpendicular ao escoamento, foram comparados com os resultados experimentais obtidos por Revell *et al.* (1977) e com os simulados por Orselli (2012) e Braz (2008), mostrando bom acordo com esses dados.

Os receptores nas simulações em duas dimensões do perfil NREL S830 localizaram-se a 100, 200 e 300 metros de distância do aerofólio (no mesmo plano da secção) e os receptores da simulação em três dimensões localizaram-se a 80 m da pá (na altura do eixo do rotor), ambos em 12 direções distintas.

Os resultados obtidos nas simulações pela analogia acústica FW-H mostraram que o ruído é mais elevado nas secções mais próximas da ponta da pá, devido ao escoamento do vento ser cada vez maior à medida que se aproxima desta região (quanto mais próximo da ponta da pá maior será a velocidade relativa do vento). De acordo com Wasala *et al.* (2015), o ruído é maior perpendicular a direção da corda, desta forma, os dados apresentados pelas simulações nos 10 elementos de pá mostraram que a torção da pá altera a diretividade do ruído.

Os dados obtidos nas simulações da pá sem rotação indicam que o ruído na direção à jusante e a montante do plano do rotor apresentaram os valores mais elevados em comparação com os obtidos no plano do rotor e que a torção da pá influencia na diretividade do ruído.

O emprego de energia eólica vem crescendo de forma rápida, porém a emissão de ruído é uma das maiores preocupações para populações vizinhas a parques eólicos, causando incômodo, assim como problemas de saúde. Portanto, a predição do ruído é um dos aspectos mais relevantes na instalação de um aerogerador, desta forma, com base nos resultados apresentados neste trabalho, as equações da analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkings (FW-H), mostrou-se um método capaz de predizer o ruído gerado por turbinas eólicas.

Para trabalhos futuros sugere-se o cálculo da diretividade do ruído para uma pá (nas simulações em três dimensões) com correção de ponta e de raiz, com a pá em rotação, utilizando 20 elementos de pá e uma malha mais refinada na superfície da pá, afim de obter resultados mais realistas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2016**. São Paulo, 2017. 17p.

BONATTO, A. S. **Simulações do Escoamento em Torno um Aerofólio com Slat**. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BRAUNHOLTZ, S. **Public Attitudes to Windfarms a Survey of Local Residents in Scotland**. Scottish Executive Social Research, 2003.

BRAZ, B. C. **Simulações de Aeroacústica dos Escoamentos ao Redor de um Cilindro e Aerofólio com “Slat”**. 2008. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BROOKS, T. F.; POPE, D. S.; MARCOLINI, M. A. **Airfoil Self – Noise and Prediction**. NASA 1218, Julho 1989. 147 p.

CARVALHO, I. V.; MESQUITA, A. L.; SANTOS, P. G. L.; SANTOS, J. S. Densidade de Potencial Eólico nas Diferentes Regiões do Estado do Ceará Litoral, Serra, Sertão. **Revista GeoNorte**, v. 2, p. 1317-1327, 2012.

COSTA, A. R. S. **O Ruído Ambiental de Aerogeradores de Pequena Dimensão**. 2014. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Julho 2014.

COUTINHO, J. R. V. **Aspectos Analíticos no Estudo de Impactos Gerados por Ruídos e Estruturas de Aerogeradores**. 2012. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia Eólica Princípios e Tecnologias**. 2008. 58p.

ERICKSON, W. P. JOHNSON, G. D. YOUNG JR, D. P. **A Summary and Comparison of Bird Mortality from Anthropogenic Causes with an Emphasis on Collisions.** Tech. Rep. PSW - GTR - 191, US Dept. of Agriculture - Forest Service, p. 1029–1042, 2005

EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION. **European Wind Energy Association: Wind Energy – The Facts II.** part V, p. 307–411. Março 2009.

FARASSAT, F; SUCCI, G. P. **The prediction of helicopter rotor discrete frequency noise.** In: American Helicopter Society, Annual Forum, 38th, Anaheim, CA, v.1, p. 497-507. May 1982

BARBOSA FILHO, W. P; AZEVEDO, A. C. S. **Impactos Ambientais em Usinas Eólicas.** AGRENER GD 2013, 9º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, Itajubá, Maio 2013. 17 p.

FLUENT inc. **ANSYS Fluent Theory Guide 15.** November 2013. 814 p.

GAVINO, N. A. **Energia Eólica: uma análise dos incentivos à produção (2002-2009).** 2011. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, abril 2011.

GUNDTOFT, S. **Wind Turbines.** University College of Aarhus, June 2009. 43 p.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2016.** maio 2017. 76 p.

Hau, E. **Wind Turbines-Fundamentals, Technologies, Application, Economics.** Springer, Second Edition, 2006.

JIANU, O.; ROSEN, M. A.; NATERER, G. Noise Pollution Prevention in Wind Turbines: Status and Recent Advances. **Sustainability**, v. 4, p. 1104–1117, abril 2012.

LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. Panorama do Setor de Energia Eólica. **Revista BNDS**, v. 39, p. 183-206, junho 2013.

LEE, S. LEE, S., LEE S. Numerical modelling of wind turbine aerodynamic noise in the time domain. **Journal Acoustical Society of America**, v. 133, 2013. 7p.

MACIEL, S. F. **Desenvolvimento de Ferramenta Computacional de Alta Ordem para a Solução de Problemas de Propagação Acústica**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MAIA, D. S. N. **Ruído de Parques Eólicos—Análise e Caracterização**. 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Junho 2010.

MELO, G. M. **Um Estudo da Viabilidade de Pequenos Aerogeradores na Produção de Energia Elétrica**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, Dezembro 2009.

MANWELL, J. F. MCGOWAN, J. G. ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained – Theory, Design and Application**. 2nd Edition, Wiley, 2009, 705p.

NOVAK, P. R. **Previsão Numérica do Ruído Acústico Gerado por Escoamentos Subsônicos em Cavidades Retangulares**. 2011. 141 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

OERLEMANS, S. **Detection of Aeroacoustic Sound Sources on Aircraft and Wind Turbines**. 2009. 185 p. Thesis, University of Twente, Enschede, 2009.

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

ORSELLI, R. M. **Investigação Numérica de Escoamento e Ruído Gerado em Corpos Rombudos Prismáticos**. 2012. 221 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

REINALDO, G. P. B. Atenuação natural dos níveis de ruído oriundos de aerogeradores de energia elétrica. **Revista Tecnologia & Informação**, Natal, p. 49-63, Setembro 2013.

REVELL, J. D.; PRYDZ, R. A.; HAYS, A. P. **Experimental Study of Airframe Noise vs. Drag Relationship for Circular Cylinders.**, Lockheed Report 28074, Feb. 1977. Final Report for NASA Contract Nas1-14403.

ROGERS, A. L.; MANWELL, J. F.; WRIGHT, S. **Wind turbine acoustic noise.** Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts at Amherst, Janeiro 2006.

ROSENBLOOM, E. **A Problem With Wind Power.** Setembro 2006. 8 p.

SANTOS, A. A.; RAMOS, D. S.; SANTOS, N. T. F.; OLIVEIRA, P. P. **Projeto de geração de energia eólica.** 2006. 75 f. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Santa Cecília, Santos, 2006.

SILVA, P. C. **Sistema para Tratamento, Armazenamento e Disseminação de Dados de Vento.** 1999. 125 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Setembro 1999.

SIMÕES, L. G. C. **Estudo de Geração de Som em um Eslate Utilizando Código Comercial.** 2011. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SIMÕES, S. C. D. **Caracterização do Ruído Produzido por um Parque Eólico: Efeito Sobre a População.** 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2015.

SOUZA, D. S. **Simulação Numérica de Ruído de Eslate em Configurações Práticas Usando um Código Comercial.** 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SOVERNIGO, M.H. **Impacto dos Aerogeradores Sobre a Avifauna e Quiropteroфаuna no Brasil.** 2009. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Ecologia e Zoologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SUTHERLAND, H. J.; BERG, D. E.; ASHWILL, T. D. **A Retrospective of VAWT Technology**. SANDIA Report, January, 2012, 64 p.

TADAMASA, A. ZANGENEH, M. Numerical prediction of wind turbine noise. **Renewable Energy**, v.36, p. 1902-1912, 2011.

TAYLOR, J. M. **The Characteristics and Perception of Small Wind System Noise**. 2011. 295 p. PhD thesis, University of Nottingham, Setembro 2011.

TENDERO, S. **Parques Eólicos e Impactos Socioeconômicos e Ambientais na Percepção de Agricultores em Osório – RS**. 2013. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Agosto 2013.

TERCIOTE, R. **Análise da Eficiência de um Sistema Eólico Isolado**. 2002. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

TIAN, Y. COTTÉ, B. CHAIGNE, A. **Wind Turbine Noise Modelling Based on Amiet's Theory**. 5th International Meeting on Wind Turbine Noise, Aug 2013, Denver, CO, United States. 13p.

TUPI, B.S. **Wind Energy is not the Answer**, 2010.13p.

VAN DER VELDEN, W. C. P. PROBSTING, S. VAN ZUIJLEN, A. H. DE JONG, A T. Numerical and Experimental Investigation of a Beveled Trainling-Edge Flow Field and Noise Emission. **Journal of Sound and Vibration**, 2016. 17p.

WASALA, S. H. STOREY, R. C. NORRIS, S. E. CATER, J. E. Aeroacoustic Noise Prediction for Wind Turbines Using Large Eddy Simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2015. 13p.