



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**MALENA AGUIAR DE SÁ CAVALCANTE**

**OTIMIZAÇÃO EM ESCALA DE UMA TURBINA EÓLICA EQUIPADA COM  
DIFUSOR DE ÂNGULO DE ATAQUE 7°**

**FORTALEZA**

**2018**

**MALENA AGUIAR DE SÁ CAVALCANTE**

**OTIMIZAÇÃO EM ESCALA DE UMA TURBINA EÓLICA EQUIPADA COM  
DIFUSOR DE ÂNGULO DE ATAQUE 7°**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial para a obtenção do título  
de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Claus Franz Wehmann.

**FORTALEZA**

**2018**

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)

---

- C364o Cavalcante, Malenna Aguiar de Sá.  
Otimização em escala de uma turbina eólica equipada com difusor de ângulo de ataque 7° / Malenna Aguiar de Sá Cavalcante. – 2018.  
65 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Claus Franz Wehmann.
1. Turbina Eólica. 2. Difusor Aerodinâmico. 3. Geração de Energia. 4. Impressão 3D. 5. Sensor Infravermelho. I. Título.

CDD 621.042

---

**MALENA AGUIAR DE SÁ CAVALCANTE**

**OTIMIZAÇÃO EM ESCALA DE UMA TURBINA EÓLICA EQUIPADA COM  
DIFUSOR DE ÂNGULO DE ATAQUE 7°**

Aprovada em: 17/12/2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Professor Dr. Claus Franz Wehmann (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Professora Dra. Carla Freitas de Andrade  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Carlos Henrique Silveira Macedo  
UNINASSAU (Membro Externo)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e perseverança dadas a mim diariamente, permitindo continuar mesmo nos momentos mais difíceis, de cansaço e descrença.

À minha família, em especial meus pais e padrinhos, que sempre me deram o suporte necessário para fazer com que minha formação fosse a prioridade em minha vida. E também à minha mãe, minha maior incentivadora em todos os meus passos.

À minha vó Tetê, símbolo de força que me inspira diariamente, e minha tia Naza e seus filhos que sempre me ajudaram com as dificuldades pessoais que enfrentei.

Aos meus amigos da Renováveis, especialmente Ana Luisa, Cássio, Fernanda e Pedro Mossoró que me deram suporte, incontáveis caronas, cobriram minhas falhas e potencializaram minhas qualidades nos últimos três anos.

Aos meus amigos de faculdade, especialmente do grupo Rapasduras, que estão comigo desde o primeiro ano e nunca me abandonaram, principalmente no ano mais difícil da minha vida; sempre me trataram de uma maneira que me mostrou o valor que eu tenho como ser humano. A confiança na pessoa que eu sou e no meu potencial são consequências do reconhecimento e da amizade que tive deles e pela qual serei eternamente grata.

À minha melhor amiga, Priscila Ferrazza, que luta minhas batalhas comigo mesmo com um país inteiro nos separando, sempre me lembrando que podemos brilhar no escuro.

Às minhas irmãs de coração, Amanda Mello e Rayssa Dantas, responsáveis por manter minha sanidade e me aconselhar em todos os momentos.

À minha amiga Nycole, parceira de aleatoriedades, dramas, futebol de bom gosto, séries, livros e músicas duvidosos, um símbolo de conforto e acolhimento nos momentos difíceis. É também a maior, e talvez única, incentivadora da minha autoestima.

Ao Twitter, minha segunda casa e válvula de escape de todo problema.

Aos meus colegas de LAERO, especialmente Carlos Henrique, João Paulo, Luan, Renan, Bruno e Tamara, cuja ajuda foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu colega Ramsés Rodrigues, meu orientador moral, por todo o suporte dado nos momentos mais difíceis deste projeto, especialmente quando achava que nada daria certo.

Ao PIBIC e ao CNPQ pela bolsa de iniciação científica que iniciou esse estudo.

Ao meu professor orientador Dr. Claus Wehmann, pela confiança e atenção.

Aos membros da Banca Examinadora, pela disponibilidade e atenção.

*“Se você cair, caiu. Às vezes, cair também nos ensina. Nos sonhos, é comum o sujeito cair antes de acordar.” (Patrick Rothfuss)*

## RESUMO

A busca pela melhor eficiência de geração de energia elétrica é constante independentemente da área ou da fonte utilizada. Para a Energia Eólica, o uso de um difusor aerodinâmico é uma das ideias mais promissoras a fim de aumentar a conversão da energia mecânica para energia elétrica em turbinas eólicas de eixo horizontal. A presença do difusor junto ao rotor gera uma diferença de pressão que aumenta o fluxo de massa de ar passando pela turbina quando comparado a uma turbina convencional. Assim, este trabalho dispõe-se a projetar, construir, testar e comparar a rotação e a geração de potência de um sistema com e sem a presença de um difusor. Para isso, foi construído um conjunto de pás eólicas com 50 mm de comprimento e perfil aerodinâmico NREL S809, embasado na teoria da quantidade de movimento do elemento da pá (BEM). O difusor foi construído com a rotação do perfil NACA 4412 em um eixo central e ângulo de ataque de  $7^\circ$ . O projeto de todos os componentes foi feito com auxílio de *software* CAD e a construção por impressão 3D com plástico ABS, melhorando a qualidade de fabricação e diminuindo imperfeições. Os testes foram realizados no Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos (LAERO) da Universidade Federal do Ceará, com auxílio de um sistema composto por sensor infravermelho e programação em arduíno para determinar a rotação do rotor para diferentes velocidades. Na comparação das velocidades, foi possível observar um acréscimo de 58% na velocidade do rotor em uma corrente livre de 7 m/s e de 42% na velocidade de 10 m/s com a presença do difusor aerodinâmico. O aumento foi significativo para a escala de trabalho e demonstrou o impacto do uso desse equipamento na geração de potência.

**Palavras-chave:** Turbina Eólica. Difusor Aerodinâmico. Geração de Potência. Impressão 3D. Sensor Infravermelho.

## ABSTRACT

The quest for increasing the efficiency of electric power generation is a constant regardless the area or source used. For Wind Energy, the use of an aerodynamic diffuser is one of the most promising concepts for increase the conversion of mechanical energy to electric energy in the horizontal axis wind turbine. The presence of the diffuser next to the rotor generates a pressure difference that increases the mass flow of air through the turbine when compared to a conventional turbine. Thus, this work proposes to design, construct, test and compare the rotation and power generation of a system with and without the presence of a diffuser. For this, a group of wind blades was built with length of 50 mm and aerodynamic airfoil NREL S809, based on the blade element momentum (BEM) theory. The diffuser was built with the rotation of the aerodynamic airfoil NACA 4412 through a central axis and 7° angle of attack. The design of all components was made with a CAD software and the construction by 3D printing using ABS plastic, improving the manufacturing quality and reducing imperfections. The tests were performed in Aerodynamics and Fluid Mechanics Laboratory (LAERO) of the Federal University of Ceará, with a system composed by infrared sensor and programming in Arduino to determine the rotation of the rotor in different speeds. Comparing different velocities, it was possible to observe an increase of 58% in the rotor speed in a free stream airflow of 7 m/s and 42% in the velocity of 10 m/s with the presence of the aerodynamic diffuser. The increase was significant for the work scale and demonstrated the impact of the use of this equipment on power generation.

**Keywords:** Wind turbine. Diffuser aerodynamic. Power generation. 3D Printing. Infrared Sensor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética brasileira em GW .....	15
Figura 2 – Aerogerador de eixo horizontal.....	19
Figura 3 – Aerogerador de eixo vertical.....	21
Figura 4 – Perfil Aerodinâmico .....	21
Figura 5 – Variação do coeficiente de sustentação com o ângulo de ataque.....	22
Figura 6 – Extração de energia por meio de um disco atuador .....	24
Figura 7 – Noções para análise do momento num disco atuador .....	25
Figura 8 – Evolução da pressão e da velocidade ao longo do disco atuador.....	27
Figura 9 – Relação entre o Coeficiente de Potência e a razão de velocidades .....	29
Figura 10 – Elemento de pá em região anular .....	30
Figura 11 – Velocidades e forças do elemento de pá .....	30
Figura 12 – Fluxo ideal em uma turbina equipada com difusor.....	34
Figura 13 – Desempenho de diferentes tipos de difusores .....	36
Figura 14 – Escoamento por uma turbina com difusor com abertura e flange.....	37
Figura 15 – Comprimento de ondas eletromagnéticas .....	40
Figura 16 – Estrutura do perfil NREL S809.....	41
Figura 17 – Pás construídas por impressão 3D.....	42
Figura 18 – Projeto do Difusor Aerodinâmico .....	43
Figura 19 – Difusor finalizado .....	44
Figura 20 – Bancada de testes .....	45
Figura 21 – Pás aerodinâmicas acopladas ao hub.....	46
Figura 22 – Posicionamento do sensor de presença .....	47
Figura 23 – Placa de Arduíno .....	48
Figura 24 – Montagem do sistema completo.....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo de dados para velocidade de projeto $\lambda p = 5$ m/s.....	51
Gráfico 2 – Comparativo de dados para velocidade de teste $U_t = 7$ m/s.....	52
Gráfico 3 – Comparativo de dados para velocidade de teste $U_t = 10$ m/s.....	53
Gráfico 4 – Comparativo de dados para sistema com difusor $U_t = 7$ m/s.....	55
Gráfico 5 – Mudança de rotação do sistema $U_t = 7$ m/s.....	56
Gráfico 6 – Comparativo de dados para sistema com difusor $U_t = 10$ m/s.....	57
Gráfico 7 – Mudança de rotação do sistema $U_t = 10$ m/s.....	58
Gráfico 8 – Potência Adimensional Média para os sistemas.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Visão geral de dados de rotação utilizando sensor infravermelho .....	54
Tabela 2 – Dados médios de rotação do sistema sem e com difusor $U_t = 7$ m/s.....	56
Tabela 3 – Dados médios de rotação do sistema sem e com difusor $U_t = 10$ m/s.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
BEM	<i>Blade Element Momentum Theory</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
ESC	<i>Electronic Speed Control</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
LAERO	Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
rpm	Rotações por minuto
SLA	<i>Laser-based Stereolithography</i>
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área
$a$	Fator de indução axial
$c$	Comprimento de corda
$C_D$	Coefficiente de arrasto
$C_L$	Coefficiente de sustentação
$C_P$	Coefficiente de potencia
$d$	Disco atuador
$\dot{m}$	Fluxo de massa
$N$	Elementos de segmentação
$P$	Potência gerada
$P_0$	Potência de corrente libre
$P_a$	Potência adimensional
$Q$	Torque
$T$	Empuxo
$U_1$	Velocidade do vento
$U_2$	Velocidade axial
$U'$	Velocidade de escoamento
$U_t$	Velocidade de teste
$U_\infty$	Velocidade de corrente libre
$W$	Velocidade relativa nas pás
$\lambda_p$	Velocidade específica de projeto
$\alpha$	Ângulo de ataque
$\omega$	Rotação em rad/s

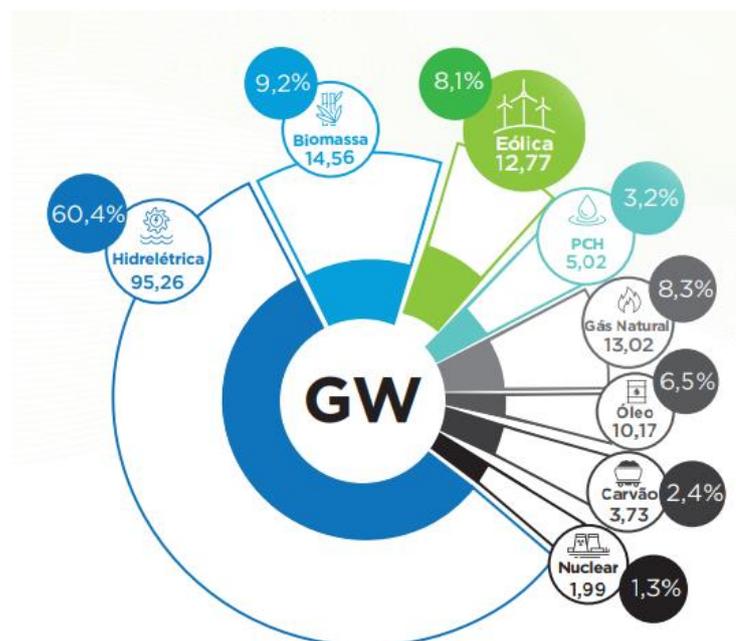
## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. Justificativa .....	17
1.2. Objetivos .....	18
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
2.1. Conceitos de um Aerogerador .....	19
2.1.1. <i>Aerogerador de Eixo Horizontal</i> .....	19
2.1.2. <i>Aerogerador de Eixo Vertical</i> .....	20
2.2. Características de um aerofólio .....	21
2.3. Disco Atuador .....	23
2.3.1. <i>Teoria da Quantidade de Movimento</i> .....	25
2.3.2. <i>Limite de Betz</i> .....	28
2.4. Teoria do Elemento de Pá .....	29
2.4.1. <i>Teoria da quantidade de movimento do elemento de pá</i> .....	31
2.5. Difusor em Turbinas Eólicas .....	33
2.6. Impressão 3D .....	37
2.7. Análise de presença a partir de sensores .....	38
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>41</b>
3.1. Projeto e construção das pás .....	41
3.2. Projeto e construção do difusor .....	43
3.3. Teste e aquisição de dados .....	45
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1. Validação de dados .....	50
4.2. Rotação do sistema .....	55
4.2.1. <i>Velocidade de teste 7 m/s</i> .....	55
4.2.2. <i>Velocidade de teste 10 m/s</i> .....	57
4.3. Geração de Potência .....	59
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO A – CÓDIGO: FREQUENCIÔMETRO COM IMPULSE.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS PARA VELOCIDADE DE PONTA <math>\lambda_p = 5</math> M/S ..</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de energias alternativas tem sido amplamente buscada desde a década de 1970, quando as crises do petróleo levaram diversos países a procurar a segurança no fornecimento de energia e a redução da dependência da importação de combustíveis (SIMMAS; PACCA, 2013). Além disso, a preocupação com os impactos ambientais também impulsionou o investimento nesse tipo de energia por todo o planeta. No Brasil, o Balanço Energético Nacional de 2018, tendo como ano base 2017, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) mostra que a participação das fontes renováveis na **matriz elétrica** do país atingiu 80,2% no ano referido. Apesar dessa expressiva porcentagem ser dominada pela fonte hídrica, considerada renovável, a alta porcentagem foi impulsionada pela Energia Eólica, com crescimento de 26,5%, contrastando com a redução em 3,4% da energia hídrica devido às recentes condições hidrológicas desfavoráveis.

Figura 1 – Matriz energética brasileira em GW



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2017).

Os números podem parecer discretos quando visto de forma absoluta, mas o crescimento, o cenário de atuação e o potencial são impactantes. A Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) traz em seu Boletim Anual de Geração Eólica de 2017 dados que destrincham a participação da Energia Eólica na matriz nacional. Como mostrado na Figura 1, a fonte eólica é a terceira que mais impacta o setor de energia no Brasil, atrás apenas das

hidrelétricas e da biomassa em geral, com uma capacidade instalada de 12,77 GW. A análise da EPE atualizada mostra que a geração de fato atingiu o valor de 42,4 TWh, marca alcançada especialmente com a força de produção do Nordeste brasileiro, região que detém as marcas mais expressivas de geração e consumo de energia proveniente dos ventos.

Simmas e Pacca (2013) destacaram em seus estudos que durante as últimas duas décadas muito foi investido em pesquisa e desenvolvimento em prol do crescimento do setor eólico, especialmente na área econômica e ambiental, com destaque à mitigação das emissões de gases de efeito estufa dos sistemas energéticos e os efeitos das políticas climáticas na economia. Além disso, também enfatizaram que alguns fatores desfavoráveis frearam por muito tempo o avanço do setor em alguns mercados, como os altos custos iniciais de instalação e execução e o estágio de desenvolvimento dessa tecnologia em relação às tecnologias tradicionais disponíveis para utilização, especialmente no Brasil.

O avanço do setor ocorreu por meio de um conjunto de incentivos financeiros e tecnológicos. No Brasil, foi instituído em 2002 o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), responsável por definir preços atrativos para a contratação de Energia Eólica e outras fontes alternativas, além da criação de mecanismos de leilões específicos para a área de energias renováveis. Na área tecnológica, entretanto, Lage e Processi (2013) pontuaram que os desenvolvimentos tecnológicos no setor têm ocorrido principalmente no exterior devido a estrutura de pesquisa ser de detenção de fabricantes multinacionais que já dominaram boa parte do processo, ficando as atividades nacionais restritas à montagem dos principais componentes dos parques.

Desfrutando dos benefícios dessa área energética, cabe à comunidade científica brasileira gerar estudos e pesquisas que aumentem o entendimento e desenvolvam a aplicação prática referente à Energia Eólica em todos os âmbitos possíveis, incluindo o aumento da eficiência na geração de energia, maior aproveitamento do recurso eólico, melhoria na transmissão e distribuição de energia, redução de perdas elétricas, minimização de impactos sociais e ambientais negativos, entre outros. Logo, instigar trabalhos que agreguem conhecimento à área, assumindo o papel de uma nação que estimula o avanço tecnológico para fins construtivos em escala regional, nacional e até mesmo global.

## 1.1. Justificativa

Devido à grande importância de incentivar a pesquisa em âmbito nacional, especialmente no que se refere a áreas de pouco conhecimento e crescente visibilidade e impacto econômico, faz-se fundamental o aumento de estudos tecnológicos relacionados à Energia Eólica. Com o crescente investimento nas últimas décadas e um maior número de parques eólicos em território brasileiro, muitos estudos mostram dados nos quesitos econômicos e ambientais, mas ainda são pouco desenvolvidos aqueles voltados para autonomia, adaptação tecnológica e melhoria de funcionamento dos empreendimentos eólicos.

Algumas linhas de pesquisa na área eólica buscam mais estudos aprofundados, como as de tecnologias que busquem aprimorar a coleta do fluxo de ar sobre uma turbina. A eficiência de uma turbina eólica está associada ao Limite de Betz, análise que afirma que a quantidade máxima de potência atingida pelo equipamento é de 59,3% da potência disponível no vento. Para ultrapassar esse limite, entre outras opções, as turbinas podem ser equipadas com um dispositivo involto (também chamado de difusor aerodinâmico) que tem por objetivo aumentar a velocidade do vento antes de passar através dela.

Apesar de serem encontrados estudos teóricos que de fato indiquem o aumento da eficiência de aerogeradores equipados com acessórios aerodinâmicos, são necessários mais estudos que retornem dados palpáveis e úteis a análises mais aprofundadas que possam resultar em tecnologias aplicáveis ao mercado quando se fala no cenário nacional.

Sabe-se que muitos fatores dificultam esses estudos, tal como a escala de trabalho e as tecnologias associadas à reprodução das condições reais de atuação dos parques eólicos, além de limitações inerentes ao conhecimento humano sobre a área. Entretanto, é possível associar alternativas já existentes para reproduzir condições mais fiéis às encontradas na prática. Estudos em menor escala com túneis de vento replicando as condições do fluxo de ar, além do uso de perfis aerodinâmicos específicos para simular as pás dos aerogeradores, auxiliam no desenvolvimento de práticas de aumento da eficiência.

Outras tecnologias plausíveis de uso para auxiliar nos estudos em escala são as de estereotilografia a laser e impressão 3D, que facilitam a fabricação de equipamentos a serem testados, como os perfis e o difusor aerodinâmicos, reduzindo rugosidade e falhas e, assim, as perdas energéticas que afetam os estudos de eficiência. O uso da impressão 3D caracteriza um avanço nos estudos práticos, tomando lugar de trabalhos manuais que, apesar de valorosos, trazem consigo as limitações humanas.

Assim, a busca por sistemas de conversão de energia eólica em energia elétrica mais eficientes é benéfica à população em caráter socioeconômico e ambiental, investindo em autonomia energética e tecnológica e melhorando a produção de energia de uma fonte pouco nociva ao meio ambiente, indo ao encontro dos princípios do desenvolvimento sustentável que embasam, de maneira correta, as políticas públicas dos principais governos no mundo.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral a análise do aumento da geração de energia de um modelo, em escala, de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal por meio do acréscimo de potência induzida por um dispositivo envolto apropriado para coletar o fluxo de ar sobre um rotor, denominado difusor aerodinâmico, perpassando pelos projetos do rotor, pás aerodinâmicas e difusor.

Como objetivos específicos, listam-se:

- (a) Projeção e construção de perfis aerodinâmicos utilizando métodos mais avançados como a impressão 3D;
- (b) Projeção e construção do difusor aerodinâmico por meio de impressão 3D;
- (c) Realização de testes em um túnel de vento para analisar o comportamento de do conjunto rotor e perfis aerodinâmicos em condições específicas de trabalho;
- (d) Realização de testes em um túnel de vento para analisar o comportamento do rotor na presença de um difusor;
- (e) Realização de testes para garantir o uso de sensor infravermelho como um método válido de aferição de dados de rotação;
- (f) Comparação da potência adimensional obtida na simulação com e sem a equipagem do sistema com um difusor aerodinâmico;
- (g) Comparação da geração de potência obtida na simulação com diferentes velocidades de vento.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Conceitos de um Aerogerador

#### 2.1.1. Aerogerador de Eixo Horizontal

Segundo os estudos de Schaffarczyk (2014), o desenvolvimento tecnológico da Energia Eólica passou por uma grande evolução por volta do ano 1279 quando o eixo de rotação dos moinhos de vento mudou de vertical para horizontal levando a uma consequente mudança aerodinâmica do uso dessas máquinas: o princípio baseava-se na Força de Sustentação, que atua perpendicularmente ao escoamento do vento, e não na Força de Arrasto, cuja atuação segue o mesmo sentido do fluxo. Esse conceito de utilização da força dos ventos foi desenvolvido e, com o surgimento dos geradores elétricos e o crescimento da indústria aeronáutica, foi possível obter as turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH's) que se popularizaram por apresentarem as melhores condições para geração de energia elétrica.

De maneira geral, as TEEH's apresentam uma estrutura padrão vista na Figura 2. Além do eixo horizontal de rotação e do uso da Força de Sustentação, as turbinas em escala comercial possuem três pás, rotor *upwind* e controle de *pitch* quando há alcance da potência nominal (SCHAFFARCZYK, 2014).

Figura 2 – Aerogerador de eixo horizontal



Fonte: HAU (2006).

A classificação *downwind* e *upwind* significam, respectivamente, jusante e montante, e fazem referência à superfície de ataque do vento incidente nas pás. Segundo Castro (2009), o rotor à montante – no qual o vento ataca as pás pela frente – popularizou-se pelo fato de que o vento incidente não perturba a torre, enquanto o rotor à jusante – no qual o vento ataca as pás por trás – permite o alinhamento automático do rotor na direção do escoamento, mas já não é tão utilizado porque o escoamento sofre perturbações da torre antes de incidir no rotor.

Muitas alternativas foram propostas e testadas, mas nenhuma atingiu o mesmo grau de sucesso e eficiência das TEEH's. São características atribuídas à superioridade incontestável desse tipo de aerogerador na produção de energia elétrica (HAU, 2006):

- (a) a velocidade do rotor e a saída de potência podem ser controladas por meio do controle de *pitch*, garantindo que a pá gire em seu eixo longitudinal reduzindo, assim, o ângulo de ataque;
- (b) o formato da pá do rotor otimizado aerodinamicamente, alcançando maior eficiência quando a sustentação máxima é explorada;
- (c) o avanço tecnológico no estudo e projeto de hélices nas últimas décadas.

### **2.1.2. Aerogerador de Eixo Vertical**

Os moinhos de vento de eixo vertical e, conseqüentemente, as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV's) são mais antigos que os modelos como eixo de rotação horizontal. Schaffarczyk (2014) diz que muito do desenvolvimento dessas turbinas é atribuído às invenções do engenheiro francês Georges Darrieus e pelo arquiteto finlandês Sigurd Johannes Savonius no início do século XX.

Uma das principais vantagens das TEEV's é a independência quanto a mudança de direção do escoamento do vento, além de que possuem design simples e sua configuração mecânica permite que equipamentos pesados possam ser instalados próximos ao solo. Entretanto, apresentam problemas de vibração excessiva, o que limita a velocidade de rotação e compromete a potência obtida (SCHAFFARCZYK, 2014). Dentre os principais tipos de TEEV's estão os rotores Darrieus, mostrado na Figura 3, Savonius e H.

Figura 3 – Aerogerador de eixo vertical



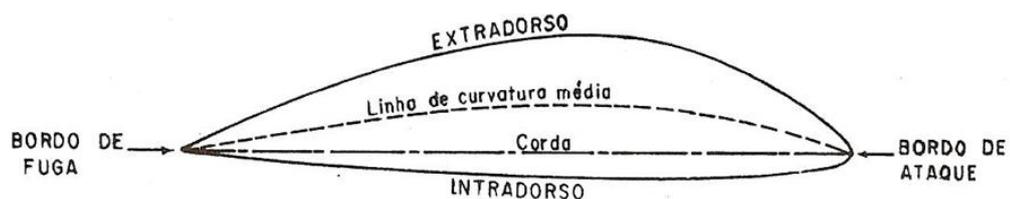
Fonte: SCHAFFARCZYK (2014).

De acordo com Hau (2006), o rotor de Darrieus possui pás que giram no padrão de uma linha de superfície em um sólido geométrico de revolução com um eixo de rotação vertical. Por muito tempo, a turbina tipo Darrieus foi a única TEEV a ser produzida comercialmente, normalmente com duas ou três pás.

## 2.2. Características de um aerofólio

Os aerofólios são aparatos criados para provocar variação do comportamento de um fluido ao seu redor. Segundo Anderson Jr. (2001), a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) começou um programa para desenvolver uma série de aerofólios nos anos 1930. Os aerofólios são imprescindíveis para grande parte das aeronaves e mecanismos que funcionam com princípios aerodinâmicos. O perfil aerodinâmico é a unidade básica dos mecanismos aerodinâmicos e está ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Perfil Aerodinâmico



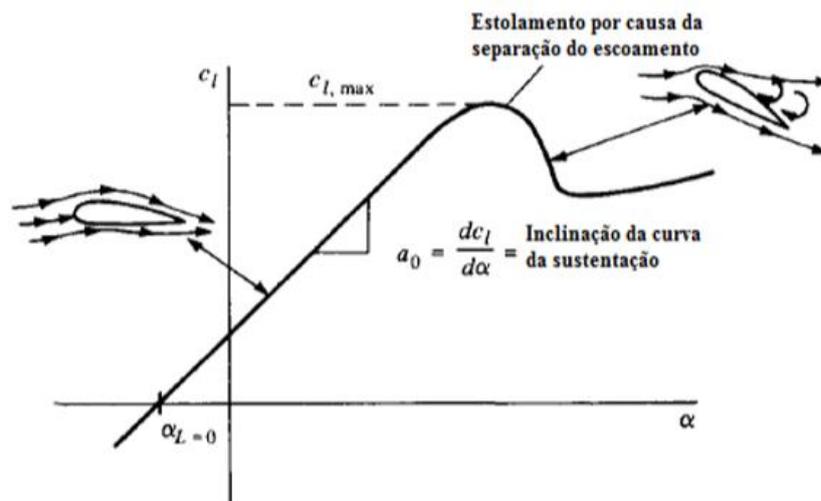
Fonte: Adaptado de ANDERSON JR. (2001).

Os principais componentes do perfil aerodinâmico são:

- (a) **Linha de curvatura média:** Ligação dos pontos médios entre a superfície superior e inferior ao longo do perfil;
- (b) **Bordo de ataque:** Ponto externo anterior à linha de curvatura média;
- (c) **Bordo de fuga:** Ponto externo posterior à linha de curvatura média;
- (d) **Corda:** linha reta que conecta o bordo de fuga ao bordo de ataque;
- (e) **Arqueamento:** Distância máxima entre a linha média e a linha de corda do perfil;
- (f) **Espessura:** Distância entre a superfície inferior e superior medida perpendicularmente à corda do perfil.

Entre as décadas de 1930 e 1940, a *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) realizou vários testes de perfis em um túnel de vento para determinar propriedades que auxiliassem na identificação das características aerodinâmicas de acordo com a configuração do perfil utilizado. Desse modo, foram desenvolvidos os coeficientes de sustentação  $c_L$  e de arrasto  $c_D$  de acordo com o ângulo de ataque submetido (ANDERSON JR., 2001). A variação do coeficiente de sustentação está representada na Figura 5.

Figura 5 – Variação do coeficiente de sustentação com o ângulo de ataque



Fonte: Adaptado de ANDERSON JR. (2001).

Segundo Manwell (2009), em perfis simétricos, o coeficiente de sustentação aumenta de forma linear com aumento do ângulo de ataque  $\alpha$  ao qual o perfil está submetido e o comportamento de perfis reais assemelha-se aos testes para ângulos baixos. A partir de

determinado valor, o aumento de  $\alpha$  faz com que o escoamento do fluido “descole” da superfície superior do perfil formando uma esteira com intensa recirculação de ar, gerando atrito e consequente perda de sustentação – fenômeno conhecido como estol (ANDERSON JR., 2001). Na Figura 5 é possível identificar o  $c_{Lmax}$  que representa o máximo valor de sustentação que o aerofólio pode alcançar sem sofrer estolamento determinando, portanto, a velocidade de estol, característica importante para garantir os usos adequados para cada tipo de perfil aerodinâmico.

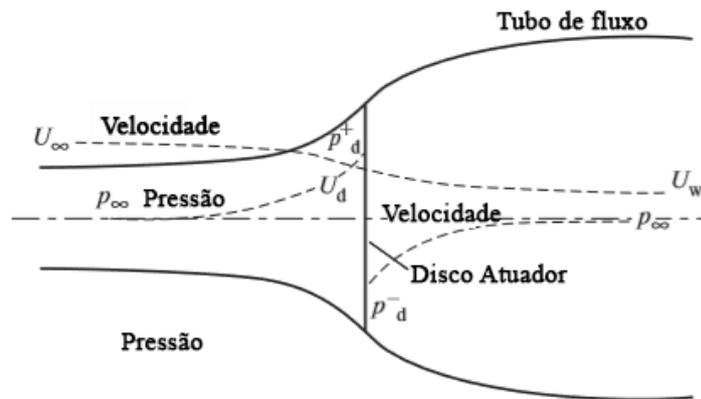
Seguindo os experimentos nos anos 1930, a NACA desenvolveu uma série de estudos que resultaram na criação dos aerofólios de quatro dígitos. Esses perfis são determinados por quatro números seguidos pelo nome NACA (ANDERSON JR., 2001). Na sequência de leitura: o primeiro número indica o arqueamento máximo em porcentagem de corda; o segundo número determina o maior ponto da curvatura relativo ao bordo de ataque em percentual de corda; os dois últimos números representam a espessura máxima em porcentagem de corda. Outra nomenclatura conhecida é a da *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) que também desenvolveu códigos os quais referenciam o desempenho aerodinâmico dos perfis (MANWELL, 2009).

### 2.3. Disco Atuador

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica é baseado na conversão da energia cinética contida no movimento do vento em energia mecânica para consequente geração de energia elétrica. Segundo Hau (2006), a extração de energia mecânica de um fluxo móvel com a ajuda de um conversor de energia eólica rotativo em forma de disco segue algumas regras básicas como mostrado pelo alemão Albert Betz entre 1922 e 1925. Seu modelo – baseado na teoria do impulso ou quantidade de movimento linear – pode ser utilizado para determinar a potência do rotor no local de instalação (MANWELL, 2009).

Considerando o processo de extração de energia, a Figura 6 mostra o dispositivo que auxilia a explicar esse processo, o disco atuador que cria uma descontinuidade de pressão no tubo de fluxo de ar que flui através dele. O tubo de fluxo possui uma área de seção transversal a montante menor e a jusante maior que a do disco atuador. Essa expansão acontece pelo fato de que a taxa de fluxo de massa deve ser a mesma em toda a distribuição do fluxo. (BURTON, 2001; MANWELL, 2009).

Figura 6 – Extração de energia por meio de um disco atuador



Fonte: Adaptado de Burton (2001).

A análise do disco atuador segue algumas considerações listados por Manwell (2009): escoamento homogêneo, incompressível e estacionário; número finito de pás; empuxe uniforme sobre a área do rotor; esteira não girante; pressão estática na montante e jusante do rotor igual à pressão estática no ambiente. A equação 1 representa a massa envolvida em um escoamento:

$$\dot{m} = \rho U A \quad (1)$$

Na qual é considerada uma seção qualquer de área  $A$  ( $m^2$ ) pela qual o vento passa com velocidade  $U$  ( $m/s$ ), considerando sua densidade  $\rho$  ( $kg/m^3$ ). Como o escoamento deve ser constante ao longo do tubo de fluxo, tem-se:

$$\rho U_\infty A_\infty = \rho U_d A_d = \rho U_w A_w \quad (2)$$

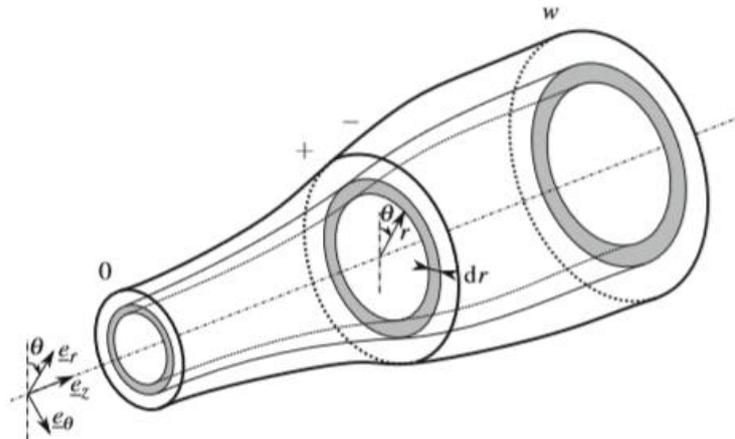
Fazendo uso das variáveis mostradas na Figura 5, “ $\infty$ ” indica a região de corrente livre, “ $d$ ” refere-se às condições no disco atuador e “ $w$ ” à velocidade a jusante. De acordo com Burton (2001), é comum assumir que o disco atuador induz uma variação de velocidade que deve ser sobreposta na velocidade de corrente livre. A energia passando através de uma determinada seção transversal por unidade tempo é fisicamente idêntica à potência gerada:

$$P = \frac{1}{2} \rho U^3 A \quad (3)$$

### 2.3.1. Teoria da Quantidade de Movimento

De acordo com Branlard (2017), a teoria da quantidade de movimento ou do momento linear é baseada nas leis de conservação da mecânica dos fluidos assumindo que o escoamento é homogêneo, incompressível e simétrico em todas as direções, o fluido é homogêneo e não viscoso e as cargas do rotor são simétricas em todas as direções e estão concentradas no disco atuador.

Figura 7 – Noções para análise do momento num disco atuador



Fonte: Branlard *et al.* (2017).

A Figura 7 mostra as condições de estudo do fluxo no disco atuador para analisar a teoria da quantidade de movimento. Sabe-se que a energia mecânica só pode ser extraída ao custo da energia cinética contida na corrente de vento, logo, mesmo com um fluxo de massa inalterado, a velocidade de fluxo por trás do conversor de energia do vento deve diminuir. A velocidade reduzida, entretanto, resulta num alargamento da seção transversal, uma vez que o mesmo fluxo de massa deve passar por ele. Portanto, é necessário considerar as condições na frente e atrás do conversor (HAU, 2006). A energia mecânica que o disco atuador extrai do fluxo de ar corresponde à diferença de potência do fluxo de ar antes e depois do conversor:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_{\infty} U_{\infty}^3 - \frac{1}{2}\rho A_w U_w^3 = \frac{1}{2}\rho(A_{\infty} U_{\infty}^3 - A_w U_w^3) \quad (4)$$

Como o escoamento é constante, pode-se resumir que:

$$P = \frac{1}{2} \rho U_{\infty} A_{\infty} (U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (6)$$

Analisando fisicamente a equação (6), se a velocidade  $U_w$  depois do disco atuador fosse zero para maximizar a potência, a velocidade de corrente livre  $U_{\infty}$  anterior também deveria ser nula, o que resulta em inexistência de fluxo, fisicamente impossível. Hau (2006) afirmou que existe uma proporção numérica entre  $U_w$  e  $U_{\infty}$  que possibilita a extração máxima de potência gerada. Usando o princípio de conservação do momento, a força exercida pelo ar é expressa por:

$$F = \dot{m}(U_{\infty} - U_w) \quad (7)$$

De acordo com a terceira lei de Newton, o impulso necessário para “empurrar” a velocidade a massa de ar com velocidade  $U'$  é:

$$P = FU' = \dot{m}(U_{\infty} - U_w)U' \quad (8)$$

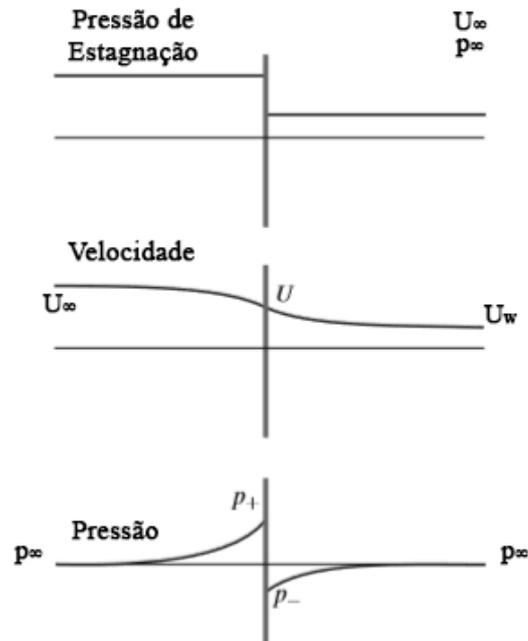
Desse modo, a potência mecânica extraída do fluxo de ar pode ser derivada da energia ou do impulso na região anterior e posterior ao disco atuador e com o impulso e a velocidade do fluxo. Igualando e manipulando as equações (6) e (8) é possível encontrar a velocidade  $U'$  no plano do rotor:

$$U' = \frac{1}{2}(U_{\infty} + U_w) \quad (9)$$

A equação (9) mostra que a velocidade do fluxo de vento é a média aritmética entre a velocidade a montante e a jusante no disco atuador. O comportamento da pressão e da velocidade axial ao longo do tubo de fluxo estão representados na Figura 8. Branlard (2017) mostra que a queda de pressão ao longo da área do rotor é uniforme, assim como a velocidade axial. Além disso, não há velocidade rotacional e a pressão estática a montante e a jusante é igual à pressão estática do ambiente sem perturbações. A montante, o escoamento tem velocidade  $U_{\infty}$  e pressão ambiente. O ar próximo ao rotor atinge a velocidade média  $U'$ , a pressão aumenta e em seguida sofre uma queda brusca. A velocidade é reduzida à  $U_w$  a jusante

devido à energia extraída pelo aerogerador ao mesmo tempo em que a pressão tende a voltar ao valor ambiente.

Figura 8 – Evolução da pressão e da velocidade ao longo do disco atuador



Fonte: Adaptado de Branlard (2017).

Pela nova relação de velocidade, o fluxo de massa pode ser expresso como:

$$\dot{m} = \rho U' A = \frac{1}{2} \rho A (U_\infty + U_w) \quad (10)$$

E a potência gerada é dada por:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (U_\infty^2 - U_w^2) (U_\infty + U_w) \quad (11)$$

O desempenho do rotor é medido a partir da variável  $C_p$  denominada de coeficiente de potência. Para expressá-la, utilizou-se como referência a potência de corrente livre  $P_o$  definida como:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A U_\infty^3 \quad (12)$$

Essa potência de referência é medida considerando a corrente livre de ar que passa pela mesma área de secção transversal A, sem que seja extraída qualquer parcela de energia mecânica. Assim, o coeficiente de potência  $C_p$  (adimensional) relaciona a energia mecânica extraída pelo conversor e a do fluxo de ar não perturbado:

$$C_p = \frac{P}{P_o} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(U_\infty^2 - U_w^2)(U_\infty + U_w)}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3}$$

Que, com algumas manipulações matemáticas, pode ser escrito como:

$$C_p = \frac{P}{P_o} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{U_w}{U_\infty}\right)^2 \right| \left| 1 + \left(\frac{U_w}{U_\infty}\right) \right| \quad (13)$$

Desse modo, o coeficiente de potência, definido como a proporção da potência mecânica extraível para a potência contida na corrente de vento depende somente das velocidades do fluxo de ar antes e depois do disco atuador (HAU, 2006).

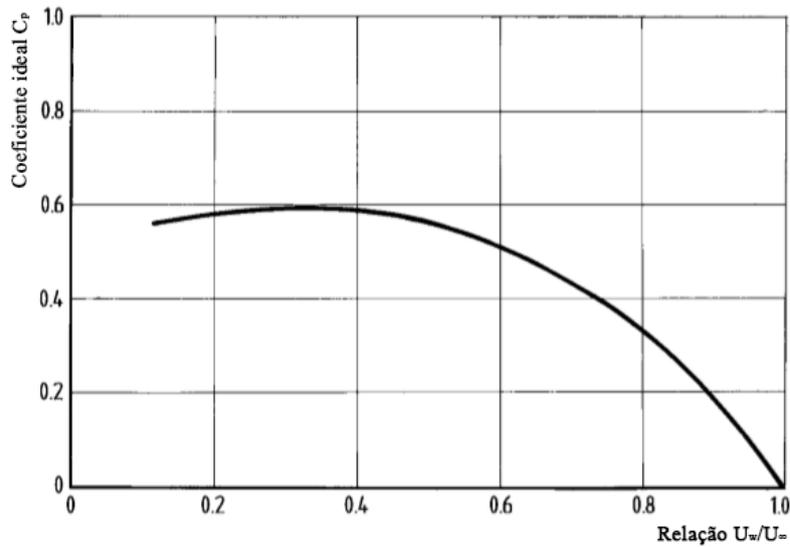
### 2.3.2. Limite de Betz

De acordo com Hau (2006), a relação entre as velocidades e o coeficiente de potência pode ser representada graficamente como na Figura 9, mostrando que existe um valor de razão entre as velocidades a montante e a jusante que maximizam o coeficiente de potência.

Quando a razão entre as velocidades é de 1/3, o coeficiente de potência ideal tem valor de:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (14)$$

Figura 9 – Relação entre o Coeficiente de Potência e a razão de velocidades



Fonte: Adaptado de HAU (2006).

Esse valor para razão de velocidades e o conseqüente valor do coeficiente de potência é encontrado por meio da derivação da equação de  $C_p$  e esta ação foi realizada pela primeira vez por Albert Betz, a quem se refere o nome do coeficiente. Sabendo que a relação entre as velocidades é de  $1/3$ , foi possível deduzir que a velocidade  $U$  do escoamento:

$$U = \frac{2}{3} U_\infty \quad (15)$$

E a redução da velocidade  $U_w$  após a passagem do escoamento pelo disco atuador é definida por:

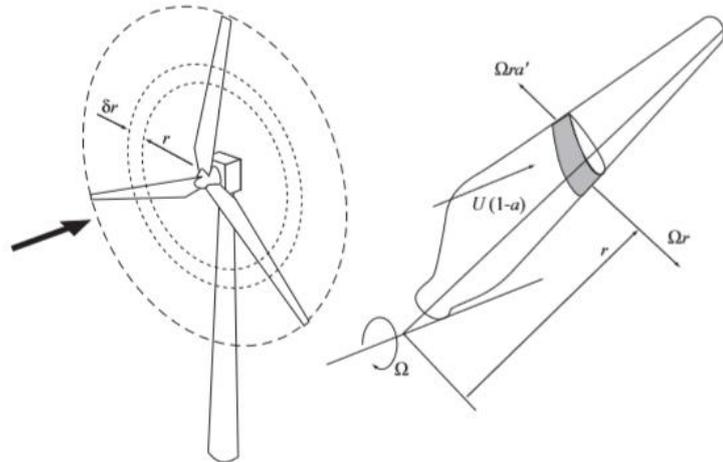
$$U_w = \frac{1}{3} U_\infty \quad (16)$$

#### 2.4. Teoria do Elemento de Pá

A Teoria do Elemento de Pá foi desenvolvida pelos engenheiros Stefan Drzewiecki e William Froude para calcular as cargas em um rotor com base na geometria da pá levando em conta o comprimento da corda, as performances do aerofólio em duas dimensões e a velocidade de fluxo no rotor. Segundo Hau (2006), o único meio de encontrar a relação entre a forma real do rotor e suas propriedades aerodinâmicas é por meio da análise da geometria da pá e por isso a teoria é tão importante na análise e compreensão do funcionamento da energia eólica.

Os componentes de velocidade em uma posição radial na pá expressos em termos de velocidade do vento, os fatores de fluxo e a velocidade de rotação do rotor determinarão o ângulo de ataque. Tendo informações sobre como os coeficientes característicos do perfil aerodinâmico variam com o ângulo de ataque, as forças nas pás podem ser determinadas (BURTON, 2001).

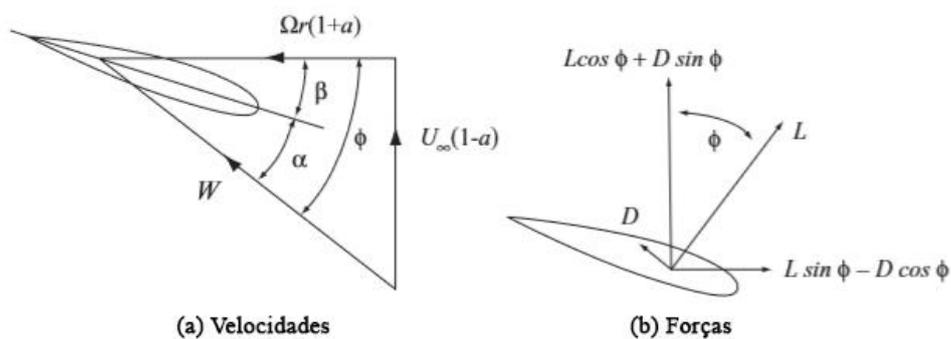
Figura 10 – Elemento de pá em região anular



Fonte: BURTON *et al.* (2001).

Para a explicação da teoria, será utilizada a notação de Burton (2001). A Figura 10 mostra uma turbina com pás segmentadas em  $N$  elementos com raio  $R$  e comprimento de corda  $c$ , além de ângulo de inclinação  $\beta$ . As pás giram com uma velocidade angular  $\Omega$ , assumindo, também, que a velocidade do vento é  $U_\infty$ .

Figura 11 – Velocidades e forças do elemento de pá



Fonte: Adaptado de BURTON (2001).

Fazendo a análise das velocidades e decompondo as forças de sustentação e arrasto atuantes, como mostrado posteriormente na Figura 11, sabe-se que a velocidade relativa nas pás que atua em um ângulo  $\phi$  em relação ao plano de rotação é:

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1 - a)^2 + \Omega^2 r^2(1 + a')^2} \quad (17)$$

Sendo possível estabelecer as relações:

$$\text{sen } \phi = \frac{U_{\infty}(1 - a)}{W} \quad (18)$$

$$\text{cos } \phi = \frac{\Omega r(1 + a')}{W} \quad (19)$$

O ângulo de ataque foi obtido pela relação  $\alpha = \phi - \beta$ . A força de sustentação normal à direção de  $W$  e a força de arrasto paralelo a ela para um comprimento  $\delta r$  de pá foram ser definidas, respectivamente, por:

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_L \delta r \quad (20)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_D \delta r \quad (21)$$

Onde  $C_L$  e  $C_D$  são, respectivamente, os coeficientes aerodinâmicos de sustentação e arrasto que auxiliam na caracterização das forças atuantes no elemento de pá. Com esses parâmetros, será possível fazer a combinação entre a teoria da quantidade de movimento e a teoria do elemento de pá.

#### **2.4.1. Teoria da quantidade de movimento do elemento de pá**

A *Blade Element Momentum Theory* (BEM) ou Teoria da Quantidade de Movimento para o Elemento de Pá tem como principal suposição que a forma num elemento de pá é exclusivamente responsável pela mudança da quantidade de movimento do ar que passa pelo anel varrido por aquele elemento. Segundo Burton (2001), presumiu-se que não há interação entre os fluxos através da região anular; entretanto, essa condição apenas é verdadeira se o fator de indução axial  $a$  do fluxo não variar radialmente. Na prática, o fator de indução axial raramente é uniforme, mas pela análise experimental, provou-se que supor verdadeira a independência radial do fluxo é plausível.

A Equação (22) expressa a componente da força aerodinâmica em  $N$  elementos de pá fixados na direção axial:

$$\delta L \cos \phi + \delta D \sin \phi = \frac{1}{2} \rho W^2 N c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \delta r \quad (22)$$

A taxa de variação da quantidade de movimento do ar que passa pela região anular considerada é:

$$\rho U_\infty (1 - a) 2\pi r \delta r 2a U_\infty = 4\pi r U_\infty^2 a (1 - a) r \delta r \quad (23)$$

A queda de pressão causada pela rotação é igual ao aumento da perda de carga dado por  $\frac{1}{2} \rho (2a' \Omega r)^2$ , de modo que a força axial adicional em cada anel é  $\frac{1}{2} \rho (2a' \Omega r)^2 2\pi r \delta r$ . Considerando a parcela de torque gerada pelas forças de sustentação e arrasto. Admitindo  $\mu = r/R$ , tem-se:

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) = 8\pi \lambda \mu^2 a' (1 - a) \quad (24)$$

A Equação (24), por ser não linear em relação ao ângulo de ataque, é solucionada com métodos numéricos iterativos para obter os valores de fator de indução axial  $a$  e  $a'$ . Uma das considerações utilizadas para a solução é assumir como nulo o coeficiente de arrasto  $C_D$ , especialmente quando o aerofólio tem esse coeficiente com baixo valor, uma vez que o desvio de velocidade causado pelo arrasto se restringe à extremidade do bordo de fuga e não contribui com quaisquer alterações de velocidade à montante do disco atuador. Quando os métodos são utilizados, a equação final de iteração é resumida em:

$$\frac{a}{(a + 1)} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (25)$$

Onde  $C_y$  é assumido como simplificação das componentes verticais dos coeficientes aerodinâmicos, expresso por  $C_y = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi$  ou ainda  $C_y = C_L \sin \phi$  adotando o coeficiente de arrasto igual a zero. O termo  $\sigma_r$  representa a solidez local, um parâmetro primário de determinação da eficiência do rotor definido como a razão entre a área total varrida pelo elemento de pá e o comprimento da circunferência varrida por ela.

$$\sigma_r = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (26)$$

Determinar o valor do fator de indução do fluxo é necessário para o cálculo do torque e da potência do rotor. Se o arrasto for desconsiderado anteriormente nos cálculos do fator de indução axial, seu efeito deve ser introduzido no torque. O torque completo é expresso por:

$$Q = \frac{1}{2} \rho U_\infty \pi R^3 \lambda \left[ \int_0^R \mu^2 \left[ 8a'(1-a)\mu - \frac{W}{U_\infty} \frac{N}{\pi} \frac{c}{R} C_d (1+a') \right] d\mu \right] \quad (27)$$

A nova expressão do coeficiente de potência considerando o BEM é:

$$C_p = \frac{Q\Omega}{\frac{1}{2} \rho U_\infty \pi R^2} \quad (28)$$

A Teoria da Quantidade de Movimento para o Elemento de Pá só é válida se as pás tiverem circulação uniforme, ou seja, se  $a$  for uniforme. Quando a circulação não é uniforme, existe uma interação radial e troca de impulso entre os fluxos por meio das regiões anulares adjacentes, de modo que não se pode precisar que a força axial atuante em cada anel é unicamente responsável pela queda de pressão no disco atuador. Na prática, entretanto, desprezar essa influência para velocidades específicas maiores resulta em um erro aceitável.

## 2.5. Difusor em Turbinas Eólicas

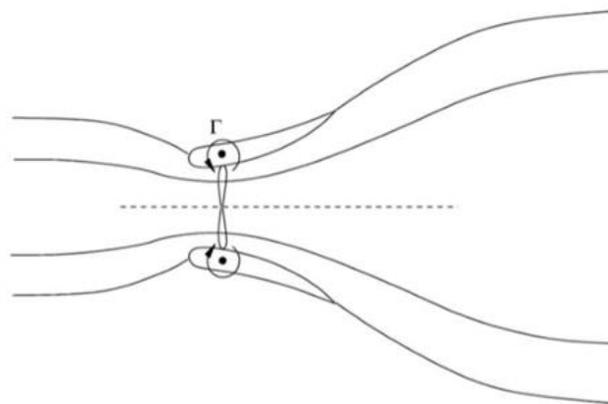
Estudos tornaram possível a utilização de turbinas eólicas encorpadas com sistemas visando captar e acelerar o vento e, conseqüentemente, a potência para produção de energia.

Como visto, a energia obtida pelo aerogerador é proporcional à área  $A$  varrida pela pá e a parcela de energia mecânica extraída é expressa pelo coeficiente de potência, que alcança seu valor máximo no Limite de Betz.

Sabe-se, entretanto, que o Limite de Betz pode ser excedido, entre outras opções, com o auxílio de dispositivos que aumentem a relação de área entre o rotor e a pá. Segundo Schaffarczyk (2014), esses dispositivos conhecidos como difusores, tubos de sucção ou concentradores de vento são construídos de modo que a área de saída do aparato seja maior que a área do escoamento.

Assim, seguindo os princípios de conservação de energia e massa de Bernoulli, há um aumento no fluxo de massa proporcional à razão  $A_{saída}/A_{entrada}$  que é possível se o escoamento segue o contorno do difusor aerodinâmico equipando a turbina. A Figura 12 mostra o esquema de funcionamento de um aerogerador dotado de um difusor.

Figura 12 – Fluxo ideal em uma turbina equipada com difusor



Fonte: HANSEN *et al.* (2008).

A linguagem presente em Hansen (2008) foi utilizada para destrinchar a teoria do difusor aerodinâmico. O autor explicou que, se o difusor tiver a forma de um perfil aerodinâmico, uma Força de Sustentação será gerada a partir do escoamento e criará anéis de vórtices, induzindo uma velocidade que aumenta o fluxo de massa no rotor de acordo com os princípios da lei de Biot-Savart. O aumento do fluxo de massa é dado por  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{U_2}{U_1} \quad (29)$$

Que relaciona a velocidade axial  $U_2$  no plano do rotor com a velocidade do vento  $U_1$ , ambas em m/s. O coeficiente de potência para uma turbina com difusor é:

$$C_{p,d} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_1^3 A} = \frac{T U_2}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 U_1 \frac{U_2}{U_1}} = C_T \varepsilon \quad (30)$$

Onde  $T$  é o empuxo, em Newtons, e  $C_T$  é introduzido como o coeficiente de empuxo. Para uma turbina eólica convencional, sem aparatos, assumiu-se o coeficiente de potência em função do coeficiente de empuxo como  $C_{p,c} = C_T(1 - a)$ . A relação entre os coeficientes de potência nos dois casos é dada por:

$$\frac{C_{p,d}}{C_{p,c}} = \frac{\varepsilon}{(1 - a)} \quad (31)$$

O fluxo de massa através de uma turbina com ( $\dot{m}_d$ ) e sem ( $\dot{m}_c$ ) difusor pode ser expresso pelas respectivas equações:

$$\frac{\dot{m}_d}{\rho U_1 A} = \frac{\rho U_2 A}{\rho U_1 A} = \varepsilon \quad (32)$$

$$\frac{\dot{m}_c}{\rho U_1 A} = \frac{\rho(1 - a)U_1 A}{\rho U_1 A} = 1 - a \quad (33)$$

A relação entre os coeficientes de potência e os fluxos de massa é:

$$\frac{C_{p,d}}{C_{p,c}} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_c} \quad (34)$$

A relação anterior indica que o aumento do coeficiente de potência para uma turbina equipada com difusor é proporcional à relação entre o fluxo de massa referente às turbinas com e sem difusor (HANSEN, 2008). O uso da mecânica dos fluidos computacional permite validar essa relação para uma dada geometria utilizada.

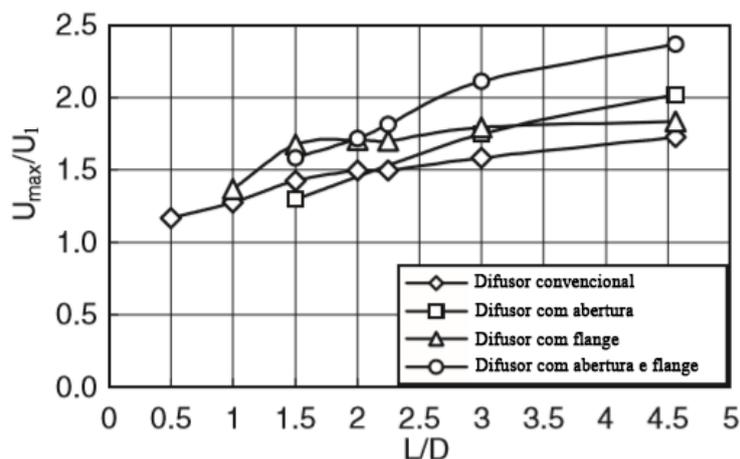
Existem diferentes tipos de conceitos de difusor. Foreman, Gilbert e Oman (1977) mostraram que o critério de design para uma pressão atmosférica adequada no plano de saída, assim como uma grande recuperação de pressão dentro do difusor com o menor custo estrutural,

depende da angulação equivalente do difusor. A angulação varia, mas deve manter um valor que garanta um desempenho adequado. Difusores com angulação muito grande podem sofrer com descolamento do ar de sua superfície, enquanto difusores muito longos, nos quais o vento é acelerado mais intensamente, possuem estruturas muito pesadas, o que desfavorece seu uso.

Para a construção desse dispositivo é feita a rotação de um perfil aerodinâmico em torno de um eixo, o que possibilita uma considerável variedade de tipos de difusores, além de outros fatores de diferenciação como comprimento e a presença de anexos tais como flanges ou aberturas adequadas.

Ohya e Karasudani (2006) apresentaram alguns desses anexos em difusores convencionais. A adição de uma entrada apropriada favorece o escoamento do vento, caracterizando o difusor *com abertura*, a qual funciona como uma proteção com uma superfície curva e lisa que circunda a entrada do difusor; quando o anexo é uma placa quadrada vertical à região exterior do modelo, tem-se o difusor *com flange*. A combinação dos dois anexos também é possível. O desempenho de acréscimo de velocidade com os três tipos de combinações de anexos bem como o de um difusor convencional está representado na Figura 13. O difusor equipado com *abertura* e *flange* apresenta o melhor resultado no acréscimo da velocidade máxima por restringir a separação do fluxo na entrada, fazendo com que o vento flua mais suavemente (OHYA; KARASUDANI, 2006).

Figura 13 – Desempenho de diferentes tipos de difusores

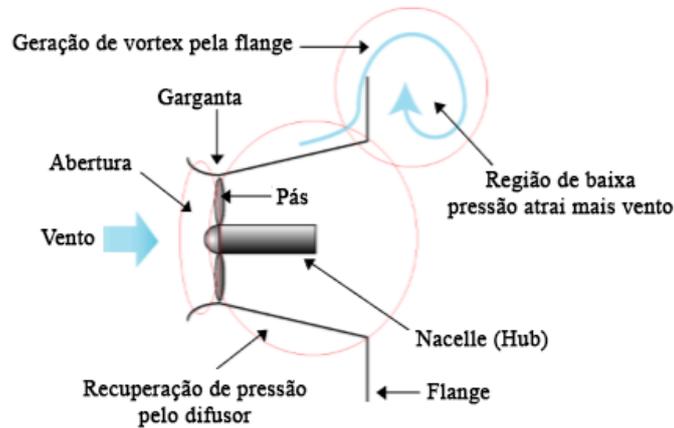


Fonte: Adaptado de OHYA e KARASUDANI (2006).

O modelo de difusor *com flange* e *abertura* tem seu funcionamento esquematizado na Figura 14. A abertura desse difusor com a presença de flanges facilita o escoamento do vento e, conseqüentemente, gera sua aceleração. A região de baixa pressão formada na saída do

difusor causa a formação de vórtices e é responsável por atrair mais massa de ar (OHYA; KARASUDANI, 2010).

Figura 14 – Escoamento por uma turbina com difusor com abertura e flange



Fonte: Adaptado de OHYA e KARASUDANI (2010).

Os testes de Ohya e Karasudani (2010) mostraram que o uso desse tipo de difusor causou um aumento no coeficiente de potência da turbina entre quatro e cinco vezes o valor encontrado para a mesma turbina convencional devido à concentração de energia. Outras vantagens identificadas foram melhorias no controle *yaw*, redução de ruídos suprimidos pela interferência da camada limite dentro do difusor e maior segurança pela proteção criada através da estrutura que rodeia as hélices. Inevitavelmente, uma das desvantagens pelo uso do difusor é o aumento do peso estrutural do sistema além de necessitar de uma maior carga de vento. Esses fatores, entre outros, ainda limitam o uso de difusores em turbinas de maior escala.

## 2.6. Impressão 3D

A técnica de Impressão 3D teve sua ascensão impulsionada pelo desenvolvimento tecnológico, pela viabilidade econômica e, principalmente, pela necessidade de aumentar a precisão de fabricação de peças das mais variadas funções, abrangendo desde brinquedos até componentes industriais.

Segundo Reisdorfer (2016), o procedimento funciona por meio da adição de camadas sobrepostas de modo sucessivo em um suporte, sendo os materiais mais comuns sendo fabricados em filamentos de plástico ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), rígido e leve com adequado balanço entre flexibilidade e resistência, ou PLA (Ácido Polilático), um polímero biodegradável derivado do ácido lático feito a partir de fontes renováveis.

O avanço tecnológico foi fundamental para a consolidação da impressão tridimensional que não é um processo essencialmente novo, mas ganhou popularidade pela amplitude de *softwares* capazes de criar modelos essencialmente fiéis à realidade para uma adequada impressão. De acordo com Silveira (2013), o passo inicial para realizar a impressão é ter um modelo digital em três dimensões que será lido pela impressora. Definindo as dimensões das camadas, há a compilação dos dados e sistematização das camadas. Existem diferentes maneiras de construir as camadas em si, variando com o tipo de impressora.

Uma das técnicas mais comuns é a *Fused Deposition Fabrication* (FMD) ou Deposição de Filamentos Fundidos. Segundo Michel e Yves (2015), esse processo consiste no depósito de camadas de um mesmo material de maneira consecutiva a fim de criar uma junta por calor ou aderência.

Uma impressora que segue esse princípio de funcionamento imprime um objeto tridimensional extrudando uma corrente de material (geralmente um termoplástico) aquecido ou derretido, de modo que seja cuidadosamente colocado em camadas consecutivas, trabalhando de cima para baixo (MICHEL; YVES, 2015). O material endurece quase que imediatamente pela temperatura que se encontra, de modo que a próxima camada possa realizar a ligação no topo, repetindo o processo várias vezes até a conclusão da peça.

Van Deursen (2013), ressaltou que esse procedimento pode levar de poucos minutos há algumas horas, variando com o tamanho e a complexidade do produto. Além disso, depois de impresso, o objeto passa por um acabamento, incluindo a remoção da base e a retirada de rebarbas. Entre outras técnicas para a impressão de peças estão a estereotilografia a laser ou *Laser-based Stereolithography* (SLA) e o processamento digital de luz ou *Digital Light Processing* (DLP).

A complexidade da impressão impacta o custo de produção e a qualidade do produto a ser fabricado, bem como no seu desempenho em testes e funcionamento em si. Hoje, a impressão 3D é amplamente usada para fabricação de peças simples para o mercado em geral e para criação de protótipos e peças para testes em menor escala, que exigem maior nível de investimentos.

## **2.7. Análise de presença a partir de sensores**

A investigação de qualquer fenômeno e seus desdobramentos passa por duas etapas: o estabelecimento de um método científico e os processos de instrumentação para validar as

medições e seus parâmetros. Enquanto o método científico traça o caminho a ser seguido para a realização de um experimento, a instrumentação é responsável pela medição dos processos a fim de determinar padrões que possam referenciar unidades às grandezas físicas ali relacionadas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Aguirre (2014) explicou que um sistema de medição é um conjunto de dispositivos, tais como sensores, circuitos, cabos, equações, etc., cujo objetivo é fornecer informação sobre o valor da grandeza física que se deseja mensurar. Desse modo, os sistemas de instrumentação medem certas variáveis com a finalidade de verificar seus valores sob condições específicas como a de monitoramento, análise e projeto de sistemas.

Entre os dispositivos de medição de variáveis físicas, destacam-se os sensores, que podem ser naturais ou industriais. Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), sensor é o elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância com uma grandeza a ser medida.

Balbinot e Brusamarello (2010) destacaram que, independentemente dessa grandeza, o sensor é um conversor de energia cujo funcionamento envolve a transferência de energia entre o objeto medido e o sensor propriamente dito. Existem várias classificações de sistemas sensores, entre elas a necessidade de fonte de alimentação, os princípios de medição e as grandezas ou referências considerados na medição em si.

Entre os diferentes tipos de sensores, destacam-se os sensores ópticos. O princípio de funcionamento do sensor óptico baseia-se na existência de um emissor e um receptor de modo que, a luz gerada pelo emissor deve atingir o receptor com intensidade suficiente para fazer com que o sensor identifique sua saída. Sabe-se, também, que qualquer corpo na natureza é uma fonte de campo eletromagnético denominado radiação térmica (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010) com estudo regulado pelas leis ópticas.

A radiação é caracterizada pelo seu comprimento de onda e dividida em várias faixas, sendo visíveis ou não à visão humana, como mostrado na Figura 15. É a partir da região de medição de infravermelho que muitos sensores são utilizados na detecção de movimento ou presença de corpos.

Figura 15 – Comprimento de ondas eletromagnéticas



Fonte: Balbinot e Brusamarello *et al* (2010).

Os sensores infravermelhos passivos não emitem luz infravermelha. Na realidade, sua função é fazer a leitura das mudanças do infravermelho do ambiente. Desse modo, quando o sensor é energizado, faz uma leitura da radiação infravermelha que retorna do ambiente que não possui movimento (INTELBRAS, 2016). Balbinot e Brusamarello (2010) ressaltam que esses instrumentos são interessantes para a medição de objetos em movimentos ou cuja posição ou condição torna sua medida difícil.

A leitura da radiação nesse tipo de sensor é feita por um fotodetector que converte a variação infravermelha em pulsos elétricos (INTERLBRAS, 2016). Desse modo, quando não há movimento no ambiente de estudo, a luz infravermelha incidente é sempre constante, gerando um sinal “zero” como saída, sendo a leitura desprezada pelo sensor. Em contrapartida, a variação da radiação na presença de uma barreira produz um pulso elétrico e o sinal é completado.

Existem vários tipos de sensores infravermelhos cuja diferença de atuação é o modo da percepção da radiação e leitura de sinal. Por sua variedade, esses sensores possuem uma gama de aplicações práticas e em diversos ramos da ciência. A partir da modulação do sinal, é possível fazer o estudo de outras grandezas físicas associadas ao movimento e temperatura.

### 3. METODOLOGIA

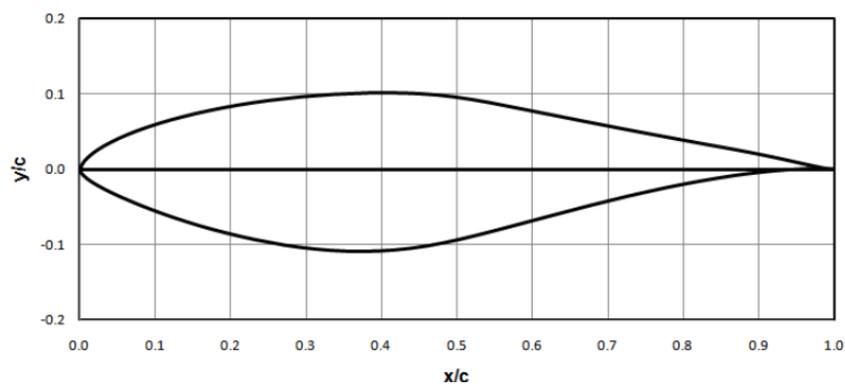
Esta seção apresenta a metodologia de construção, desde seu projeto à execução, das pás e do difusor aerodinâmico, além dos materiais utilizados para aquisição dos dados que serão analisados em seguida.

#### 3.1. Projeto e construção das pás

Como explicado por Burton (2011), as turbinas eólicas têm como princípio de funcionamento essencial a extração do máximo de energia possível. Desse modo, cada componente da turbina precisa ser otimizado para atingir esse objetivo. Assim, a escolha do melhor modelo de pá ou *perfil*, de acordo com os parâmetros aerodinâmicos estabelecidos, varia com diversos fatores, entre eles o modo de operação da turbina eólica e a distribuição do vento no local de instalação ou de realização de testes.

Para os testes em condições ideais em um laboratório com auxílio de um túnel de vento em um modelo de escala, foi escolhido o perfil NREL S809. A principal característica que favoreceu sua escolha foi sua elevada sustentação na presença de correntes livres a baixas velocidades. Dos parâmetros aerodinâmicos do perfil, destacam-se a relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto  $\frac{C_L}{C_D} = 0,748$ , velocidade de projeto  $\lambda_p = 5 \text{ m/s}$  e o ângulo de ataque de  $\alpha = 6,11^\circ$ . O perfil descrito pode ser visto na Figura 16 a seguir.

Figura 16 – Estrutura do perfil NREL S809



Fonte: Adaptado de *National Renewable Energy Laboratory* (2014).

O projeto de construção da pá de acordo com o perfil anterior foi feito seguindo modelos e procedimentos previamente estabelecidos no Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos (LAERO) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Esses

procedimentos aprofundam-se na construção da pá por meio da Teoria da Quantidade de Movimento do Elemento da Pá (BEM) mostrado no item 2.4.1. Além disso, explicam detalhadamente o cálculo de parâmetros tais como corda, fator de indução axial e tangencial, ângulo de fluxo, entre outros, por auxílio do *software* SDPA 3.0, desenvolvido por Almeida (2013). A explicação minuciosa desta parte de construção não será abordada neste trabalho.

Para a construção das pás, foram avaliadas algumas possibilidades com técnicas já tradicionais a fim de obter os melhores resultados nos ensaios. A fim de otimizar a fabricação, bem como melhorar os dados obtidos, buscou-se uma alternativa à construção usual em laboratório. Com a ascensão da tecnologia 3D, a impressão dos protótipos tornou-se uma opção viável e interessante para aumentar a precisão dos dados aferidos.

Garré *et al.* (2016) explicou que, para se produzir uma peça tridimensional por meio da técnica de impressão 3D, é necessário a produção de um arquivo com auxílio de *software* CAD, que utiliza um aplicativo de modelagem ou um *scanner* 3D para replicar o objeto. Toda a criação e parametrização do perfil NREL S809 para impressão foi feita de maneira análoga àquela com produção manual com resina, mas, neste caso, saiu da produção de um molde concreto para a geração de um arquivo no *software* AutoCAD, posteriormente lido pela impressora *Prusa i3* utilizada para gerar as peças.

Figura 17 – Pás construídas por impressão 3D



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Um modelo de pá fabricada com por impressão 3D utilizando ABS, rígido e leve, está representado na Figura 17. Pela imagem é facilmente visível a preservação de detalhes na curvatura e solidez, além da base completa e rígida de maneira propícia para fixação ao *hub*. Logo, os problemas enfrentados na construção dos itens por resina foram superados.

Peças fabricadas por impressão 3D também necessitam de acabamento, ainda que produzam sejam menos grosseiras que àquelas feitas manualmente. O procedimento de

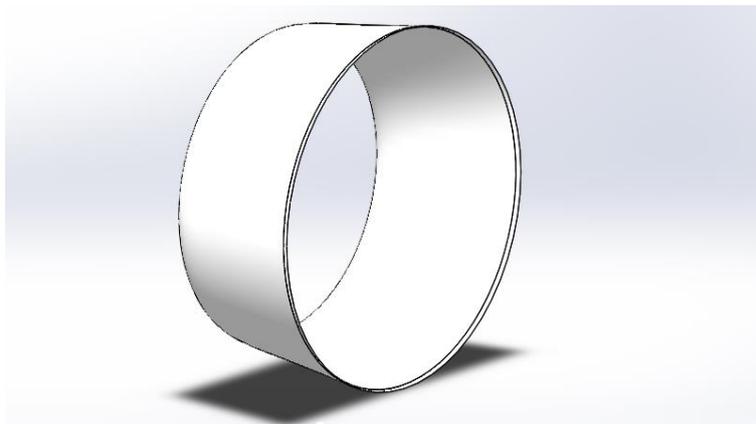
acabamento no conjunto de pás produzidas com essa técnica foi leve, apenas para reparo de pequenas imperfeições nas bordas e melhoria de design.

### 3.2. Projeto e construção do difusor

O projeto do difusor foi feito com base no perfil NACA 4412 com 20 centímetros de comprimento de corda. Esse perfil foi escolhido por apresentar alta sustentação em baixas velocidades de corrente livre, assim como o NREL S809 utilizado nas pás. A opção por este perfil também se deu pelas suas características aerodinâmicas, como o Coeficiente de Sustentação  $c_L = 1,5$  e ângulo de estol de  $14^\circ$ .

A Figura 18 mostra o projeto desenvolvido para a construção do aparato, feita no *software* SolidWorks a partir da rotação do perfil escolhido em torno de um eixo central e ângulo de ataque de  $7^\circ$ .

Figura 18 – Projeto do Difusor Aerodinâmico



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

De modo a garantir melhor precisão nos dados, o projeto foi lido pela impressora *Prusa i3* utilizada para gerar a peça. O difusor, entretanto, foi dividido em oito partes para que o produto fosse corretamente comportado pela capacidade da impressora. Após a impressão, as partes foram unidas com cola cianoacrilato e a peça passou por um acabamento até atingir a forma final apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Difusor finalizado



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Para garantir a correta aferição dos dados, foi planejado um suporte a fim de fixar o difusor afrente do sistema e, assim, cumprir corretamente seu papel de aumentar a eficiência de geração de energia. O suporte, também produzido por impressão 3D, foi pensado de modo a se adaptar à bancada de testes que será apresentada em seguida. Portanto, suas dimensões seguem esse referencial.

Os princípios aerodinâmicos foram utilizados de modo que o suporte não interferisse na aquisição dos dados, evitando zonas de turbulência, vibração e instabilidade de fluxo de vento. Como o difusor em si era mais pesado que o suporte, e este possuía aproximadamente 12% de preenchimento interno a partir da impressão, foi feito um vão em sua base, sendo preenchido com certa quantidade de massa de modelar para abaixar o centro de massa da peça e evitar tombamento. Assim, o suporte foi fixado manual e cuidadosamente com massa epóxi à extremidade inferior do bordo de ataque do difusor, atuando como um prolongamento.

Após a impressão das peças, houve o processo de acabamento para reduzir a rugosidade das superfícies. O processo iniciou com a lixagem das superfícies a fim de alinhar as arestas, seguido pelo preenchimento dos vãos e vincos eventualmente presentes com epóxi. As peças do difusor foram encaixadas e passaram por uma nova sequência de lixagens para garantir que as junções também estivessem uniformes.

O processo seguinte foi o de pintura, dividido em duas partes: a primeira, de pré pintura, envolveu o uso de desengraxante e selante para plástico, seguidos de primer, e uma nova lixagem, dessa vez com uma peça mais fina para alisamento; e a segunda, com a tinta propriamente dita, na cor azul para o difusor e o suporte e amarela para as pás. Algumas horas depois, destinadas para o tempo de cura da tinta, o acabamento foi finalizado com uma camada de verniz poliuretano.

### 3.3. Teste e aquisição de dados

Para aferir os dados de modo a analisar a atuação do difusor em diferentes velocidades, foi necessário fazer uso de um sistema de aquisição de dados desenvolvido anteriormente por estudantes do LAERO. Foi utilizada uma bancada aerodinâmica que serve de suporte para acoplar as pás aerodinâmicas e também para realizar as medidas necessárias para as análises. Como já citado, ela foi utilizada como referencial para a construção do suporte do dispositivo envolto. A Figura 20 detalha a bancada utilizada para os testes.

Figura 20 – Bancada de testes



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Pela escala utilizada neste trabalho e o tamanho das pás, a área varrida pela superfície das peças acopladas ao *hub* é reduzida. Mesmo utilizando uma força externa para dar a partida inicial no eixo, o conjunto não conseguiu sustentar a rotação durante simulações no túnel de vento. Sabendo desta limitação, a única peça devidamente utilizada da estrutura original da bancada foi o *hub*, no qual foram acopladas as pás construídas por impressão 3D, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Pás aerodinâmicas acopladas ao hub



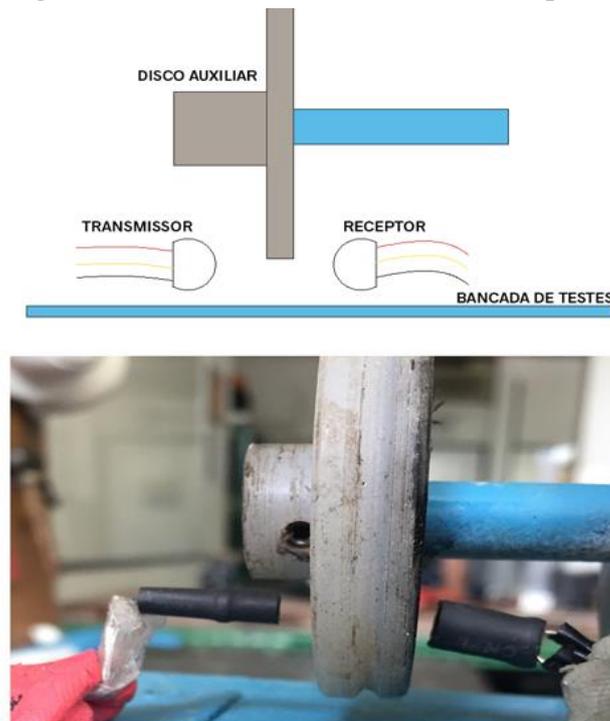
Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Preterindo a aferição direta do torque e priorizando a manutenção da escala de trabalho, buscou-se uma alternativa a fim de realizar a aquisição de dados de rotação para determinar a potência gerada pelo sistema. Entre as opções analisadas, a que se apresentou mais propícia foi a utilização de sensores infravermelhos.

Como apresentado anteriormente, o sensor infravermelho é formado por um conjunto transmissor-receptor que tem por objetivo identificar a emissão, bem como a interrupção, da faixa infravermelha do espectro de luz. A opção por esse método deu-se por não haver necessidade de contato mecânico para que o receptor reconheça a presença de um corpo.

Desse modo, o transmissor e o receptor do sensor utilizado foram posicionados linearmente entre um disco de fixação localizado imediatamente atrás do *hub* onde estavam acopladas as pás, como mostrado na Figura 22 já com o isolamento nos terminais e uma esquematização simples do sistema, que conta com um disco auxiliar de rotação. O posicionamento alinhado entre eles é um detalhe importante para a aquisição de dados neste caso, uma vez que a região entre eles será responsável por identificar a movimentação do conjunto de pás por meio da passagem do feixe de radiação.

Figura 22 – Posicionamento do sensor de presença



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A ação do fluxo de vento leva à movimentação das pás e, à medida que a luz gerada pelo emissor não chega ao receptor devido à “barreira” criada pelas pás, entende-se que houve a passagem desta peça pela região na qual está o sensor. A sequência de interrupções de sinais e, conseqüentemente, da leitura do receptor em intervalos regulares possibilita a identificação do movimento rotativo em relação ao tempo. Desse modo, a frequência e as rotações por minuto (rpm) podem ser determinados.

Para a leitura em rpm do movimento gerado, foi necessário fazer uso da programação a fim de ler os sinais gerados pelo sensor ao longo do experimento. Neste caso, a plataforma escolhida para auxiliar no controle de aquisição de dados foi o Arduino, plataforma de protipagem usualmente utilizado nessa escala de automação. O código de leitura do sistema está disponível no Anexo A.

A Figura 23 mostra a placa que foi acoplada à bancada de testes. A placa e a fiação necessária estão na região interna da bancada, coberta pela capa protetora visível na Figura 21.

No túnel de vento, os testes foram realizados para diferentes valores de velocidade. Reforçando a padronização dos dados, foi utilizado um anemômetro de hélice do modelo Minipa MDA-20 para estabelecer um intervalo de velocidade adequado aos estudos.

Figura 23 – Placa de Arduíno



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

O anemômetro de hélice tem uma estrutura que lembra um cata-vento. De maneira simplificada, o fluxo de vento gira as hélices do equipamento na direção em que sua força está atuando (INSTRUSUL, 2017) de modo que a leitura da velocidade nas hélices seja feita. O modelo utilizado foi digital, de modo que a leitura é retornada em um visor eletrônico.

A aferição dos dados ocorreu de maneira dinâmica e fluida, recebendo os valores a cada microssegundo, sendo qualquer modificação na rotação imediatamente perceptível. O objetivo do código era ler a frequência do movimento rotativo retornado pelo sensor e transformar em rotações por minuto. Com isso e um torque previamente determinado ou fixo, foi possível estabelecer a potência gerada pelo sistema. A Figura 24 mostra o sistema completo montado no interior do túnel de vento.

Figura 24 – Montagem do sistema completo



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Algumas análises foram feitas a partir dos dados obtidos pelos ensaios com a bancada de testes e o difusor. Primeiramente, foi realizada a validação dos dados garantindo a consistência dos valores retornados para todas as velocidades de estudo com o sensor infravermelho.

A segunda análise determinou o aumento da velocidade de rotação, em radianos por segundo, para o rotor sem difusor e para o conjunto rotor-difusor, especificando o aumento ou não.

Para aprofundar o entendimento da influência do difusor na otimização de turbinas eólicas, foi analisada a potência média gerada pelos sistemas em suas diferentes velocidades. De maneira simplificada e coerente com a escala utilizada e as condições de ensaio, a geração de potência é dada por:

$$P = Q\omega \quad (35)$$

Onde  $Q$  é o torque e  $\omega$  é a velocidade de rotação em rad/s. A potência adimensional média foi determinada de modo a entender o comportamento da geração de energia do sistema tendo como parâmetro os dados referentes à velocidade específica do projeto.

$$P_a = \frac{\omega_t}{\omega_p} \quad (36)$$

Desse modo, a potência adimensional é dada pela razão entre a potência gerada para o sistema à velocidade de teste ( $\omega_t$ ) em rad/s e a potência gerada pelo sistema em sua velocidade de projeto ( $\omega_p$ ) em rad/s. Considerando o torque da Equação (36) constante, pode-se desprezá-lo a partir da divisão das potências de cada situação, tornando a análise adimensional.

Com parâmetros devidamente estabelecidos e estudos de referência determinados previamente, foi possível fazer a análise de velocidade e potência para o sistema com rotor livre e para o conjunto rotor-difusor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As informações contidas nessa seção são referentes aos resultados obtidos em testes feitos com rotor com pás projetadas com velocidade específica de ponta 5.

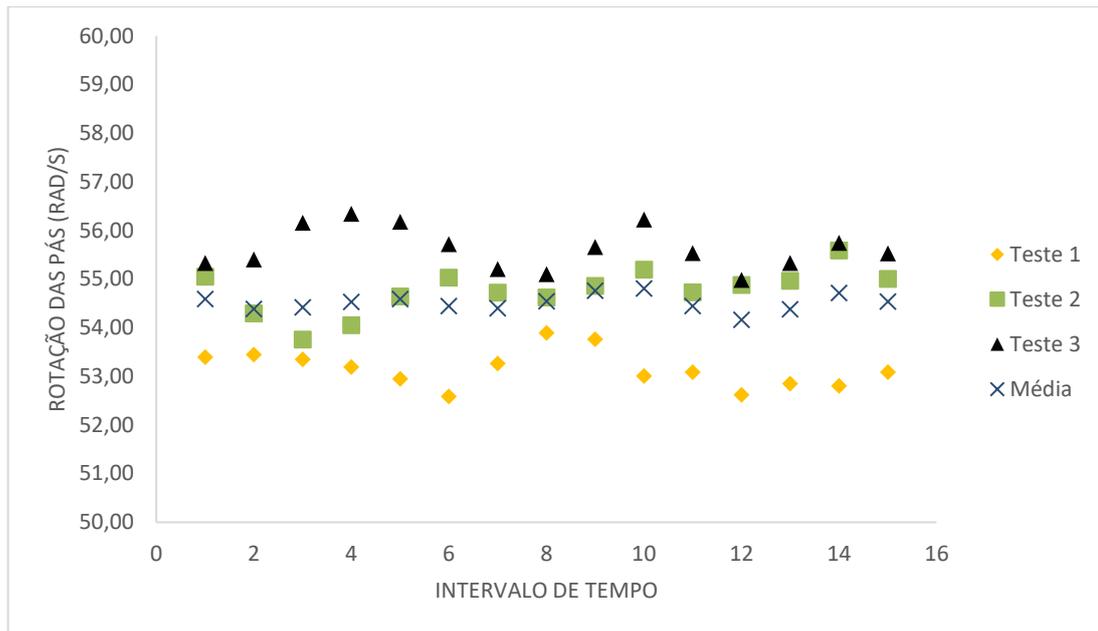
### 4.1. Validação de dados

A fim de aferir os dados utilizando um método não convencional como o escolhido, o primeiro passo de análise de dados sugerido neste trabalho é a validação dos valores obtidos.

Os testes foram feitos no túnel de vento projetado por estudantes LAERO em três velocidades diferentes: 5 m/s, 7 m/s e 10 m/s, sempre nessa sequência. A primeira foi escolhida como referencial por ser a velocidade de projeto das pás, enquanto as outras duas foram determinadas para analisar o comportamento do sistema com uma velocidade maior e mais estável, de 7 m/s, e ainda maior, no limite de funcionamento do túnel, de 10 m/s, para averiguar a ação da turbulência no rotor.

Para cada velocidade, os testes foram repetidos três vezes, cada um por um período de 1 minuto para que os dados fossem estabilizados e permitissem uma interpretação correta, e de maneira intercalada. Portanto, o primeiro teste foi feito na sequência de 5 m/s a 10 m/s e então o procedimento foi repetido mais duas vezes. Com o auxílio do anemômetro, as velocidades foram fixadas dentro de uma faixa aceitável para cada valor. Para a velocidade 5 m/s, a velocidade variou entre 4,96 m/s e 5,04 m/s, com desvio padrão de 0,0236 m/s. A leitura dos dados foi preferencialmente feita depois que a rotação e a velocidade de escoamento apresentaram-se realmente estáveis, com duração de aproximadamente 20 segundos.

A leitura do funcionamento do sistema feito pelo arduíno foi dada em microssegundos. Assim, a simulação em um minuto retornou um volume de dados muito grande. Para serem expostos de maneira mais clara, foi escolhido um intervalo de tempo de aproximadamente 25 segundos e, a cada dez dados computados, foi calculada uma média para representar o valor daquele intervalo de tempo. O Apêndice A mostra esse padrão de dados para os três testes feitos com a velocidade específica de 5 m/s.

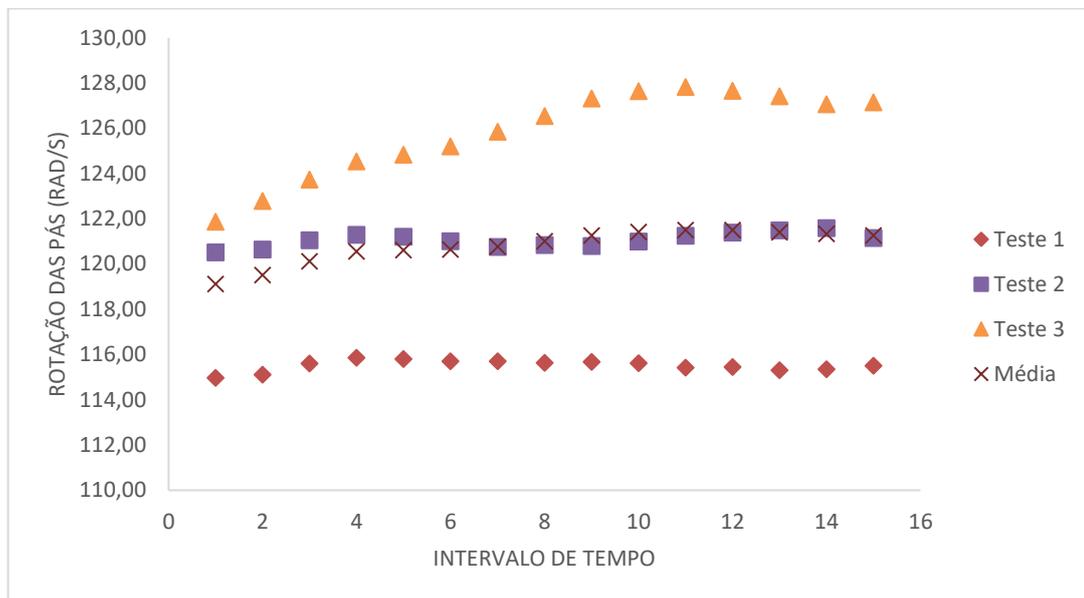
Gráfico 1 – Comparativo de dados para velocidade de projeto  $\lambda_p = 5$  m/s

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A leitura inicial foi dada em rpm e transformada em rad/s. O Gráfico 1 mostra a comparação dos dados obtidos em três momentos distintos para a velocidade de ponta da pá. Para o primeiro teste, o valor médio da velocidade atingida pelo rotor no intervalo considerado foi de 53,15 rad/s. No segundo teste, o valor médio foi de 54,76 rad/s e, no terceiro, atingiu 55,63 rad/s. No geral, o desvio padrão do intervalo considerado foi de 1,12 rad/s.

À medida que os testes foram repetidos, independentemente da velocidade estabelecida, notou-se um relativo aumento dos valores de rotação. Nesse caso, o desvio padrão foi de 1,2 rad/s, valor aceitável para a velocidade de projeto. Isso ocorre provavelmente pela instabilidade do *hub*, afetada também pelo tempo em que a bancada ficou fora de uso no laboratório; bem como a ocorrência de fadiga e desgaste na estrutura, influenciado pela ausência de eixo de fixação. Desse modo, a turbulência é mais perceptível com o decorrer do tempo. A variação da velocidade, ainda que pequena, também influencia nos dados de rotação.

Outro aspecto importante a ser destacado é que, ao analisar os dados referentes ao tempo completo de teste, de 1 minuto, o comportamento relativamente constante foi mantido, sem períodos de grande discrepância, não só para esta velocidade, como para as demais que serão apresentadas. Na simulação para a velocidade de projeto de 5 m/s, os valores ficaram em torno de 54,5 rad/s, como visto no gráfico anterior.

Gráfico 2 – Comparativo de dados para velocidade de teste  $U_t = 7$  m/s

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

O Gráfico 2 repete a comparação entre os três testes feitos, dessa vez para a velocidade de teste de 7 m/s. Neste caso, a velocidade do túnel de vento variou entre 6,94 m/s e 7,03 m/s, com desvio padrão de 0,0259 m/s, aceitável para a escala de trabalho.

Esta velocidade retornou dados visivelmente mais constantes, porque o fluxo de vento maior conseguiu melhorar a estabilidade de rotação das pás, limitada pela reduzida área de captação de energia pela escala de trabalho. A tendência das curvas é de ascensão, quando a velocidade do sistema vai aumentando até permanecer constante, e depois de estabilidade em todo o trecho.

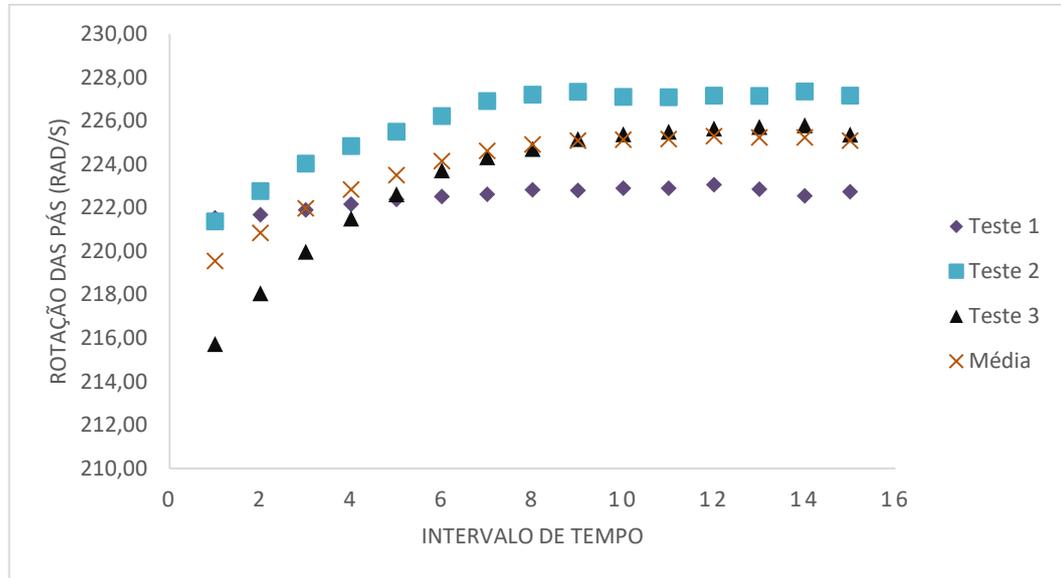
Novamente, os dados aumentaram à medida que os testes foram repetidos. O aumento, entretanto, é proporcional e a tendência dos dados permanece. No primeiro ensaio, a média de rotação foi de 115,51 rad/s. No segundo, a média foi de 121,06 rad/s e, no terceiro, o valor médio atingiu 125,82 rad/s. Nesse caso, o desvio padrão foi maior, de 4,40 rad/s, apresentando os dados mais discrepantes.

A variação maior era esperada porque o aumento da velocidade, apesar de melhorar a estabilidade dos dados ao longo do tempo, também afeta a sensibilidade do sistema, bem como a fadiga da estrutura e a turbulência em ação.

O comportamento nos três testes, entretanto, foi considerado satisfatório pelas limitações identificadas. Na simulação para a velocidade de 7 m/s, os valores ficaram em torno

de 120,80 rad/s, tendência quase idêntica à presente no segundo teste realizado, como visto no gráfico anterior com a reta roxa e marrom quase sobrepostas.

Gráfico 3 – Comparativo de dados para velocidade de teste  $U_t = 10$  m/s



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A terceira velocidade de testes foi de 10 m/s. Novamente, os testes foram feitos três vezes intercalados com as velocidades anteriores. A velocidade do túnel de vento variou entre 9,92 m/s e 9,99 m/s, com desvio padrão de 0,0217 m/s. Pela variação baixa e por conveniência pelas limitações do túnel em uso, esses valores foram utilizados como referência para 10 m/s.

O comportamento de crescimento e estabilidade depois de certo tempo foi mantido, como visto no Gráfico 3. O valor médio da velocidade atingida pelo rotor no intervalo considerado para o primeiro teste foi de 222,49 rad/s. No segundo teste, o valor médio foi de 225,95 rad/s e, no terceiro teste, o valor atingido foi de 223,28 rad/s. No geral, o desvio padrão do intervalo considerado foi de 2,56 rad/s.

A variação era esperada pela turbulência gerada pela alta velocidade. A simulação para essa teve valor médio de 223,91 rad/s, sendo o comportamento médio similar ao terceiro teste, que se mostrou o mais estável. Os valores foram considerados igualmente satisfatórios.

Tabela 1 – Visão geral de dados de rotação utilizando sensor infravermelho

<b>VELOCIDADE</b>	<b>5 m/s</b>	<b>7 m/s</b>	<b>10 m/s</b>
<b>TESTE 1</b>	53,15 rad/s	115,51 rad/s	222,49 rad/s
<b>TESTE 2</b>	54,76 rad/s	121,06 rad/s	225,95 rad/s
<b>TESTE 3</b>	55,63 rad/s	125,82 rad/s	223,28 rad/s
<b>MÉDIA</b>	54,51 rad/s	120,80 rad/s	223,91 rad/s

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A Tabela 1 elenca os valores aferidos e citados anteriormente para todas as velocidades utilizadas a fim de melhor percepção do conjunto de dados. Além das limitações do *hub*, a ausência de eixo de fixação para melhor estabilidade e a crescente fadiga com as simulações, outros fatores justificam a variação dos dados no decorrer dos testes.

Primeiramente, destaca-se as imperfeições do túnel de vento. Antes de iniciar a aferição dos dados, a frequência do túnel foi fixada e a velocidade estimada pelo anemômetro. Para a velocidade de 5 m/s, a frequência estabelecida foi de 259 Hz; em 7 m/s, a frequência foi de 362,1 Hz e a 10 m/s, esse valor foi de 510 Hz.

Para todos os ensaios realizados, esses valores de frequência foram repetidos, mas ainda assim a variação da velocidade no leitor do anemômetro estava sempre presente. A vedação do simulador de vento, bem como sua estrutura justificam essas mudanças no fluxo de ar. Portanto, as limitações dos componentes internos e externos ao sistema devem ser consideradas para interpretação, incluindo o sistema de sensoriamento.

Por fim, a manipulação dos equipamentos e suas precisões, o posicionamento do sistema e do anemômetro, as constantes aberturas do painel lateral do túnel de vento e outros procedimentos que exigem a operação humana estão fadados a variações. É necessário reforçar, portanto, que essas mudanças, mesmo que pequenas, são sensíveis para a escala do projeto e, por isso, bastante visíveis nos dados apresentados.

Tendo em vista todos os fatores descritos anteriormente, é possível considerar que as variações apresentadas pela leitura do sistema são aceitáveis e o modelo de aferição da velocidade de rotação do sistema em escala de uma turbina eólica utilizando o sensor infravermelho é bem-sucedido e capaz de retornar dados condizentes com a realidade.

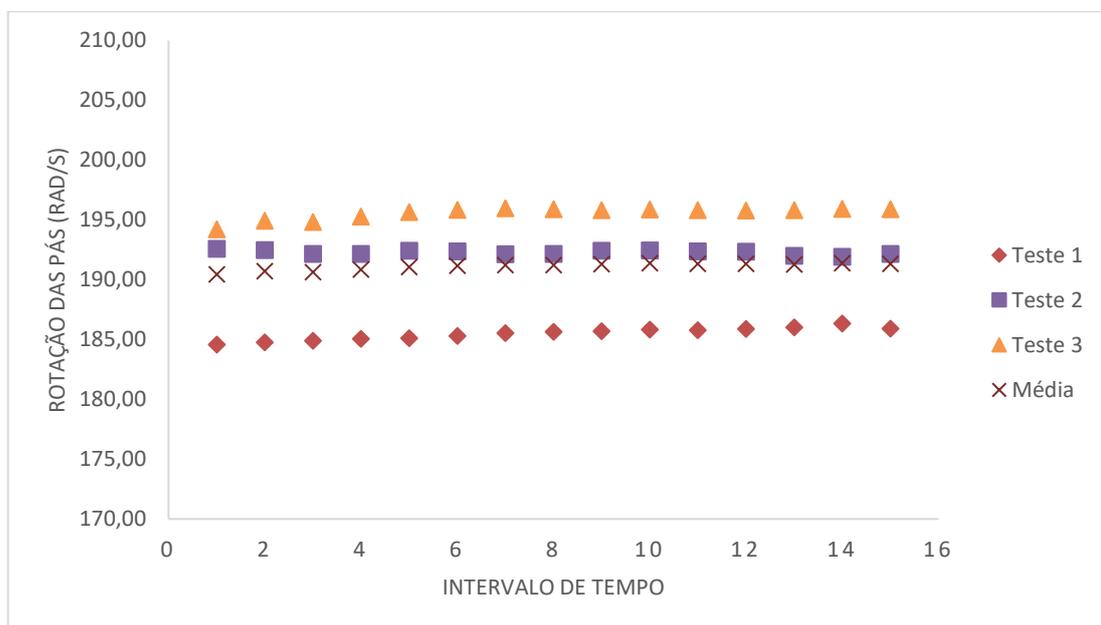
## 4.2. Rotação do sistema

A seguir, serão analisados os dados referentes às velocidades de teste já apresentadas, de 7 m/s e 10 m/s com e sem a presença do dispositivo envolto no rotor. Mesmo sabendo que as velocidades sofreram variação durante o experimento, com os respectivos desvios já apresentados e outros eventualmente calculados, elas foram consideradas constantes para simplificação de cálculos e estudos.

### 4.2.1. Velocidade de teste 7 m/s

Como apresentado, o Gráfico 2 mostrou o comportamento da rotação do sistema para um fluxo de vento com velocidade de 7 m/s, portanto, com as pás livres de quaisquer aparatos de aumento de velocidade. O Gráfico 4 faz a mesma análise, mas dessa vez para o conjunto rotor-difusor.

Gráfico 4 – Comparativo de dados para sistema com difusor  $U_t = 7$  m/s



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A velocidade de rotação assumida pelas pás na presença do difusor é nitidamente maior do que aquela encontrada no sistema sem o aparato. Os valores ao longo dos testes, mesmo que diferentes, mantiveram-se constantes ao longo do período considerado para análise.

A rotação média, de valor absoluto 191,12 rad/s mostrou-se similar àquela encontrada no segundo teste, de modo que as curvas no Gráfico 4 são bastante similares.

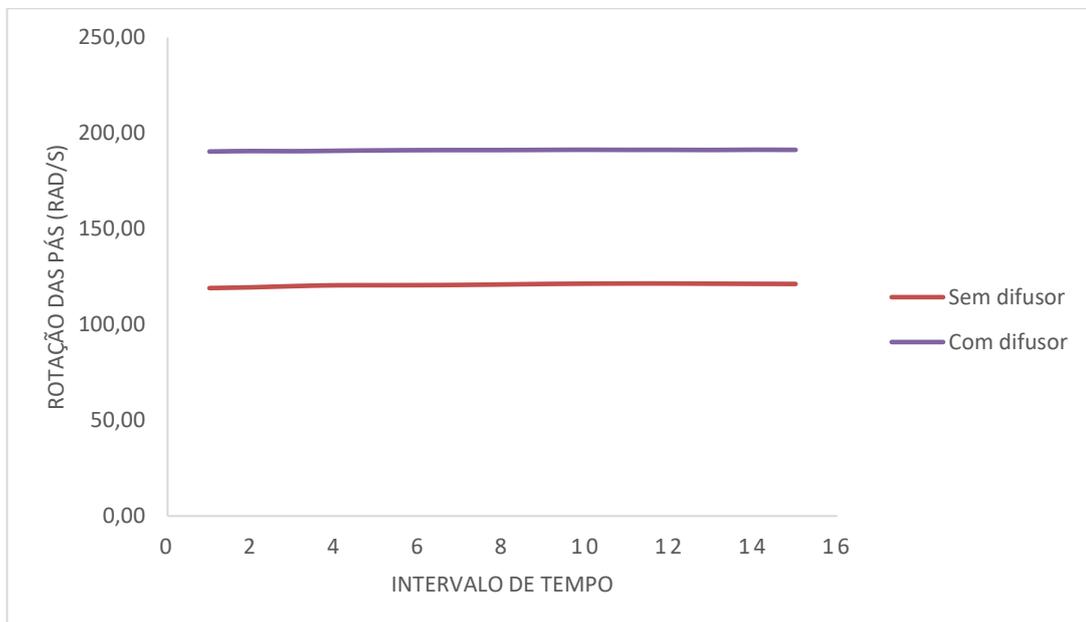
Tabela 2 – Dados médios de rotação do sistema sem e com difusor  $U_t = 7$  m/s

CONDIÇÃO	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	MÉDIA
<b>SEM DIFUSOR</b>	115,51 rad/s	121,06 rad/s	125,82 rad/s	120,80 rad/s
<b>COM DIFUSOR</b>	185,49 rad/s	192,28 rad/s	195,57 rad/s	191,12 rad/s
<b>AUMENTO</b>	1,61	1,59	1,55	1,58

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A Tabela 2 apresenta os dados médios para as curvas do gráfico anterior, seguido da média entre eles, bem como os valores já apresentados para os testes sem o difusor. Também se destaca o aumento de rotação proporcionado pela presença do aparato, chegando a 1,6 vezes o valor inicial em radianos por segundo.

Gráfico 5 – Mudança de rotação do sistema  $U_t = 7$  m/s



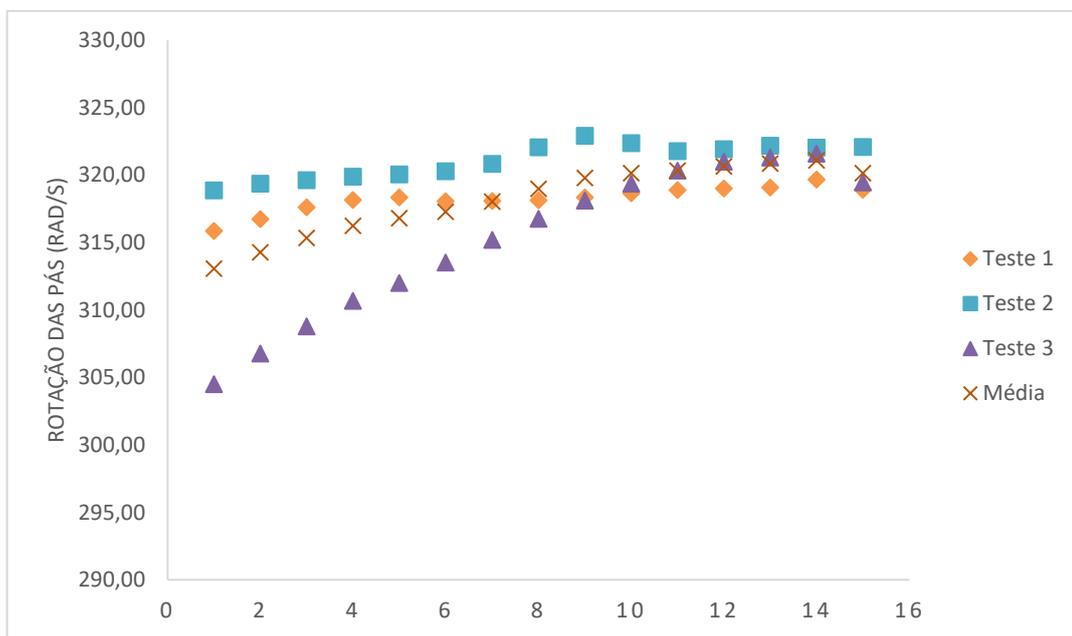
Fonte: Elaborada pela autora (2018).

O aumento da rotação e, conseqüentemente, do fluxo de massa do ar, ficam mais visíveis no Gráfico 5, cuja construção foi feita a partir dos dados médios obtidos a partir dos três testes realizados para a velocidade considerada e o período de tempo determinado. O incremento da rotação era esperado e seu valor foi considerado satisfatório para a escala de trabalho, apresentando resultados consistentes.

#### 4.2.2. Velocidade de teste 10 m/s

Como apresentado, o Gráfico 3 contém o comportamento da rotação do sistema para um fluxo de vento com velocidade de 10 m/s, também com as pás livres sofrendo a ação da velocidade imposta pelo túnel. O Gráfico 6 repete a análise, mas dessa vez para o rotor com a presença do difusor aerodinâmico.

Gráfico 6 – Comparativo de dados para sistema com difusor  $U_t = 10$  m/s



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

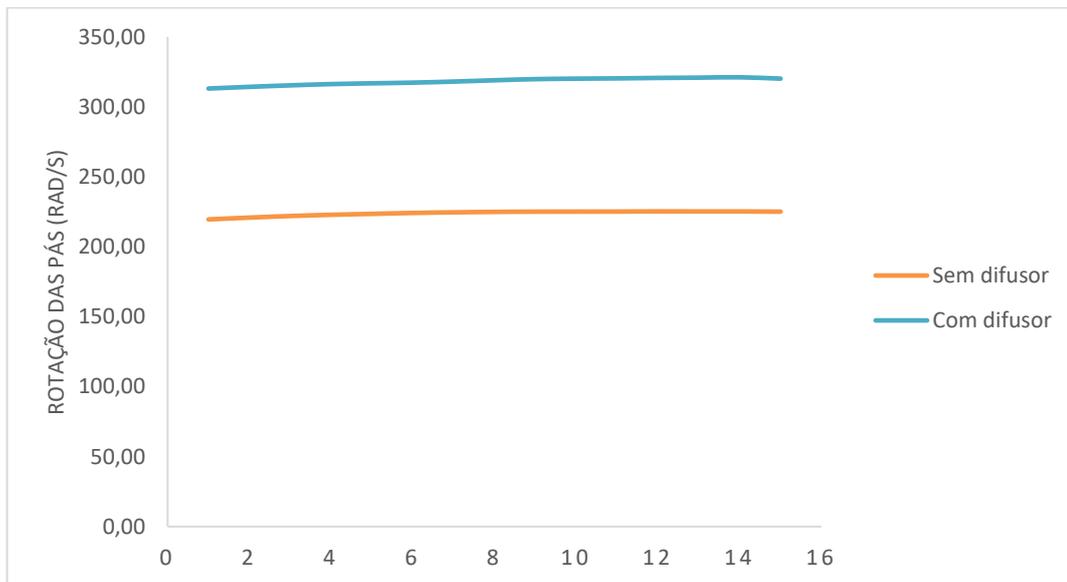
A velocidade de 10 m/s para o fluxo de vento permite mais interpretações a partir do Gráfico 6. Os dados dos três testes acabam por convergir, mas foram os que mais demoraram para estabilizar. A terceira simulação foi a que mais demorou, sendo a última feita dentre todas as propostas neste trabalho. Nesse caso, a fadiga e todos os demais problemas na aferição dos dados apontados anteriormente estavam potencializados. Mesmo assim, a rotação atingiu certo padrão depois de mais de 15 segundos de procedimento.

Tabela 3 – Dados médios de rotação do sistema sem e com difusor  $U_t = 10$  m/s

CONDIÇÃO	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	MÉDIA
<b>SEM DIFUSOR</b>	222,49 rad/s	225,95 rad/s	223,28 rad/s	223,91 rad/s
<b>COM DIFUSOR</b>	318,25 rad/s	321,10 rad/s	315,30 rad/s	318,22 rad/s
<b>AUMENTO</b>	1,43	1,42	1,41	1,42

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A Tabela 3 apresenta os dados médios de rotação para o sistema com e sem o difusor aerodinâmico. A turbulência causada pela alta velocidade também explica a dificuldade em prever ou determinar o comportamento de rotação das pás. A tendência, como visto nos casos anteriores, seria o aumento da velocidade com a repetição dos testes, o que não é encontrado aqui. Mas o incremento da velocidade entre os casos é aproximadamente o mesmo, de 1,42 vezes em média, garantindo a veracidade dos valores retornados pelo sistema de leitura.

Gráfico 7 – Mudança de rotação do sistema  $U_t = 10$  m/s

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

O Gráfico 7 auxilia na percepção do incremento da velocidade com o uso do dispositivo aerodinâmico. A construção do gráfico foi feita a partir dos valores médios dos três testes de cada situação. O incremento da rotação era esperado e seu valor foi considerado satisfatório para a escala de trabalho, apresentando resultados consistentes.

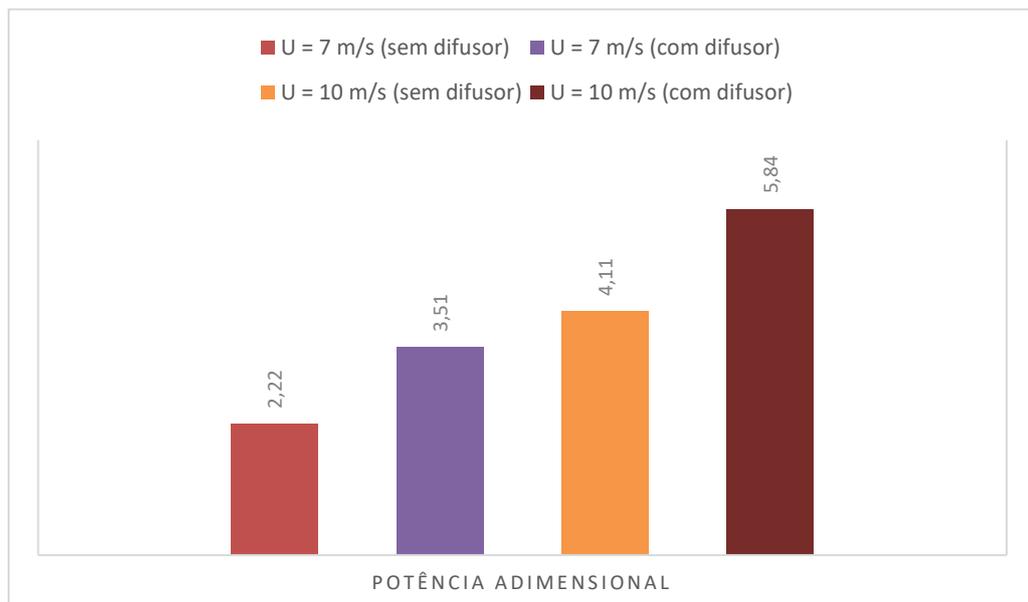
Apresentados e explicados, o Gráfico 5 e o Gráfico 7 evidenciam o sucesso do uso do difusor aerodinâmico para aumentar a velocidade de uma turbina eólica de eixo horizontal em escala.

### 4.3. Geração de Potência

A análise da potência mecânica gerada por um modelo em escala é fundamental para compreender seu funcionamento e sua capacidade de geração elétrica, levando em conta a eficiência de conversão da potência mecânica para a elétrica. Através dos dados aferidos e as médias já apresentadas para o sistema de rotação, foi calculada a potência gerada pelo sistema na presença e na ausência do difusor aerodinâmico. Nesse caso, o cálculo da potência será considerado, de maneira simplificada, como o produto entre o torque a rotação do sistema, tal como a equação (35) demonstra.

A potência gerada analisada será adimensional, considerando como parâmetro o torque para o sistema sem difusor sob ação da velocidade de ponta. Desse modo, ao dividir a potência gerada pela potência de referência, o torque é desconsiderado por ser admitido constante, de acordo com a equação (36).

Gráfico 8 – Potência Adimensional Média para os sistemas



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

O Gráfico 8 mostra a potência adimensional média para cada situação considerada: rotor livre à  $U_t = 7$  m/s, conjunto rotor-difusor à  $U_t = 7$  m/s, rotor livre à  $U_t = 10$  m/s e conjunto rotor difusor à  $U_t = 10$  m/s.

O aumento da geração de energia para os casos com a velocidade de 7 m/s e 10 m/s ocorreu na mesma proporção de aumento de velocidade disponíveis na Tabela 2 e Tabela 3. Isso se dá pela proporcionalidade existente entre a potência gerada e a velocidade de rotação do sistema, além da imposição do torque constante para todos os casos. A consideração da variação do torque iria trazer variação dos valores absolutos, mas deveria seguir um padrão e manter a consistência dos dados aferidos.

Entre os estudos já realizados na área, destacam-se os de Matsushima, Takagi e Muroyama (2006) que mostram quão impactante é a presença do difusor na geração de energia de uma turbina eólica de eixo horizontal. Apesar da escala diferente, o princípio de utilização do difusor é comprovado e vai de encontro ao constatado pelos ensaios em pequena escala. Os autores destacam que, o incremento na produção de energia para o dia inteiro chegou a ser de 1,75 vezes o constatado para o sistema sem difusor.

Todos os trabalhos utilizados como referência para este estudo, independentemente da escala de trabalho, velocidades, perfis ou angulação utilizados, mostraram que a presença do difusor aerodinâmico faz com que a velocidade de escoamento e o fluxo de massa que passa pelo rotor aumente, como constatado nas simulações aqui realizadas.

## 5. CONCLUSÃO

A modelagem das pás utilizadas no projeto foi feita com auxílio de um software, permitindo a obtenção de parâmetros para a velocidade específica de ponta  $\lambda_p = 5 \text{ m/s}$  com o perfil NREL S809. A modelagem do difusor aerodinâmico foi feita de maneira similar, com a rotação do perfil NACA 4422 e angulação de  $7^\circ$ . O conjunto de pás e o difusor foram fabricados por impressão 3D e, em seguida, passaram por um processo de acabamento a fim de evitar prejuízos nos ensaios com baixa resistência, rugosidade, atrito e vibrações excessivas. A impressão proporcionou menor preocupação com a qualidade dos componentes e de grandes influências de suas imperfeições nos resultados.

Devido à escala de trabalho, o sistema apresentou dificuldades para conseguir girar um eixo completo com motor e torquímetro para simulação de dados. Optou-se por utilizar um sistema de sensoriamento infravermelho para aferir a velocidade estabelecida pelo rotor. Com o transmissor e o receptor captando a ausência de radiação pela barreira gerada pelas pás ao passarem na região entre eles, foi possível determinar a rotação das pás em um intervalo de tempo. Os testes foram realizados em um túnel de vento e a leitura de rotação foi feita com auxílio de programação por arduíno.

Para comprovar a eficiência do método utilizado, foram traçadas curvas de comportamento da velocidade em radianos por segundo com testes realizados três vezes para cada velocidade: a de projeto, 5 m/s, e de testes a 7 m/s e 10 m/s. Para todos os valores, a leitura retornou dados consistentes, seguindo as mesmas tendências e apresentando as mesmas inconstâncias em períodos específicos, especialmente no terceiro e último teste, com o sistema desgastado por fadiga e turbulência.

Foram traçadas curvas de comparação da velocidade média de rotação atingidas sem e com o difusor aerodinâmico. Para a velocidade de teste de 7 m/s, o difusor proporcionou um aumento de velocidade de 58% em relação ao valor médio encontrado para o rotor sem nenhum aparato. Para a velocidade de teste de 10 m/s, esse aumento foi de 42%. O aumento da rotação era esperado tanto como entre as velocidades como entre o sistema equipado e não.

Foi feita a análise da potência adimensional, fazendo a relação entre a potência gerada e a potência gerada pelo sistema com a velocidade de projeto. A potência foi 3,51 vezes maior para a velocidade de 7 m/s e 5,84 vezes maior para a velocidade de 10 m/s quando comparada àquela gerada para a velocidade de projeto de 5 m/s.

Para os trabalhos futuros nesta área, pode-se sugerir:

- O projeto de pás aerodinâmicas maiores, respeitando as dimensões do túnel de vento utilizado, a fim de garantir que o rotor tenha área suficiente para conseguir girar um eixo completo com motor e torquímetro;
- O projeto de uma nova bancada de testes, em menor escala, que aceite pás aerodinâmicas de menor escala, trabalhando com eixos e motores mais leves;
- Implementar um sistema de sensores que enriqueçam a aquisição de dados, tanto na bancada de testes como no túnel de vento do laboratório;
- A construção de um difusor aerodinâmico com outra angulação, para efeito de comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. S. **Implementação Computacional para Desenvolvimento de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- ANDERSON, J. D., Jr. *Fundamentals of Aerodynamics*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (Brasil). **Boletim Anual de Geração Eólica 2017**. São Paulo: Abeeólica, 2017. 15 p.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentação de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2010.
- BRANLARD, Emmanuel. **Wind Turbine Aerodynamics and Vorticity-Based Methods: Fundamentals and Recent Applications**. Roskilde: Springer, 2017.
- BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional**. Rio de Janeiro: Epe, 2018. 62 slides, color.
- BURTON, T. *et al.* **Wind energy handbook**. 1. ed. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- CAMPOS, Maxdavid Oliveira. **Estudo comparativo de pás para aerogeradores de grande porte fabricadas em materiais compósitos reforçadas com fibra de carbono ou fibra de vidro**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- CASTRO, Rui M. G.. **Introdução à Energia Eólica**. 4. ed. Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- FOREMAN, K. M.; GILBERT, B.; OMAN, R. A.. *Diffuser Augmentation of Wind Turbines*. Solar Energy, Londres, v. 20, p.305-311, 27 set. 1977.

GARRÉ, O. S. et al. Criação de peças tridimensionais complexas a partir de impressora 3D compacta: Protótipos de um microgerador eólico. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, v. 2, n. 2, p.97-109, dez. 2016.

GRASSMANN, H. et al. A partially static turbine—first experimental results. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.1779-1785, set. 2003. Elsevier BV.

HANSEN, Martin O. L.. *Aerodynamics of Wind Turbines*. 2. ed. Londres: Earthscan, 2008.

HAU, E. *Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2. ed. Springer, 2006.

HYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi. A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology. *Energies*, [s.l.], v. 3, n. 12, p.634-649, 31 mar. 2010.

INSTRUSUL - INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO (Rio Grande do Sul)  
(Org.). **Anemômetro: como funciona**. 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/ae7f3v>>. Acesso em: 27 nov. 2018.

INTELBRAS. **Tutorial do funcionamento de sensores, cuidados e dicas de instalação de sensores para ambientes internos**. Minas Gerais, 2016.

LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. **Panorama do setor de energia eólica**. *Revista do BNDES*, n. 39, jun. 2013.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 1. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons Ltd, 2009. p. 567.

MATSUSHIMA, Toshio; TAKAGI, Shinya; MUROYAMA, Seiichi. Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 31, n. 9, p.1343-1354, jul. 2006. Elsevier BV.

MICHEL; YVES. **3D Printing Technology**. 2015. 23 f. Tese (Doutorado) - Curso de -, 3d Printing For Beginners, Luxemburgo, 2015.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (Estados Unidos) (Org.). **NREL's S809 Airfoil Graphic and Coordinates**. 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/dHCUCr>>. Acesso em: 15 set. 2018.

OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi. Development of a High-Performance Wind Turbine Equipped with a Brimmed Diffuser Shroud. *The Japan Society For Aeronautical And Space Sciences.*, v. 49, n. 163, p.18-24, 06 out. 2006.

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 3, p. 1513-1524, 2011.

PAULO, Jorge Alexandre Rente. **Construção, Desenvolvimento e Otimização de Concentrador e Difusor para Turbina Eólica**. Instituto Politécnico de Bragança, 2013.

REISDORFER, Thiago. **AS DIFERENTES TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D**. 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/HrpTEM>>. Acesso em: 18 ago. 2018.

SANCHES, Durval. **Refrigeração de Sistemas Eletrônicos**. São Paulo: Clube dos Autores, 2015. 53 p.

SCHAFFARCZYK, A. P.. *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. Springer, 2014.

SILVEIRA, Debora Priscila. **Como funciona e como surgiu a impressora 3D?** 2013. Disponível em: <<https://goo.gl/VbsZU5>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados**, [s.l.], v. 27, n. 77, p.99-116, 2013. FapUNIFESP (SciELO).

VAN DEURSEN, Felipe. **A revolução das impressoras 3D**. 2013. Revista Super Interessante. Disponível em: <<https://goo.gl/oWi4FS>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

## ANEXO A – CÓDIGO: FREQUENCIÔMETRO COM IMPULSE

```
float freq = 0;
float t1,t2;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(5,INPUT);
  Serial.print("CLEARDATA \n");
  Serial.print("LABEL,Time,RPM \n");
}

void loop() {

  t1 = pulseIn(5,HIGH);
  t2 = pulseIn(5,LOW);
  t2= t2+t1;

  freq = (1000000/t2);
  if(t2!=0){
    Serial.print("DATA,TIME,");
    Serial.println(freq*60);
  }
  else{
    Serial.print("DATA,TIME,");
    Serial.println("0");
  }
}
```

Fonte: CRUZ, Luan Alves. **Frequenciômetro com Impulse**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018.

**APÊNDICE A – DADOS PARA VELOCIDADE DE PONTA  $\lambda_p = 5$  M/S**

COMPARAÇÃO DE DADOS DE VELOCIDADE (RAD/S)				
INTERVALO	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	MÉDIA
	V = 5 m/s			
<b>1</b>	53,39	55,05	55,33	54,59
<b>2</b>	53,45	54,29	55,40	54,38
<b>3</b>	53,34	53,75	56,16	54,42
<b>4</b>	53,19	54,05	56,34	54,53
<b>5</b>	52,94	54,64	56,17	54,59
<b>6</b>	52,59	55,02	55,72	54,44
<b>7</b>	53,26	54,72	55,21	54,40
<b>8</b>	53,89	54,62	55,10	54,54
<b>9</b>	53,76	54,86	55,66	54,76
<b>10</b>	53,00	55,19	56,22	54,81
<b>11</b>	53,09	54,72	55,53	54,45
<b>12</b>	52,62	54,88	54,98	54,16
<b>13</b>	52,85	54,96	55,33	54,38
<b>14</b>	52,80	55,58	55,74	54,71
<b>15</b>	253,08	55,00	55,53	54,54
<b>MÉDIA</b>	53,15	55,05	55,63	54,51

\*Cada intervalo contém a média do somatório de dez dados aferidos pelo sistema em arduíno.