



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

FRANCISCO BRUNO MAGNO PAZ

**EXPERIMENTO EM ESCALA E ANÁLISE DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA DE
UMA TURBINA EÓLICA ACOPLADA A UM DIFUSOR**

FORTALEZA

2017

FRANCISCO BRUNO MAGNO PAZ

**EXPERIMENTO EM ESCALA E ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UMA TURBINA
ÉOLICA ACOPLADA A UM DIFUSOR**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias Renováveis do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientador (a): Prof. (a) Dra. Carla Freitas de Andrade

FORTALEZA

2017

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

- P368e Paz, Francisco Bruno Magno.
Experimento em escala e análise do coeficiente de potência de uma turbina eólica acoplada a um difusor / Francisco Bruno Magno Paz. – 2017.
66 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade.
1. Energia eólica. 2. Difusor. I. Título.

CDD 621.042

FRANCISCO BRUNO MAGNO PAZ

**EXPERIMENTO EM ESCALA E ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UMA TURBINA
ÉOLICA ACOPLADA A UM DIFUSOR**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias Renováveis do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

A Deus.

Aos meus pais, Eliesse e Francisco.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por me dar forças para sempre seguir em frente.

Aos meus pais Francisco Francisco José Paz e Francisca Eliesse Magno de Souza por servirem de exemplo para minha formação como pessoa, me aconselhando, educando, compreendendo e auxiliando em tudo, além de me apoiarem em todas as decisões da minha vida. Sou inexplicavelmente grato por todo amor, carinho e dedicação prestados a mim.

À Universidade Federal do Ceará, entidade que me permitiu adquirir amplos conhecimentos e me ajudou, de maneira imprescindível, na minha formação como Engenheiro.

À professora Carla Freitas de Andrade excelente orientação.

A todos os professores, pelo amplo conhecimento e ricas experiências transmitidas ao longo desses anos de graduação.

A todos os colegas de faculdade, principalmente aos meus grandes amigos (em ordem alfabética): Adriany, Alysson, Antônio Nilson, Ícaro, Bruno Nogueira, David, Hydra, Ícaro José, Josiane, Paulo Estêvão e Thiago Taketaro, Luis Inácio, Renê.

E principalmente a todo mundo da minha família que sempre acreditaram em mim mesmo quando eu não acreditava. São eles, principalmente: Francisco, Eliesse, Letícia, Denys e Regina.

RESUMO

Turbinas eólicas de eixo horizontal tem um rendimento relativamente baixo (45%). Porém pode-se aumentar esse valor equipando-a com um difusor aerodinâmico. Um difusor é um equipamento que induz um fluxo maior de massa de ar devido a uma diferença de pressão que ele causa entre entrada e a saída da turbina. Por esse motivo, esse trabalho visou à construção de um difusor aerodinâmico para verificar o aumento do rendimento de uma turbina eólica em escala. Para tanto foi utilizado um rotor com pás de 17,5 cm com velocidade específica de ponta valendo 7 e perfil aerodinâmico NREL S809. Já o difusor foi construído com perfis NACA 4412, com ângulo de ataque igual a 4 °. Os testes foram realizados no Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos (LAERO) da Universidade Federal do Ceará (UFC) de onde foram coletados dados de velocidade de escoamento livre, velocidade de escoamento com o rotor em operação, assim como medidas de velocidade angular e torque gerado pelas pás, com a finalidade de conhecer as curvas do coeficiente de potencia do rotor e torque do conjunto rotor – difusor e compará-las com as curvas do rotor sem o difusor. Houve um acréscimo do Coeficiente de Potência para três casos de velocidade específica ($\lambda = 5,48$, $\lambda = 5,87$ e $\lambda = 6,84$), sendo observado um aumento máximo de 11,11 % para $\lambda = 5,48$.

Palavras-chave: turbina eólica. Pás. Difusor. Potência.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Moinho de vento de eixo vertical, Afeganistão.....	17
Figura 2 - Moinho de Moinho de vento de eixo horizontal holandês.....	18
Figura 3 - Turbina eólica de eixo vertical.....	24
Figura 4 - Exemplos de turbina de eixo vertical.....	25
Figura 5 - Turbina eólica de eixo Horizontal.....	26
Figura 6 - Posição do rotor em relação à torre.....	27
Figura 7 - Tubo de corrente de uma turbina eólica.....	29
Figura 8 - Modelo do disco atuador.....	30
Figura 9 - Esteira de rotação do ar gerada pelo rotação do rotor.....	35
Figura 10 - Corte transversal de uma asa.....	37
Figura 11 - Parâmetros de um perfil aerodinâmico.....	38
Figura 12 - Variação do coeficiente de sustentação com o ângulo de ataque.....	39
Figura 13 - Fluxo ideal através da turbina em um difusor.....	40
Figura 14 - Perfil aerodinâmico (S809) utilizado na pá.....	42
Figura 15 - Projeto das pás para $\lambda = 7$	42
Figura 16 – Foto Conjunto das pás.....	44
Figura 17 - perfil NACA 4412.....	44
Figura 18 - Perfis de compensado.....	45
Figura 19 - Aro do difusor.....	45
Figura 20 - Preenchimento dos perfis.....	46
Figura 21 - Molde de EVA preenchido com poliuretano.....	46
Figura 22 - Processo de retirada do EVA com poliuretano.....	47
Figura 23 - Difusor preenchido com poliuretano e lixado.....	48
Figura 24 – Foto do Difusor com ângulo de ataque 4°	48
Figura 25 – Foto do Transdutor de Torque.....	49
Figura 26 – Foto do anemômetro.....	50
Figura 27 - Interface do programa controle de rotação.....	51
Figura 28 – Foto da placa de circuito arduino (Rotação).....	52
Figura 29 – Foto da placa de circuito arduino (Torquímetro).....	53
Figura 30 - Interface do programa torquímetro.....	54
Figura 31 – Foto do suporte do Difusor.....	61
Figura 32 – Foto do conjunto rotor-difusor.....	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da capacidade instalada da fonte eólica no Brasil (MW).....	19
Gráfico 2 – Coeficiente máximo teórico para diversos valores de λ	36
Gráfico 3 - Afilamentos das pás para $\lambda = 7$	43
Gráfico 4 - Torção das pás para $\lambda = 7$	43
Gráfico 5 – Torque dos mancais.....	56
Gráfico 6 - Torque médio resultante das pás	59
Gráfico 7 - Coeficiente de Potência	60
Gráfico 8 - Razão de Torque do rotor com e sem o difusor.....	62
Gráfico 9 - Razão de Coeficiente de Potência do rotor com e sem o difusor	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade Instalada de energia eólica (MW).....	20
Tabela 2 - Parâmetros medidos dos mancais de $\lambda=7$	56
Tabela 3 - Parâmetros medidos do conjunto de pás de $\lambda=7$	58
Tabela 4 - Parâmetros medidos do conjunto pás-difusor de $\lambda=7$	62
Tabela 5 - Aumento Percentual do C_p	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DAWT	<i>Diffuser Augmented Wind Turbine</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbinas eólicas de eixo vertical
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SIMBOLOS

a	Fator de indução axial
A_{∞}	Área do cone de expansão a montante do disco
A_d	Área do disco do rotor
A_w	Área do cone de expansão a jusante do rotor
C_d	Coefficiente de arrasto aerodinâmico
C_l	Coefficiente de sustentação aerodinâmica
C_p	Coefficiente de Potência
C_T	Coefficiente de empuxo
$C_{p,d}$	Coefficiente de Potência com um difusor
$C_{p,c}$	Coefficiente de Potência convencional
\dot{m}_d	Vazão massica de uma turbina com difusor
\dot{m}_c	Vazão massica de uma turbina convencional
\dot{m}	Vazão massica
P	Potência
p_d^+	Pressão máxima no plano do disco
p_w	Pressão a jusante do disco
p_{∞}	Pressão na zona não afetada pelo disco
p_d^-	Pressão mínima no plano disco
Q	Torque
R	Raio do rotor
μ	Proporção do raio da pá

U_d	Velocidade do escoamento no disco
U_w	Velocidade do escoamento a jusante do disco
U_∞	Velocidade do ar a montante do disco
α	Ângulo de ataque
β	Ângulo de torção da pá
λ	Razão da velocidade de ponta (TSR)
ρ	Densidade do ar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. JUSTIFICATIVA.....	22
3. OBJETIVOS GERAL.....	23
3.1 Obejetivos Específicos.....	23
4. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	24
4.1 Turbinas eólicas de eixo vertical.....	24
4.2 Turbinas eólicas de eixo horizontal	26
4.3 Disco atuador e o limite de Betz.....	29
4.4 Esteira rotativa.....	35
4.5 Aerodinâmica e caracteísticas de um aerofólio.....	37
4.6 Difusor.....	40
5. METODOLOGIA	42
5.1 Características das pás.....	42
5.2 Construção do difusor	44
5.3 Instrumentos utilizados para os testes.....	49
<i>5.3.1 Transdutor de torque.....</i>	<i>49</i>
<i>5.3.2 Anemômetro.....</i>	<i>50</i>
<i>5.3.3 Motor elétrico.....</i>	<i>50</i>
<i>5.3.4 Sistema de controle de rotação.....</i>	<i>51</i>
5.4 Metodologia do experimento.....	54
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
6.1 Dados preliminares.....	55
6.2 Torque do mancal.....	55
6.3 Torque das pás.....	57
6.4 Coeficiente de Potência do sistema.....	59
6.5 Torque conjunto rotor - difusor.....	60
6.6 Coeficiente de potência conjunto rotor - difusor.....	63
7. CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

O aumento no padrão de vida detectado nos últimos anos em todo o planeta é acompanhado pelo aumento do consumo de energia e, conseqüentemente, das emissões provenientes das fontes energéticas convencionais (combustíveis fósseis, principalmente). Diante da necessidade cada vez mais gritante por novas fontes que não agridam o meio ambiente e que não contribuam para o aquecimento global, a energia eólica tem-se revelado como uma das mais promissoras alternativas para esse problema. Usada há milhares de anos na moagem de grãos, bombeamento de água, dentre outras atividades, este tipo de energia é considerada limpa, pois não possui emissões de gases que afetem o meio ambiente, renovável, inesgotável, além de ser uma tecnologia que apresenta um alto grau de desenvolvimento e confiabilidade (PEREIRA, 2004).

Acredita-se que os primeiros moinhos de vento de eixo vertical foram produzidos ainda na Idade Antiga, provavelmente, por países do oriente como China e a antiga Pérsia. Tal mecanismo foi construído com o intuito de ser usado para a irrigação das plantações nas planícies mesopotâmicas por volta do ano de 1700 a.C. No entanto, a primeira máquina deste tipo com informações confiáveis a ser registrada é datada de 644 a.C. na região onde atualmente localiza-se o Afeganistão (HAU, 2006).

A Figura 1 mostra um moinho desse tipo, que devido à falta de conhecimento e experiência das civilizações eram bem rudimentares, feito basicamente de madeira e tela.

Figura 1 – Moinho de vento de eixo vertical, Afeganistão



Fonte: HAU (2006).

Os moinhos de vento de eixo horizontal, que eram movidos por força de sustentação (Figura 2), foram provavelmente introduzidos na Europa por meio das cruzadas, em torno do século XI. Países como a Holanda e Inglaterra apresentaram grande evolução técnica no desenvolvimento e aplicação desses novos moinhos. Estima-se que durante o século XV existiam mais de 200.000 deles em operação na Europa, mostrando assim a importância econômica do vento para essas nações (HAU, 2006).

Figura 2 – Moinho de vento de eixo horizontal holandês



Fonte: HAU (2006).

Tais moinhos ainda não eram capazes de converter a energias dos ventos em energia elétrica. Esse fato só foi possível, segundo relatos históricos, por volta do final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brush ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, um cata-vento que fornecia 12KW em corrente contínua para o carregamento de baterias as quais forneciam energia para 350 lâmpadas incandescentes (Scientific American 1890, apud Shepherd,1994). A partir de então, novos projetos de aerogeradores cada vez mais potentes foram sugeridos. Porém, devido à concorrência com outras tecnologias, como por exemplo, a queima de combustíveis fósseis, que devido ao seu baixo custo e novas descobertas de reservas, esses projetos foram deixados de lado, servindo apenas para estudos científicos.

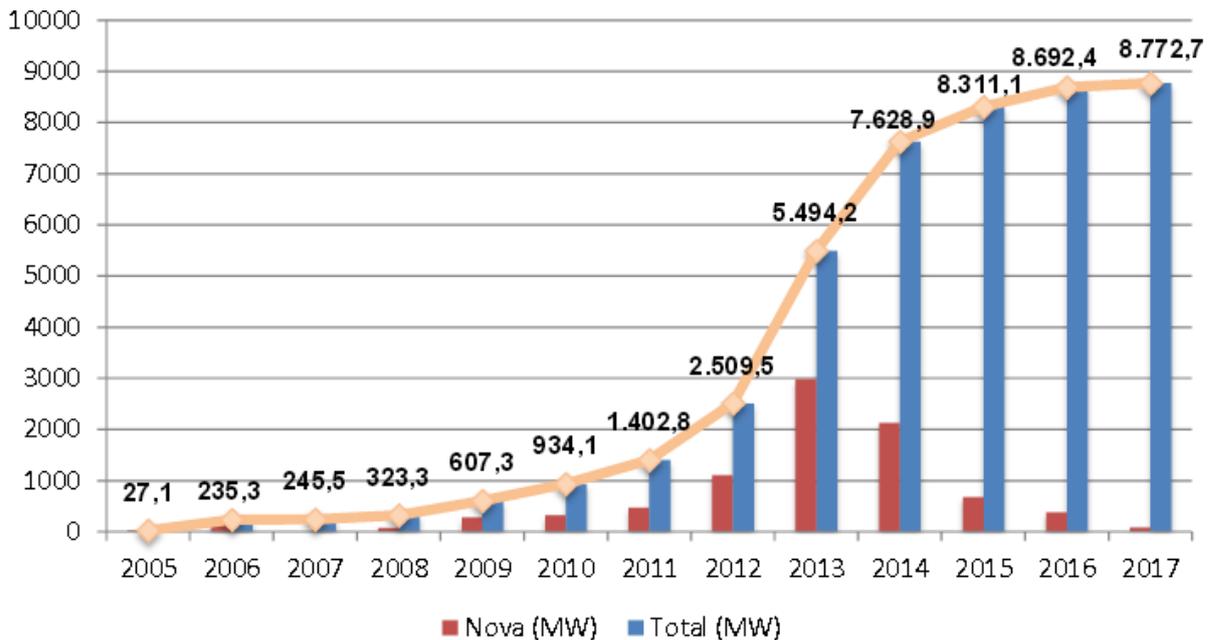
No entanto, com a crise internacional do petróleo, na década de 70, a busca por fontes de energias renováveis se intensificou no mundo, fazendo com que as autoridades voltasse novamente a investir em projetos de energia eólica como uma solução para tentar superar a crise energética. Desde então as pesquisas referentes ao estudo e desenvolvimento da energia eólica passaram por grandes períodos de desenvolvimento.

Desde o final do século XIX, a energia dos ventos vem sendo utilizada para geração de eletricidade, havendo então investimentos suficientes para viabilizar o seu desenvolvimento e a aplicação de equipamentos em escala comercial (PEREIRA, 2004).

A energia provinda do vento apresenta também como vantagens associadas à sua utilização, menores custos operacionais e de manutenção, quando comparada com as fontes convencionais de conversão de energia elétrica (ANEEL, 2002). Segundo o Fórum Capixaba de Mudanças Climáticas e Uso Racional da Água (FCMC, 2011), a energia eólica pode garantir 10% das necessidades mundiais de eletricidade até 2020, criar 1,7 milhões de novos empregos e reduzir a emissão global de dióxido de carbono na atmosfera em mais de 10 bilhões de toneladas.

No Brasil, a capacidade de instalação da fonte eólica vem crescendo nos últimos anos, tal crescimento é verificado no gráfico 1 que faz projeções para 2017.

Gráfico 1 - Evolução da capacidade instalada da fonte eólica no Brasil (MW)



Fonte: Aneel/ABEEólica, (2015).

O ano de 2014 trouxe um novo recorde em instalações de energia eólica: mais de 50 gigawatt de capacidade foram adicionados durante o ano de 2014, elevando a capacidade total de energia eólica perto de 370 Gigawatt (Tabela 1). O volume de mercado para nova capacidade eólica foi de 40% maior do que em 2013, e significativamente maior que no ano anterior recorde de 2012 quando 44,6 GW foram instalados (WWEA,2015).

Tabela 1 - Capacidade Instalada de energia eólica (MW)

Posição	País	Capacidade Total em 2014 (MW)	Capacidade adicionada em 2014 (MW)	Taxa de aumento em 2014 (%)
1	China	114.763	23.350	25,7
2	Estados Unidos	65.879	4.854	7,8
3	Alemanha	40.468	5.808	16,8
4	Espanha	22.987	27,5	0,1
5	Índia	22.465	2.315,1	11,5
6	Reino Unido	11.998	1.467	13,9
7	Canadá	9.694	1871	25,9
8	França	9.296	1.042	12,6
9	Itália	8.663	107,5	1,3
10	Brasil	6.182	2.783	81,9
11	Suécia	5.425	1.050	21,4
12	Dinamarca	4.850	78	1,6
Resto do Mundo		47.300	7000	16
Total		370.000	51.753	16,2

Fonte: WWEA (2015)

Portanto, o Brasil vem destacando cada vez mais no cenário mundial como um dos maiores países com potencia eólica instalada, passando de 2509,5 MW em 2012, para 6182 MW em 2014, ou seja, um aumento de aproximadamente de 150% em dois anos de potência instalada.

Esse crescimento da capacidade de instalação de energia eólica em muitos países do mundo se deve, principalmente, às turbinas de eixo horizontal (TEEH), que são as mais utilizadas atualmente devido a sua maior eficiência com relação às turbinas de eixo vertical (TEEV). Porém, a eficiência das TEEH's é limitada, de acordo com a literatura, pelo limite de Betz. Este afirma que a turbina consegue extrair, no máximo, 59,3% da energia disponível no vento. Este limite pode ser ultrapassado, teoricamente, colocando um invólucro, que é também chamado de difusor, ao redor da turbina. Sua função é acelerar o vento antes de sua passagem pelas hélices. Como a energia disponível no vento é proporcional ao cubo da velocidade, pequenos aumentos na velocidade do vento podem aumentar a energia extraída (ANIKET, et al, 2013).

O presente trabalho visou construir e testar um invólucro (difusor) em volta de pás de 17,5 mm utilizando o perfil NREL S809 construídas por MACÊDO (2016) utilizando o teorema da quantidade de movimento do elemento de pá (BEM). Os perfis utilizados no difusor são do tipo NACA 4412 com 20 cm de corda e ângulo de ataque de 4°.

2. JUSTIFICATIVA

A sociedade em geral, sempre vem buscando práticas ambientais economicamente sustentáveis para garantir a qualidade de vida da população, ou seja, está cada vez mais interessada por fontes de energias renováveis para suprir suas demandas energéticas e também para diminuir as emissões de gases poluentes pela queima de combustíveis fósseis. Nesse contexto, a energia eólica vem se destacando cada vez mais por ser uma energia ambientalmente limpa, e apresentar, pelo menos, três fatores simultâneos que justificam uma atenção especial, visando a efetivá-la como fonte complementar à geração hídrica no parque gerador brasileiro: (i) o vasto potencial eólico nacional; (ii) sua distribuição geográfica se estende, também, pelo interior do país em áreas socialmente carentes; (iii) a possibilidade de complementação da energia produzida pela geração eólica com as hidrelétricas (EPE, 2009).

Portanto, visando aprimorar ainda mais o conhecimento sobre a energia eólica e, conseqüentemente, contribuir para torná-la cada vez mais como uma fonte complementar à geração de energia hidrelétrica, substituindo assim as fontes de energias poluentes, que esse trabalho visa à construção de um difusor para aumentar o rendimento de uma turbina eólica em escala reduzida. Além disso, é de suma importância buscar novas tecnologias que melhore ainda mais a eficiência de uma turbina eólica.

3. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo comparativo entre o modelo de uma turbina eólica de pequeno porte com 17,5 cm de raio e λ (razão de velocidade na ponta da pá) 7 equipada com difusor (DAWT) e uma turbina eólica de pequeno porte com mesmo raio e λ sem difusor.

3.1 Objetivos Específicos

- Construir um difusor com perfil aerodinâmico de ângulo de ataque igual a 4° .
- Medir o torque e coeficiente de potencia do rotor sem difusor.
- Medir o torque e coeficiente de potencia do rotor equipado com difusor
- Traçar um gráfico comparativo de torque x rotação para o rotor sem e com o difusor.
- Traçar um gráfico comparativo de coeficiente de potência x velocidade específica para o rotor sem e com o difusor.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As turbinas eólicas, ou aerogeradores, são equipamentos capazes de converter parte da energia cinética dos ventos e convertê-la em energia mecânica, que, acopladas a um gerador, transforma essa energia mecânica em energia elétrica.

O rotor de uma turbina eólica é um componente que capta a energia cinética do vento e transforma em energia mecânica de rotação. Com relação à posição relativa do eixo do rotor, e a superfície terrestre, as turbinas eólicas podem ser classificadas de dois tipos:

- Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV).
- Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH).

4.1 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

As turbinas eólicas de eixo vertical possui seu eixo de rotação disposto na vertical, por esse motivo, é perpendicular à direção do vento (Figura 3). Esse tipo de turbina tem pouca capacidade de produção e, portanto, são utilizadas em aplicações de baixa potência, como por exemplo, o carregamento de bateria em áreas onde a rede elétrica não chega e também podem ser utilizadas como um sistema mecânico para bombeamento de água (JHA,2011).

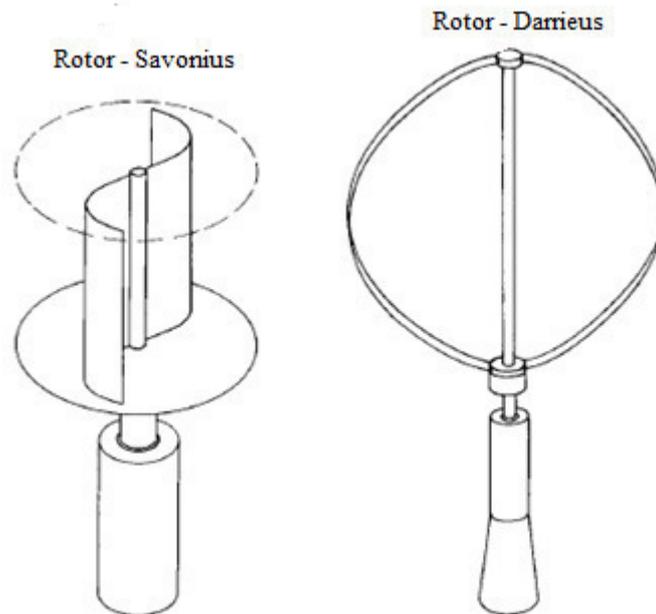
Figura 3 – Turbina eólica de eixo vertical



Fonte: Briggs, (2013)

Tais turbinas funcionam pelo efeito de resistência aerodinâmica, tal como as turbinas de Savonius, e também podem funcionar por efeito de sustentação, tal como as turbinas de Darrieus (HAU,2006). A Figura 4 mostra esses dois tipos.

Figura 4 – Exemplos de turbina de eixo vertical



Fonte: adaptado de Hau, (2006).

As principais vantagens das TEEV's é poder funcionar em qualquer direção do vento, não necessitando de mecanismos de orientação, o que gera uma redução do custo dessas turbinas. Além disso, as TEEV's permitem que o acoplamento entre o rotor e o gerador seja feito ao nível do solo. Outra vantagem desse tipo de turbina é que as pás podem ser construídas com perfis aerodinâmicos de cordas constantes e sem torção, tornando o projeto mais fácil e viável economicamente (MANWELL *et al*, 2009).

Já as principais desvantagens dessas turbinas é sua incapacidade de alcançarem velocidades maiores que a dos ventos (com exceção das de Darrieus), o que restringe sua utilização como força motriz em sistemas mecânicos, e a pouca potência por unidade de área de captação do vento (ALMEIDA, 2013). Além disso, possuem baixa potência devido ao fato de operarem com perfis simétricos, que em comparação aos perfis cambados são menos eficientes (TANGLER, 2000).

4.2 Turbinas eólicas de eixo horizontal

As turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH's) possuem o eixo de rotação paralelo à superfície e são predominantemente movidas por força de sustentação (Figura 5). São as mais utilizadas atualmente, pois são capazes de desenvolver maior força e potência por unidade de área de captação do vento. Esse tipo de turbina consegue atingir velocidades mais altas que a dos ventos incidentes, sendo, portanto, viável para aplicações que necessitem de altas velocidades de rotação, como a produção de energia elétrica (MANWELL *et al*, 2009).

Para Lopes (2011), diante da grande quantidade de projetos de aerogeradores até então propostos, as TEEH's ainda são a forma mais eficiente, técnica e econômica.

Pelo o fato desse tipo de turbina funcionar, predominantemente, por efeito de sustentação aerodinâmica, são dependentes da geometria das pás e do ângulo de ataque (ângulo entre a velocidade relativa do vento e o eixo do rotor), o que garante um melhor desempenho. Além disso, esses rotores possuem um mecanismo chamado *yaw*, que é um sistema de controle usado para manter essas turbinas (rotores) na direção perpendicular do vento. Outros controles encontrados nas TEEH's são o *por stol* e *por pich*, que são utilizados quando a produção de potência excede o valor de projeto nominal.

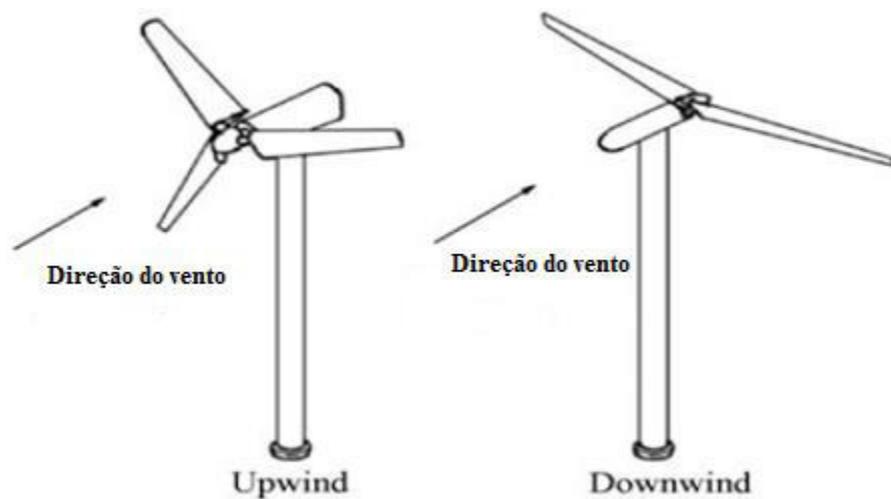
Figura 5 – Turbina de eixo horizontal



Fonte: adaptado de DUTRA, (2009).

Quanto à posição das pás em relação a torre, as TEEH's são classificadas de duas categorias (Figura 6): a jusante (*downwind*) ou a montante (*upwind*). A configuração a montante permite obter um sistema que tende a manter o eixo do rotor sempre perpendicular à direção do vento e reduzir o momento de deflexão. Enquanto que os aerogeradores com o rotor a jusante, possuem a desvantagem de estarem expostos à esteira produzida pela torre, também conhecido como efeito de sombra da torre, provocando fadiga, perda de potência e ruído, (MANWELL *et al*,2009).

Figura 6 - Posição do rotor em relação à torre



Fonte: adaptado de MANWELL *et al*, (2006).

As TEEH's tem a vantagem de poderem captar vento em grandes alturas, o que implica em um maior aproveitamento de energia, pois quanto maior for a altura maior será a velocidade do vento. Em contrapartida, uma maior velocidade gera maior turbulência que associado a um regime não constante de velocidade dos ventos pode ocasionar sérios riscos a estrutura. É por isso, que tais turbinas possuem mecanismo de controle que as permitem operar em maior tempo possível com valores ótimos de projetos.

O sistema de controle mais utilizado nesses tipos de aerogeradores é o de *pitch*, que faz a pá girar em seu eixo longitudinal de forma a reduzir o ângulo de ataque, diminuindo conseqüentemente, sua velocidade (DUTRA, 2009). Isso é fundamental para diminuir o risco de acidentes, principalmente, quando as turbinas estão operando com velocidade que ultrapassa a de projeto.

Quanto à análise do rendimento em função da quantidade de pás, os rotores podem ser constituídos de uma, duas, três e até de múltiplas pás. Os rotores com configuração de três pás são os mais utilizados nos projetos de turbinas eólicas com rotor posicionado a montante da torre. Entretanto, o número de pás adotado depende de uma série de fatores como a sua finalidade, estrutura do suporte, o regime da velocidade dos ventos na região a que se destina, além de outros (MANWELL *et al*, 2009).

Por sua vez, as pás de uma TEEH's são projetadas usando famílias de perfis alares, e elas são de fundamental importância para a produção de energia. Os perfis mais utilizados nas turbinas eólicas têm sido as séries NACA (NACA 230xx, NACA 44xx) e NASA LS-1, mas todos esses apresentam drásticas reduções das características aerodinâmicas quando sujeitos à rugosidade. As séries NACA e NASA, que são frequentemente utilizadas nos projetos e no desenvolvimento das pás das TEEH's, não foram desenvolvidas para aplicações em energia eólica, devido à perda obrigatória das suas características aerodinâmicas ao longo do tempo (MANWELL *et al*, 2009).

No entanto, os perfis da família NREL foram projetados especificamente para TEEH's e, em comparação com os perfis NACA e NASA LS-1, a perda da produção anual de energia, devido aos efeitos da rugosidade do perfil, é menor nos perfis da NREL (TANGLER; SOMERS, 1995).

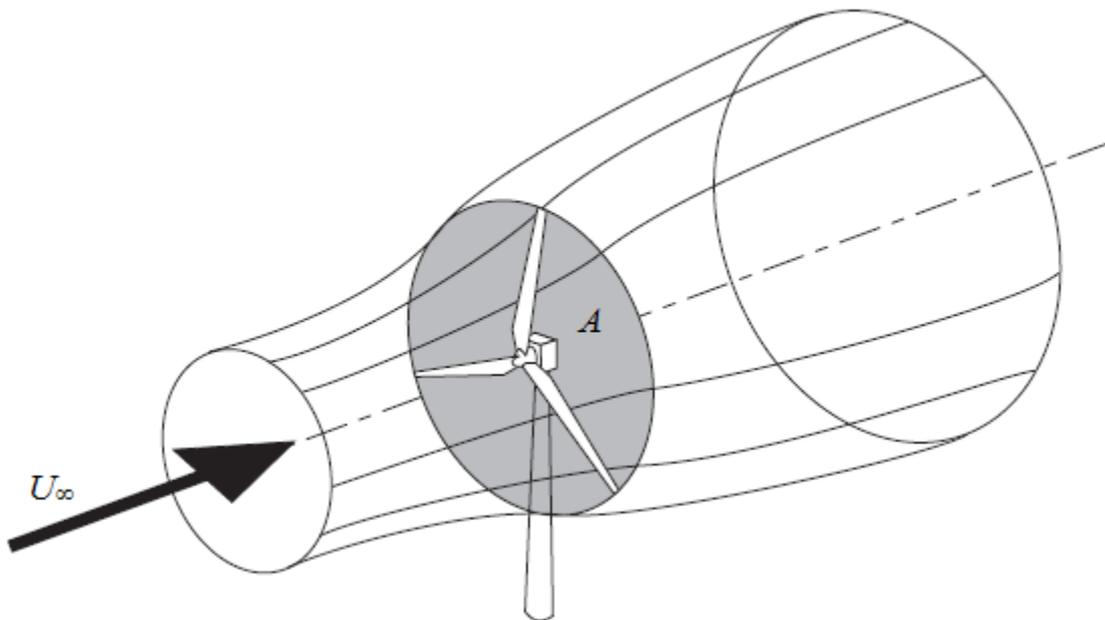
A análise da capacidade teórica de extração de energia de um rotor ideal, foi feita pelo físico alemão Albert Betz, que através de seus cálculos, concluiu que a máxima energia que uma turbina pode extrair é de 59,3% da energia do vento.

4.3 Disco atuador e o limite de Betz

A análise mais simples da extração de energia foi proposta por *Albert Betz* em 1926. Sua teoria não considera o movimento de rotação do rotor e aplica as leis da física de conservação na análise de um rotor ideal (MANWELL *et al*, 2009). Como resultado, prevê a quantidade de energia extraída, através do empuxo sobre um rotor, do ar que passa por uma seção transversal. Apesar das simplificações, como ao não considerar a viscosidade no fluxo de ar, o estudo feito por *Betz* permite compreender alguns detalhes da conversão de energia (HAU, 2006).

A Figura 7 representa comportamento do vento, com velocidade U_∞ e densidade ρ , ao atravessar perpendicularmente o rotor de uma turbina eólica de área A .

Figura 7 - Tubo de corrente de uma turbina eólica.



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

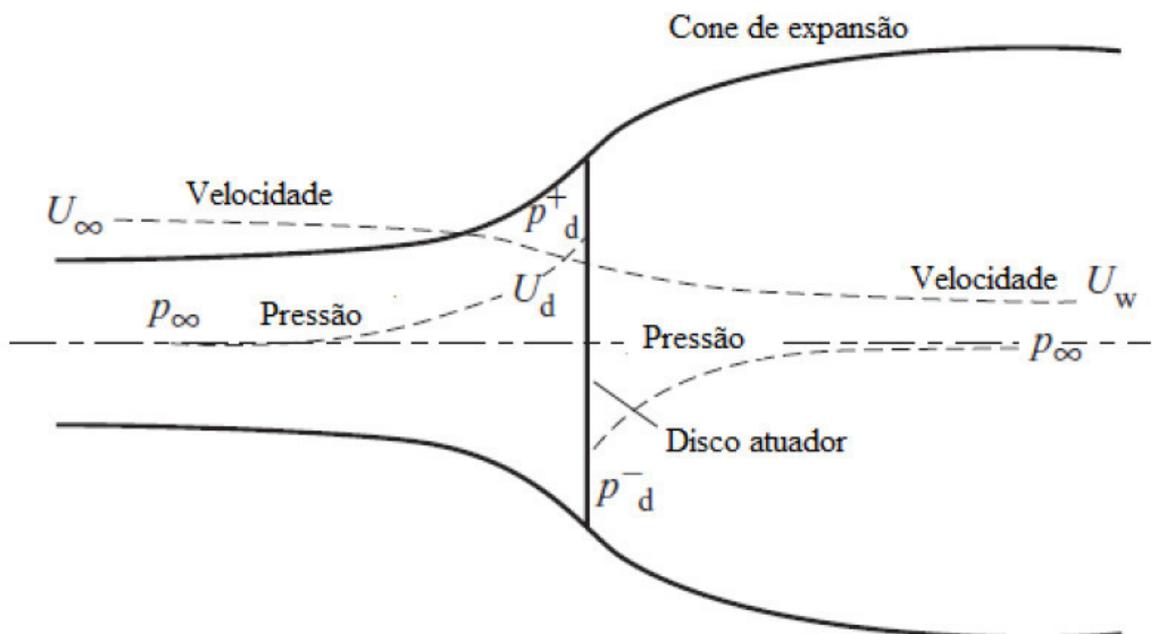
Ao atingir o disco atuador, o fluxo de ar perde parte de sua energia cinética, que é convertida em rotação pelo disco, tornando assim menor que seu valor a montante.

O estudo quantitativo assume as seguintes hipóteses (MANWELL *et al*, 2009):

- Escoamento homogêneo, incompressível e permanente;
- Volume de controle constituído por um tubo de linhas de corrente
- Sem arrasto por atrito;
- Quantidade de pás infinita;
- Empuxo uniforme sobre todo o disco atuador;
- Sem rotação de esteira;
- A pressão estática a montante e a jusante do disco são iguais à pressão ambiente;

O fluxo de ar, ao se aproximar das pás, sofre uma elevação da pressão devido à redução de sua velocidade, conforme pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Modelo do disco atuador



Fonte: adaptado de BURTON *et al*, (2001),

Pela lei da conservação de massa, e aplicando as hipóteses acima, tem-se:

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w = m \quad (01)$$

Onde: ∞ , d e w referem-se a condições muito a montante, ao disco atuador e a esteira (wake), respectivamente.

Ao atravessar o disco atuador, o ar sofre uma queda de velocidade devido à perda de energia cinética, que foi transformada em energia mecânica, acompanhado de uma queda brusca na pressão. Em seguida, a pressão volta a subir ao longo da esteira até atingir a do ambiente durante o escoamento do fluido depois do disco.

Aplicando a conservação do momento linear para o volume de controle (Figura 8) é possível encontrar a força resultante que atua sobre ele. Tal força é igual e oposta ao empuxo, T , que é a força exercida pelo vento sobre a turbina eólica. Mais uma vez, considerando as hipóteses apresentadas, tem-se:

$$T = U_{\infty}(\rho AU)_{\infty} - U_w(\rho AU)_w \quad (02)$$

Como $(\rho AU)_{\infty} = (\rho AU)_w$ que é a vazão mássica (m), a Equação (02) torna-se:

$$T = m (U_{\infty} - U_w) \quad (03)$$

Aplicando a Equação de *Bernoulli* para a região de fluido ante do disco, tem-se:

$$p_{\infty} + \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 = p_d^+ + \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \quad (04)$$

Para a região depois do disco (região de esteira), tem-se a seguinte relação:

$$p_d^- + \frac{1}{2} \rho U_d^2 = p_w + \frac{1}{2} \rho U_w^2 \quad (05)$$

Como as pressões bem a jusante e bem a montante do disco atuador podem ser consideradas iguais, $p_{\infty} = p_w$, a subtração da Equação (04) com a Equação (05), resulta em:

$$p_d^+ - p_d^- = \frac{1}{2} \rho (U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (06)$$

A força de empuxo pode ser calculada pela diferença de pressão da seguinte maneira:

$$T = A_d(p_d^+ - p_d^-) \quad (07)$$

Das Equações (06) e (07), tem-se que:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_d (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (08)$$

Igualando as Equações (08) e (03) e fazendo algumas manipulações algébricas, obtém-se:

$$U_d = \frac{1}{2}(U_\infty + U_w) \quad (09)$$

A partir desses dados, pode-se definir o fator de indução axial, a , como sendo uma redução fracionaria na velocidade de corrente livre (MANWELL *et al*, 2009), ou seja:

$$a = (U_\infty - U_d)/U_\infty \quad (10)$$

Esse fator mostra a medida de influência que o rotor exerce sobre o escoamento, portanto, no caso de todas as velocidades serem iguais ($U_\infty = U_d = U_w$), ocasionará $a = 0$, o que significa que não haverá conversão de energia cinética em energia de rotação. Para o caso de $a = 1$, ou seja, $U_d = 0$, praticamente todo vento foi interceptado pelas pás, ocasionando um efeito de blocagem, resultando em um não aproveitamento de energia.

A relação entre U_∞ , U_d , U_w e o fator de indução a , pode ser estabelecida da seguinte forma:

$$U_d = (1 - a)U_\infty \quad (11)$$

$$U_w = (1 - 2a)U_\infty \quad (12)$$

A Equação (12) é válida apenas para $a < 1/2$, pois para valores maiores, a velocidade do vento na região da esteira (U_w), assumirá valores negativos, o que é fisicamente impossível.

A potência (P) extraída do vento para o rotor pode ser calculada efetuando o produto da força de empuxo (Equação 08) no disco com sua velocidade (Equação 09), portanto:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_d (U_\infty^2 - U_w^2) U_d = \frac{1}{2} \rho A_d U_d (U_\infty + U_w) (U_\infty - U_w) \quad (13)$$

Substituindo as Equações (11) e (12) na Equação (13), tem-se:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_d U_\infty^3 4a(1 - a)^2 \quad (14)$$

O rendimento de uma turbina eólica é dado por um fator adimensional, que é definido como (MANWELL *et al*, 2009):

$$C_p = \frac{\text{Potencia do rotor}}{\text{Potencia do vento}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} \quad (15)$$

Onde U é a velocidade de corrente livre que é igual a U_∞ . Substituindo a Equação (14) na Equação (15) obtém-se:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (16)$$

A Equação (16) representa o coeficiente de potencia, C_p , de uma turbina eólica. A potência extraída do vento através do rotor será máxima quando C_p for máximo.

Derivando a Equação (16) em relação ao fator de indução axial e igualando a zero, encontra-se $a = 1/3$. Portanto o coeficiente de potencia máximo (limite de Betz) será:

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (17)$$

Logo o rendimento máximo teórico de uma turbina eólica é em torno de 59,3%. É importante destacar também que para o caso de $a = 1/3$, a velocidade do rotor, U_d , fica sendo igual a 2/3 da velocidade de corrente livre U_∞ .

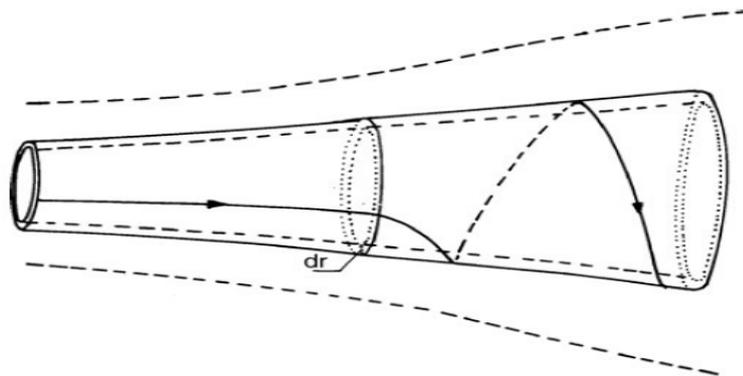
Portanto, a maior quantidade possível de energia que uma turbina pode extrair do vento é de 59,3% segundo a teoria de Betz, porém estudos apontam que o coeficiente de potência máximo para as atuais turbinas eólicas de eixo horizontal oscila em torno de 45% (Hau, 2006). Isso se deve ao fato da existência de um número finito de pás associado aos fenômenos de perdas nas pontas das pás do rotor, rotação da esteira, forças de resistência aerodinâmica, perdas mecânicas, etc.

Como um dos objetivos desse trabalho é calcular o coeficiente de potência para uma mini turbina eólica utilizando um difusor, esses dois valores de C_p (45% e 59,3%) vão servir de parâmetros para avaliar o aumento do coeficiente de potência, quando forem realizados os testes. É importante lembra que para conseguir valores próximos à esses, o ambiente onde deverá ser realizadas as medições terá que ser próximo da idealidade.

4.4 Esteira rotativa

Na análise desenvolvida anteriormente (Teoria de Betz), não foi considerado o efeito da rotação das pás no fluido, ou seja, nenhuma rotação era transmitida ao fluido e a redução de potência era ocasionada exclusivamente por um disco atuador. Porém, na realidade, grande parte dos conversores de energia emprega um rotor com pás rotativas com velocidade angular Ω . Essas pás, ao varrerem o disco, através das suas características aerodinâmicas, desenvolvem a redução de pressão que é responsável pela perda axial de energia (BURTON *et al*, 2001). Considerando que o ar a montante da turbina se aproxima com uma única direção, ou seja, só possui quantidade de movimento linear e pela conservação do momento angular, o escoamento a jusante do rotor gira na direção oposta ao rotor, como pode ser visualizado na Figura 9, em reação ao torque exercido pelo escoamento sobre o rotor (MANWELL *et al*, 2009).

Figura 9 - Esteira de rotação do ar gerada pela rotação do rotor.



FONTE: Adaptada de HAU (2006).

Esse efeito faz com que a energia cinética na esteira aumente, reduzindo assim a energia extraída pelo o rotor, pois parte da energia que poderia ser aproveitada faz com que o ar gire. Outra consequência desse fenômeno, é a diminuição do coeficiente de potência, logo o valor o valor de C_p máximo teórico, ao considerar esse modelo, será menor do que o proposto por betz, que é de aproximadamente 59,3%.

O coeficiente de potência de uma turbina eólica de eixo horizontal pode ser analisado com relação à velocidade específica de ponta (λ). Tal grandeza é dada pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{\Omega \times R}{U_{\infty}} \quad (18)$$

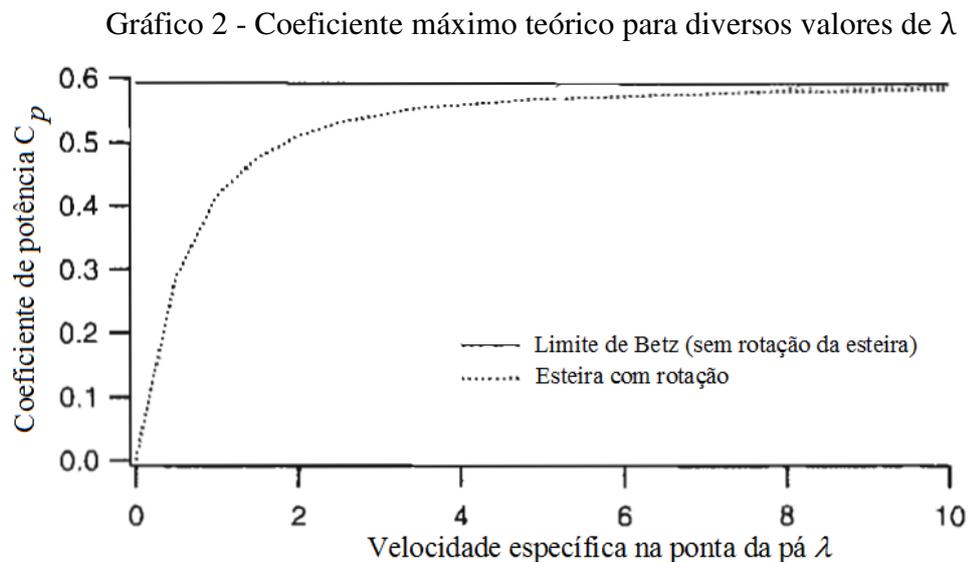
onde:

Ω = Velocidade angular (rad/s)

R = Comprimento da pá (m)

U_{∞} = Velocidade do vento (m/s)

O Gráfico 2 mostra como o comportamento de $C_p \times \lambda$, em dois casos: considerando o efeito da esteira rotativa e esteira sem rotação.



Fonte: Adaptado de Manwell et al. (2006)

Pelo gráfico acima é possível notar, para caso da esteira com rotação, que o C_p cresce à medida que λ aumenta até se aproximar do valor proposto por Betz e ali permanecer constante, enquanto que para o outro caso o C_p não varia, ou seja, independe de λ .

4.5 Aerodinâmica e características de um aerofólio

A aerodinâmica é o estudo do movimento de fluidos gasosos, relativo às suas propriedades e características, e às forças que exercem em corpos sólidos neles imersos. É uma ciência que faz parte da Física e estuda o movimento do ar e a sua interação com os corpos. Em outras palavras, ela estuda os efeitos do movimento do ar sobre os corpos e os efeitos dos corpos sobre o movimento do ar (ANDERSON JR., 2001).

O estudo da aerodinâmica em conjunto com o princípio de Bernoulli são fundamentais para explicar diversos fenômenos físicos importantes que estão envolvidos no funcionamento das turbinas eólicas de eixo horizontal, como por exemplo, a sustentação.

O fluxo de ar ao encontrar a pá da turbina se divide em dois: parte do fluxo passa por cima (extradorso) e parte passa por baixo (intradorso), chegando junto ao mesmo tempo no bordo de fuga. O ar que vai pelo extradorso percorre um caminho maior devido ao formato da pá, portanto deve possuir uma maior velocidade em relação ao ar que passa pelo intradorso. Por Bernoulli, a maior velocidade de ar acima da asa implicaria em uma pressão menor do que a pressão abaixo dela originando assim uma sustentação.

Portanto, é extremamente importante conhecer a geometria e os parâmetros de um perfil aerodinâmico, que estará imerso em fluido para a otimização de projetos de asas de avião, pás de aerogeradores e etc. Perfil aerodinâmico ou aerofólio é o formato em corte da asa (Figura 10), que é uma superfície projetada com a finalidade de se obter uma reação aerodinâmica a partir do escoamento do fluido ao seu redor (ANDERSON JR., 2001).

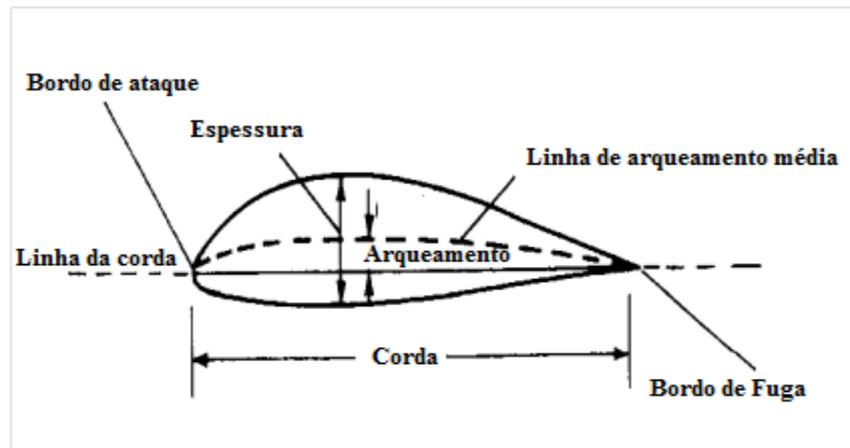
Figura 10 - Corte transversal de uma asa



Fonte: Adaptado de ANDERSON JR. (2001).

A asa se estende na direção y (direção span). A velocidade da corrente livre é paralela ao plano xz . Os termos que caracterizam um perfil são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Parâmetros de um perfil aerodinâmico.



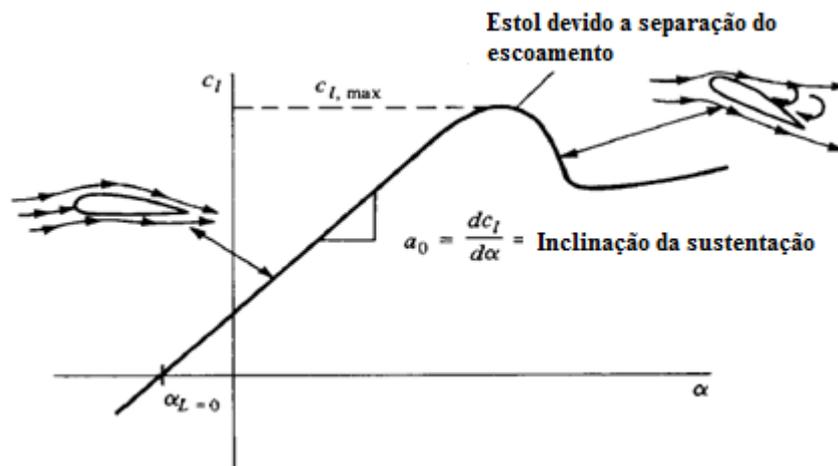
Fonte: Adaptado de ANDERSON JR. (2001).

- Bordo de ataque: parte frontal do aerofólio que primeiro entra em contato com o ar.
- Bordo de fuga: parte posterior do aerofólio, por onde o ar se dissipa.
- Extradorso: superfície superior e mais curvada do perfil.
- Intradorso: superfície inferior do perfil.
- Corda: linha reta, linha imaginária, que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga.
- Linha de curvatura média, ou linha média, ou ainda Linha de Arqueamento Média: linha que define o ponto médio entre todos os pontos que formam as superfícies superior e inferior do perfil. Também é chamada de Linha de Cambagem.
- Espessura: representa a altura do perfil medida perpendicularmente à linha da corda.
- Razão de espessura do perfil: razão entre a máxima espessura do perfil e o comprimento da corda
- Arqueamento: representa a máxima distância que existe entre a linha de arqueamento média e a linha da corda do perfil.

A *National Advisory committee for Aeronautics* (NACA), por volta de 1930, começou um programa de pesquisa para desenvolver series de aerofólios, que atualmente são usados em grande parte das aeronaves (Anderson Jr. 2001).

E Entre os anos de 1930 e 1940, realizou experimentos com vários perfis em um túnel de vento para determinar o Coeficiente de Sustentação e arrasto (ANDERSON JR., 2001). A Figura 12 mostra a variação típica das características aerodinâmica do perfil

Figura 12 - Variação do coeficiente de sustentação com o ângulo de ataque



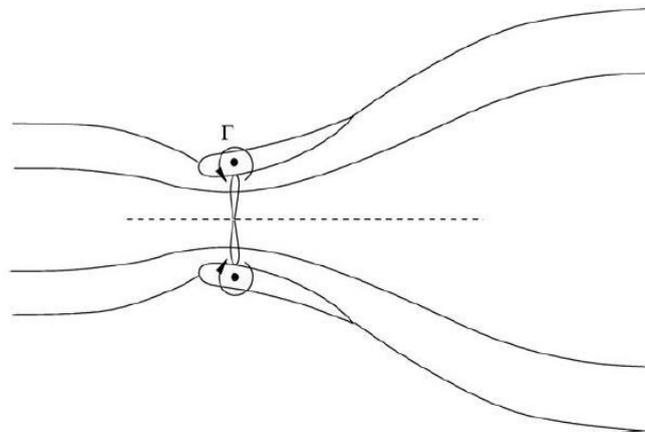
Fonte: (ANDERSON JR, 2001), adaptada.

A Figura 12 mostra o comportamento do coeficiente de sustentação (C_l) em função do ângulo de ataque (α). A declividade da sustentação é dado por a_0 . Segundo Anderson Jr. (2001), C_l varia linearmente para pequenos valores de velocidade e α . Com o aumento do α , o escoamento começa a descolar da superfície superior (separação da camada limite) do perfil aerodinâmico, criando esteiras atrás do aerofólio com intensa recirculação de ar (vórtices). Isso resulta em um aumento do atrito e perda de sustentação chamada de estol. O coeficiente de sustentação máximo $C_{l, \max}$, mostrado na Figura acima, representa o valor máximo de sustentação que o aerofólio pode alcançar, sendo um parâmetro muito importante no desempenho do aerofólio, pois determina a velocidade de estol da nave. Quando o aerofólio estola, o coeficiente de arrasto aumenta e, conseqüentemente, a resistência aerodinâmica também.

4.6 Difusor

Segundo HANSEN (2008), é possível aumentar a potência gerada por uma turbina eólica, excedendo, assim, o limite de *Betz*, inserindo-o no interior de um difusor. Se a seção transversal do difusor possui o formato de um aerofólio, uma força de sustentação será gerada pelo fluxo através do difusor. A Figura 13 mostra o fluxo de ar através de uma turbina acoplada a um difusor.

Figura 13 - Fluxo ideal através da turbina em um difusor



FONTE: Adaptado de HANSEN (2006)

Devido ao efeito dessa sustentação, anéis de vórtices são criados, que pela lei de Biot-Savart induzirá a velocidade a aumentar o fluxo de massa através do rotor (HANSEN 2006). O acréscimo é definido como:

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_1} \quad (19)$$

Onde V_2 é a velocidade axial no plano do rotor (m/s). A expressão para o Coeficiente de Potência de uma turbina equipada com difusor pode ser expressa por:

$$C_{p,d} = \frac{P}{0,5\rho V_1^3 A} = \frac{T \cdot V_2}{0,5\rho V_1^2 V_1 A \frac{V_2}{V_1}} = C_T \varepsilon \quad (20)$$

Onde T é a força de empuxo e C_T é o Coeficiente de Empuxo. Para uma turbina eólica convencional, pode-se considerar que $C_{p,c} = C_T(1 - a)$, então:

$$\frac{C_{p,d}}{C_{p,c}} = \frac{\varepsilon}{(1 - a)} \quad (21)$$

O fluxo mássico que passa através da turbina convencional (\dot{m}_c) e da turbina equipada com difusor (\dot{m}_d) são representados por:

$$\frac{\dot{m}_c}{\rho V_1 A} = \frac{\rho(1 - a)V_1 A}{\rho V_1 A} = 1 - a \quad (22)$$

$$\frac{\dot{m}_d}{\rho V_1 A} = \frac{\rho V_2 A}{\rho V_1 A} = \varepsilon \quad (23)$$

Combinando as Equações 21, 22 e 23 descritas, obtém-se:

$$\frac{C_{p,d}}{C_{p,c}} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_c} \quad (24)$$

A Equação 24 mostra que o aumento no coeficiente de potência para a uma turbina equipada com difusor é proporcional à razão entre o fluxo de massa através de uma turbina com difusor e o fluxo de massa na mesma turbina sem difusor (HANSEN, 2006). Como o Difusor induz um aumento no fluxo de massa através do rotor, então, pela Equação 24, o coeficiente de potência também aumentará.

Portanto, a escolha de um perfil aerodinâmico do difusor é importante, pois isso afeta diretamente na sustentação, que por sua vez afeta o fluxo de ar, modificando assim o coeficiente de potência do sistema.

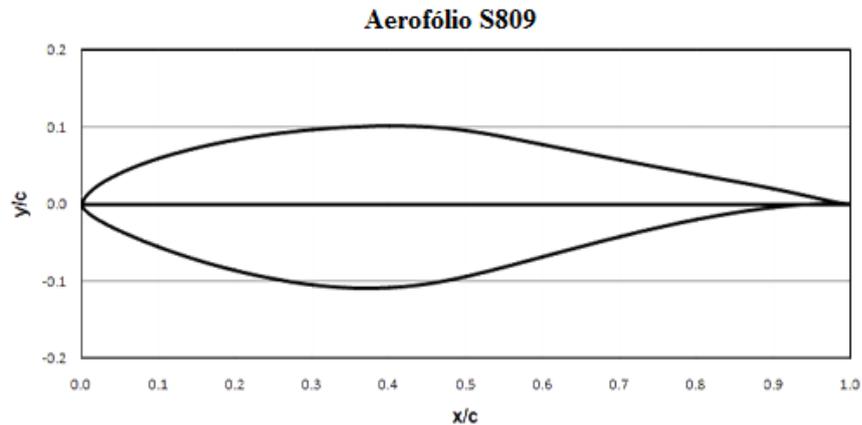
5. METODOLOGIA

Nessa seção, serão apresentadas as características das pás utilizadas nos testes e também como foi feito o projeto e construção do difusor.

5.1 Características das pás

As pás utilizadas nos testes foram projetadas para terem velocidade específica (λ) igual a 7. Possuem um perfil aerodinâmico NREL S809 que tem alta sustentação para baixas velocidades de corrente livre. As características principais desse aerofólio é o máximo Coeficiente de Sustentação de 0,748 e ângulo de estol de $6,11^\circ$ (MACÊDO, 2016). A Figura 14 mostra o perfil S809.

Figura 14 - Perfil aerodinâmico (S809) utilizado na pá



Fonte: Macêdo (2016).

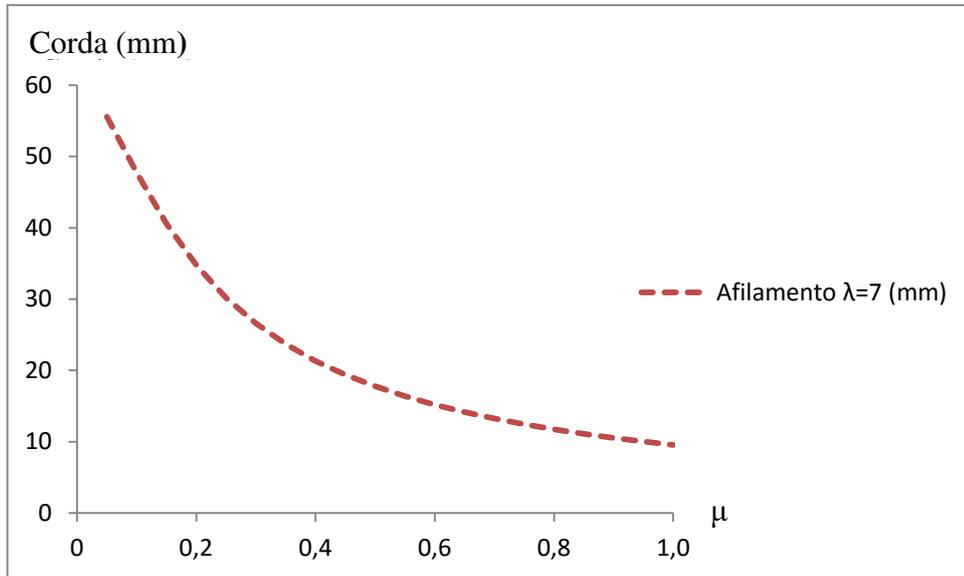
A Figura 15 apresenta a modelagem das pás feitas em um *software* de CAD.

Figura 15 – Projeto das pás para $\lambda = 7$



Fonte: Macêdo (2016).

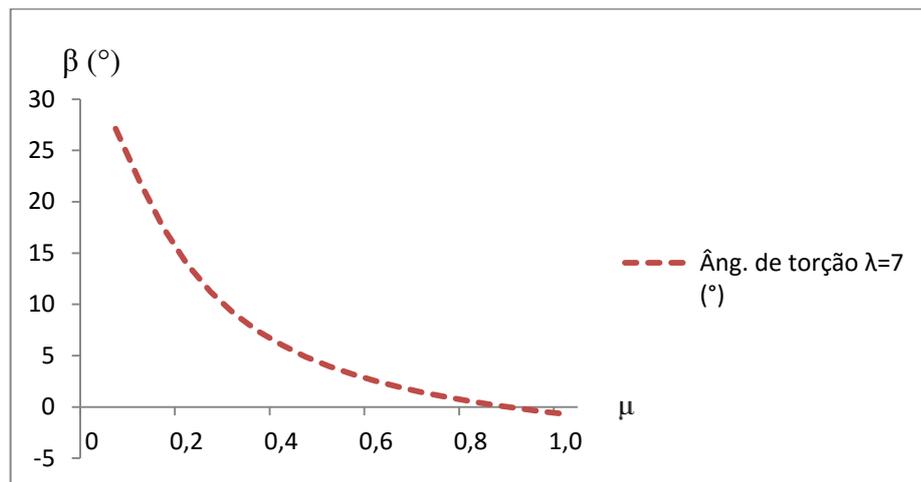
O afilamento das pás mostra como o comprimento da corda diminui ao longo da pá. Comportamento esse que pode ser visto no Gráfico 3 da pá utilizada com $\lambda = 7$.

Gráfico 3 – Afilamentos das pás para $\lambda = 7$ 

Fonte: Macêdo (2016).

Os valores da proporção relacionada ao raio (μ) encontram-se entre 0,1 e 1. Isso pode ser explicado devido à localização da base da pá conectada ao rotor, que está entre os valores de 0 e 0,1.

Outro parâmetro das pás é o comportamento do seu ângulo de torção com relação ao seu comprimento. O Gráfico 4 mostra essa relação que é característica das pás utilizadas nos testes.

Gráfico 4 – Torção das pás para $\lambda = 7$ 

Fonte: Macêdo (2016).

O conjunto das pás utilizadas nos testes, com características dadas acima são mostradas na Figura 16 após sua confecção.

Figura 16 – Foto Conjunto das pás



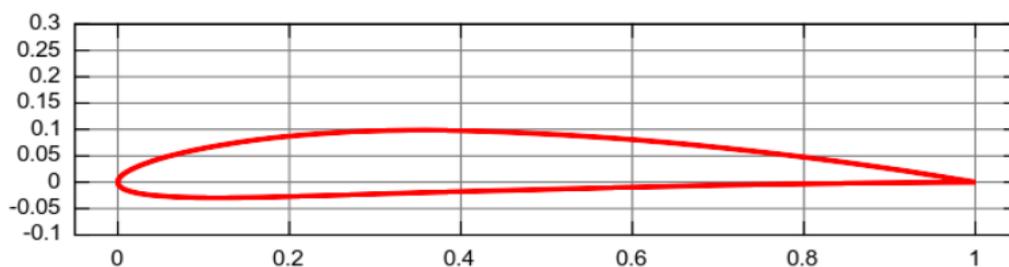
Fonte: Macêdo (2016).

Após a modelagem, as pás foram fabricadas com o auxílio da fresadora CNC para a criação do contramolde de madeira MDF. A máquina utilizada pode ser encontrada na Oficina Digital, localizada no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFC (MACÊDO, 2016).

5.2 Construção do difusor

O perfil aerodinâmico utilizado no projeto do difusor foi o NACA 4412 com 22 cm de comprimento de corda, e assim como o perfil das pás, esse também possui alta sustentação para baixas velocidade de corrente livre. Esse aerofólio possui coeficiente de sustentação máximo de 1,5 e ângulo de estol de 14° . A Figura 17 mostra o perfil NACA 4412.

Figura 17 - perfil NACA 4412



Fonte: Airfoil Investigation Database (2011).

Os perfis foram desenhados no software AutoCad e impressos em um papel. Em seguida, foram cortados a laser e colados em compensado. O perfil de compensados pode ser visto na Figura 18. O corte feito no perfil foi usado para facilitar o encaixe no aro e também para fazer com que o difusor tenha ângulo de ataque igual a 4° , pois o objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho do difusor com essa especificação.

Figura 18 – Perfil de compensado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a construção do difusor, utilizou-se um aro de metal com 43 cm de raio e 2 mm de espessura como pode-se ver na Figura 19.

Figura 19 – Aro do difusor



Fonte: SERRA (2014).

O aro foi dividido em 50 seções de aproximadamente 5,4 cm e em seguida preenchido com 52 perfis posicionados e colados no aro, espaçados de maneira uniforme, respeitando as irregularidades do metal, formando o esqueleto do difusor. A Figura 20 mostra como ficou o aro após esse processo.

Figura 20 – Preenchimento dos perfis



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os espaços vazios entre os perfis foram preenchidos com espuma de poliuretano. Essa substância se expande durante seu processo de formação, por isso, foi necessário criar um molde de espuma vinílica acetinada (EVA), como pode-se ver na Figura 22.

Figura 21 – Molde de EVA preenchido com poliuretano



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, colocou-se poliuretano no espaço entre os perfis através de uma pequena abertura no EVA no bordo de fuga dos perfis. Algumas horas depois, quando o poliuretano estava seco e firme, o EVA foi retirado, deixando o difusor com sua forma bruta (Figura 22). A utilização do EVA nesse processo é importante, pois além de comprimir a espuma deixando-a mais compacta, ela adere pouco à espuma de poliuretano, facilitando a remoção do molde após a cura, sem danificar o material compactado (MACÊDO, 2016).

Figura 22: Processo de retirada do EVA com o poliuretano



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante destacar que a utilização de muitos perfis, nesse caso 52, faz com que a expansão do poliuretano alcance toda a região vazia entre os perfis, garantindo assim que todo o espaço seja preenchido com a espuma.

Após a retirada do EVA, o difusor ficou com imperfeições devido a aleatoriedade da expansão da espuma, por isso foi necessário lixar o poliuretano para obter a forma desejada do difusor (Figura 23).

Figura 23 – Difusor preenchido com poliuretano e lixado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após esses procedimentos, o difusor foi revestido com fibra de vidro e logo em seguida com Vinil, que é um material termoplástico. Com esse material, foi possível corrigir ainda mais as irregularidades nas superfícies do difusor, fazendo com o que o escoamento do ar seja mais suave em sua área. A Figura 24 mostra como ficou o difusor com seu acabamento final já pronto para os testes.

Figura 24 – Foto do Difusor com ângulo de ataque 4°



Fonte: Elaborado pelo autor.

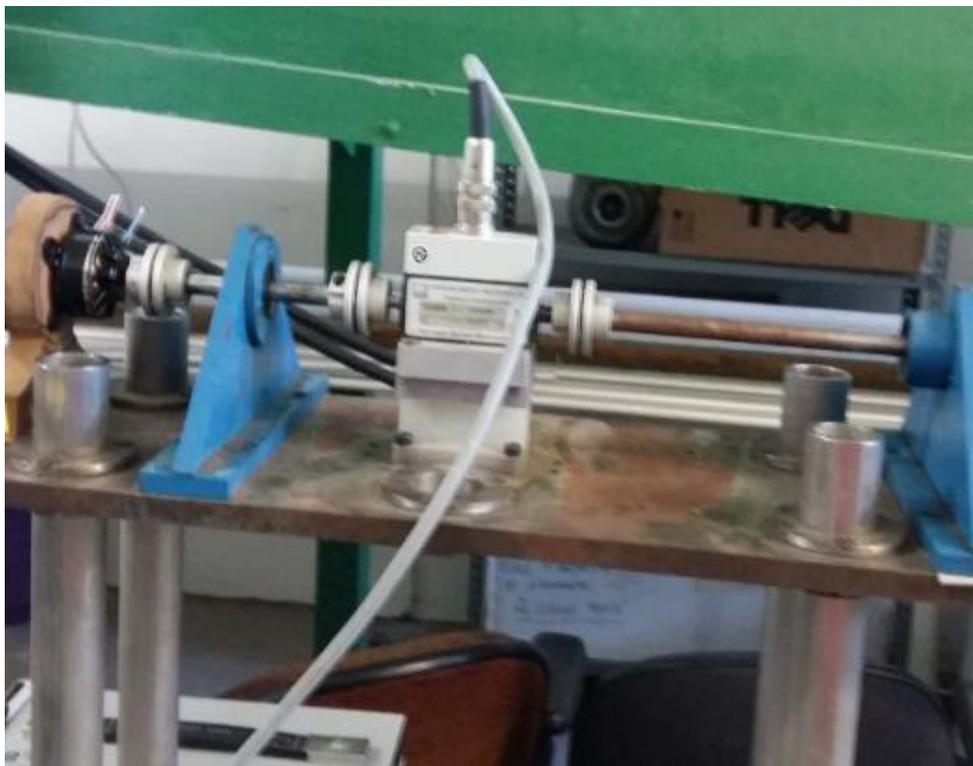
5.3 Instrumentos utilizados para o teste

O estudo feito no presente trabalho possui, principalmente, seguintes variáveis: variáveis a rotação das pás, o torque realizado por elas e a velocidade do vento. Para a análise quantitativa de tais grandezas foram utilizados: um transdutor de torque, um anemômetro e sistema de controle de rotação.

5.3.1 Transdutor de torque

O transdutor de torque é o equipamento necessário para a medição direta de um torque aplicado em um eixo, sendo estes medidores instalados entre a carga mecânica e o motor (Figura 25). O transdutor utilizado no teste é um Hottinger Baldwin Messtechnik modelo T20WN, capaz de medir um torque de até 2 N.m com rotação mensurável de 3000 rpm e rotação máxima de trabalho de 10000 rpm.

Figura 25: Foto do Transdutor de torque



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.2 Anemômetro

O anemômetro é o equipamento responsável por medir a velocidade do vento (Figura 26). Sua calibração é feita conhecendo-se uma velocidade do vento e o número de voltas realizadas por suas hélices. É feita então a associação para que voltas completadas corresponde uma velocidade de vento. O equipamento utilizado nos testes é o TAR – 176. Sua escala é de 0,4 a 12 m/s, com resolução de 0,01 m/s. Seu tempo de resposta é de 0,8 segundos e mostra os valores mínimo, médio e máximo medidos.

Figura 26: Foto do anemômetro utilizado nos testes



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.3 Motor elétrico

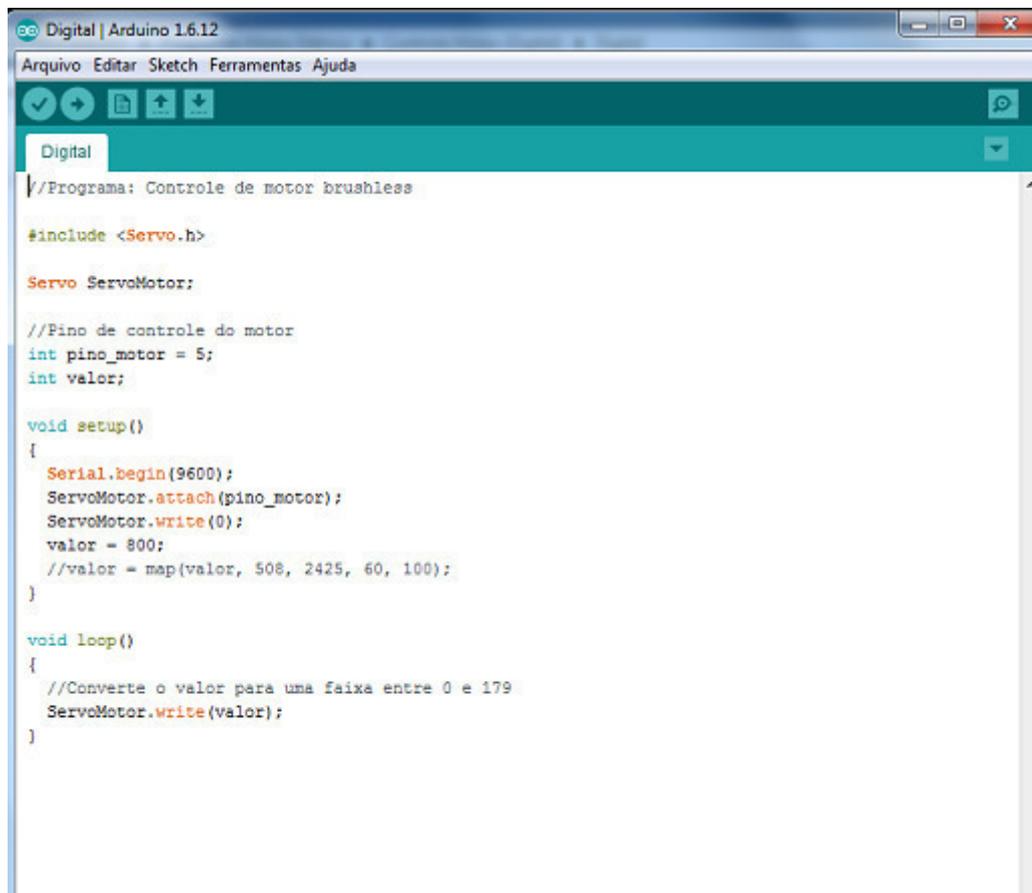
O motor utilizado nos testes foi de 12 V de corrente contínua, necessário para obter os valores de rotações desejados.

5.3.4 Sistema de Controle de rotação

O sistema para controlar a rotação e obter os dados de rotação e torque foi desenvolvido por alunos do Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos da UFC. Os programas foram desenvolvidos em plataforma Arduino, são eles: O controle de rotação e o torquímetro.

O controle de rotação é um software que permite o motor atingir determinadas rotações desejadas para o estudo de torque. Nesse trabalho, foram escolhidas 8 valores de rotação. A interface do ambiente computacional é mostrada na Figura 27.

Figura 27: Interface do programa controle de rotação



```
Arduino IDE | Digital | Arduino 1.6.12
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
Digital
//Programa: Controle de motor brushless

#include <Servo.h>

Servo ServoMotor;

//Pino de controle do motor
int pino_motor = 5;
int valor;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  ServoMotor.attach(pino_motor);
  ServoMotor.write(0);
  valor = 800;
  //valor = map(valor, 508, 2425, 60, 100);
}

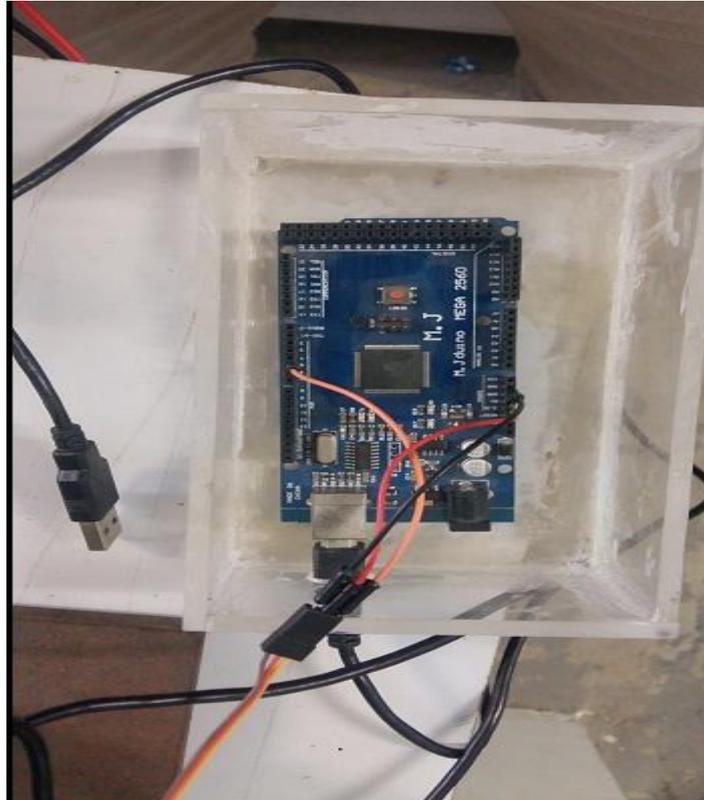
void loop()
{
  //Converte o valor para uma faixa entre 0 e 179
  ServoMotor.write(valor);
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Pra escolher a velocidade desejável de rotação do motor, basta ir em “ valor = ” e digitar o numero através do teclado do computador.

Para que o programa interprete e forneça os dados, é preciso uma placa de circuito Arduino (Figura 28) para fazer a interação entre o ambiente computacional e o ambiente de ambiente físico (bancada de testes). O circuito ao motor elétrico da bancada de testes.

Figura 28: Foto da placa de circuito Arduino (Rotação)



Fonte: Elaborado pelo autor

O torquímetro fornece os dados de rotação e torque quando o sistema esta em operação. Para obter o valor de torque, o transdutor de torque tem que receber um sinal o qual varia de -10 V a +10 V. Os ensaios de protótipos de pás eólicas não ultrapassam o intervalo de -5 V a +5 V, dessa forma para o Arduino realizar a leitura do sinal negativo, deve-se ser acrescido uma tensão de +5 V e final será dividido por 2. Assim, o cálculo, que foi escrito no código do programa, para interpretar o valor de entrada da porta do Arduino, referente ao sinal de Torque, está apresentado na equação possuindo um valor final no intervalo entre -1000 mN/m e +1000 mN/m (CAVALCANTE,2016).

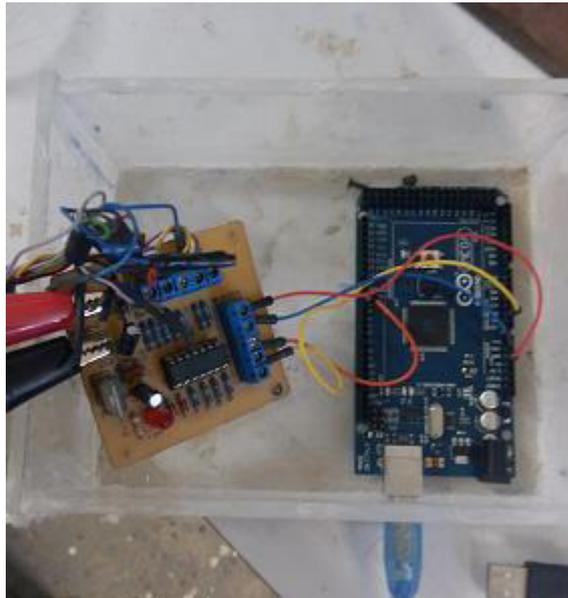
$$Torque = \frac{-1[5 - 2(valorvolt)] \times 1000}{5} \quad (25)$$

Já para obter os dados de rotação, o sensor deve emitir um sinal em forma de pulso a cada 0,5 s de forma que uma rotação totaliza 360 pulsos. Assim, o código possui a equação com a finalidade de transformar esse sinal em um valor em RPM (CAVALCANTE,2016).

$$Rotação = \frac{Pulsos}{0,5s} \times \frac{1 \text{ rotação}}{360 \text{ pulsos}} \times \frac{60s}{1 \text{ minuto}} \quad (26)$$

Para que o programa interprete e forneça os dados, é preciso uma placa de circuito Arduíno, conforme a Figura 29, para fazer a interação entre o ambiente computacional e o ambiente de ambiente físico (bancada de testes). O circuito é ligado ao transdutor de torque.

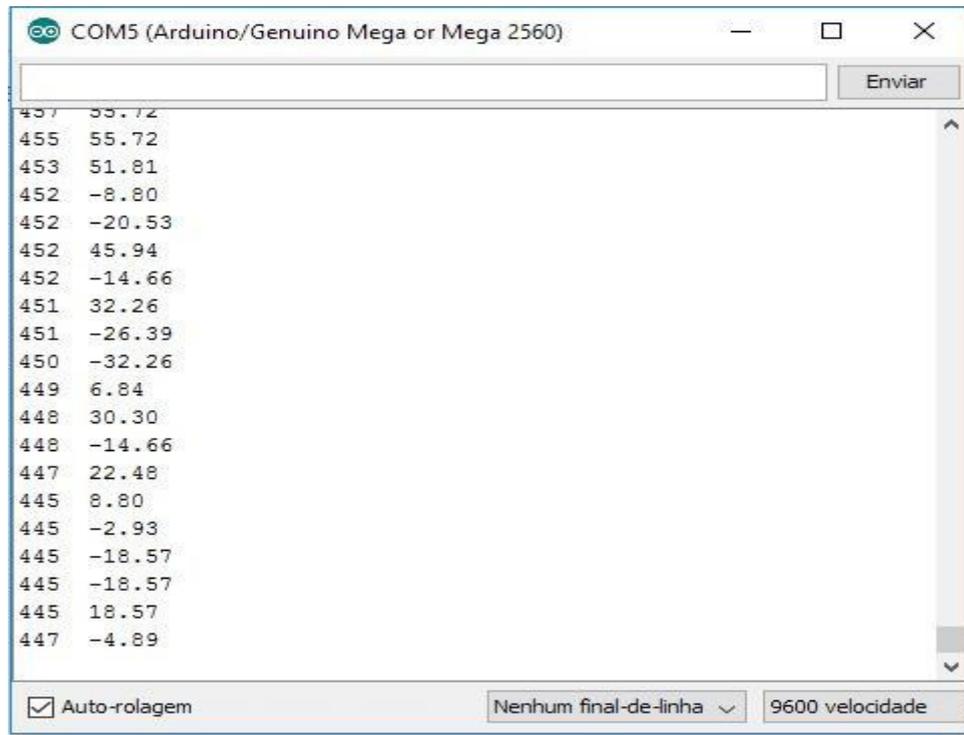
Figura 29: Foto da Placa de circuito Arduíno (Torquímetro)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 30 mostra a placa com as com os cabos devidamente conectados para a realização dos testes. A interface do ambiente computacional é mostrada na Figura 26.

Figura 30 – Interface do programa torquimetro.



Fonte: elaborado pelo autor

Uma vez escolhida a velocidade de rotação do motor, através do programa controle rotação, a interface mostrada na Figura acima do programa de torque, mostra os valores de rotação (coluna direita) e torque (coluna esquerda). Os valores vão sendo constantemente atualizados conforme o tempo passa. Para sessar a atualização, basta clicar em "auto-rolagem".

5.4 Procedimento Experimental

Neste trabalho, foram medidas oito velocidades do rotor, dadas em RPM, e seus respectivos torques. Uma vez encontrado os resultados, foram plotados o gráfico de torque x rotação e coeficiente de potencia x velocidade especifica de ponta (λ). Os gráficos foram feitos em duas situações: rotor sem difusor e rotor com difusor. Em seguida, foram comparados os resultados nas duas situações a fim de determinar a influencia do difusor no desempenho do rotor com relação ao rotor sem difusor.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes foram feitos no Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos (LAERO) da Universidade Federal do Ceará (UFC) Através desses testes, foi possível encontrar valores de torque e rotação do conjunto das pás devido ao escoamento do vento.

6.1 Dados preliminares

As pás do rotor utilizadas nos testes possuem 17 cm de comprimento, porém o cubo no qual foi conectado as pás tem 1,5 cm de raio, com isso o comprimento do raio considerado para efeito de cálculo é de 19 cm. Além disso, a densidade do ar utilizada foi de $1,2 \text{ Kg/cm}^3$, pois, foi observada uma temperatura em torno de 25°C no ambiente dos testes, dado esse que foi medido pela ajuda do anemômetro.

Esses dados são importantes, pois, foram utilizados para calcular o coeficiente de potência (C_p), dado pela Equação 15.

6.2 Torque do mancal

As medições de torque nos mancais foram realizadas sem o acoplamento do conjunto de pás. O conjunto de mancais é um dispositivo mecânico fixo, normalmente feito de ferro fundido ou aço, onde é apoiado o eixo que gira. Além disso, tal dispositivo oferece uma resistência ao movimento, devido principalmente ao atrito. Por isso que se faz necessário conhecer o torque dos mancais, pois eles devem ser levados em conta para o cálculo do torque real do conjunto de pás.

A Tabela 2 mostra os principais parâmetros dos mancais encontradas para o projeto de velocidade específica de ponta 7 coletadas durante 1 minuto para cada valor de rotação. Podem ser observados, os valores de rotação (n), velocidade específica de ponta (λ), torque médio dos mancais (Q médio).

Tabela 2 – Parâmetros medidos dos mancais de $\lambda=7$

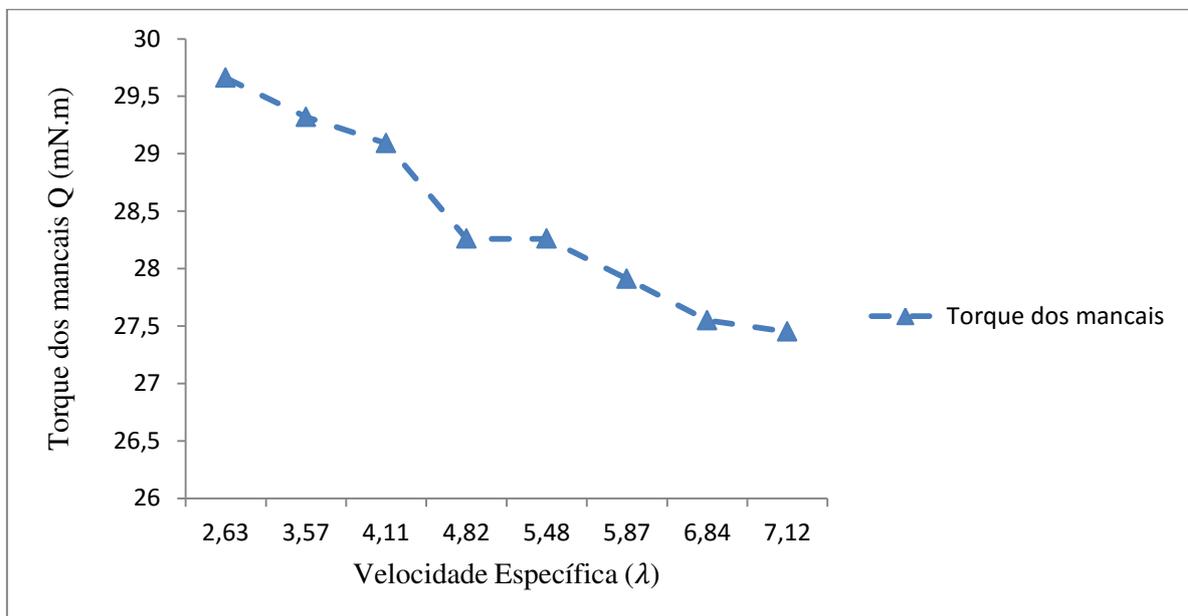
n (RPM)	λ	Q médio (mN.m)
659,34	2,63	29,66
855,32	3,57	29,32
983,67	4,11	29,09
1149,62	4,82	28,26
1284,59	5,48	28,26
1416,16	5,87	27,91
1652,74	6,84	27,55
1724,04	7,12	27,45

Fonte: Elaborada pelo autor.

Preferiu-se iniciar as medidas no $\lambda = 2,63$, pois, para valores de velocidade específica menores, os mancais ofereciam alta resistência a rotações baixas do eixo, podendo então, gerar resultados insatisfatórios.

O Gráfico 5 mostra o comportamento do torque com relação a sua velocidade específica λ .

Gráfico 5 – Torque dos mancais



Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 5, mostra que para baixos valores de rotação, o sistema oferecia uma alta resistência, conseqüentemente gerando altos valores de torque. No entanto, à medida que a rotação era aumentada, valores de torque cada vez menores eram observados. Isso efeito ocorre pois em altas velocidades a influência do atrito é cada vez menor.

6.3 Torque das pás

É importante lembrar que o conjunto de mancais onde se apoia o eixo da bancada de teste, oferece uma resistência ao movimento devido ao atrito, dito anteriormente, logo parte do torque oferecido pelo sistema em operação é devido à essa resistência. Ao colocar o conjunto de pás no eixo, o torque gerado por elas tendem a minimizar o torque oferecido pelo o sistema, fornecendo um valor menor que o observado pelo mancal. Portanto, para se obter o torque real do rotor, foi necessário subtrair o valor do torque dos mancais do torque do rotor em operação para cada rotação estudada.

Os testes realizados com as pás foram feitos utilizando-se um exaustor. Para tanto, foi necessário inverter sua frequência para que ele pudesse ventilar e controlar sua velocidade de escoamento. O ventilador produzia um escoamento muito turbulento, por isso, ele foi colocado a uma distância de mais ou menos 1,7 m da bancada de testes para garantir uma velocidade de corrente livre próximo de 5 m/s que é a velocidade de projeto das pás.

Para medir a velocidade de corrente livre do escoamento foi utilizado um anemômetro a 0,5 m de distância das pás. Foi escolhido o tempo de 1 minuto para coletar os dados.

A Tabela 3 apresenta os dados das pás obtidos ao longo de todo o ensaio, onde podem ser observados os valores de rotação (n), velocidade específica de ponta (λ), Torque médio dos mancais (Q médio mancal), velocidade média de corrente livre (U médio), torque médio das pás (Q médio pás), torque médio resultante das pás (Q médio resultante pás) e Coeficiente médio de Potência (C_p médio).

Tabela 3 – Parâmetros medidos do conjunto de pás de $\lambda=7$

n (RPM)	λ	Q médio mancal	Q médio pás	Q médio resultante pás	U médio (m/s)	Cp médio
659,34	2,63	29,66	31,67	-2,01	4,99	-0,02
855,32	3,57	29,32	32,04	-2,72	4,77	-0,03
983,67	4,11	29,09	28,44	0,65	4,76	0,01
1149,62	4,82	28,26	26,77	1,49	4,75	0,02
1284,59	5,48	28,26	23,65	4,71	4,66	0,09
1416,16	5,87	27,91	20,46	7,45	4,80	0,14
1652,74	6,84	27,55	14,44	13,11	4,81	0,29
1724,04	7,12	27,45	8,98	18,47	4,82	0,43

Fonte: Elaborada pelo autor.

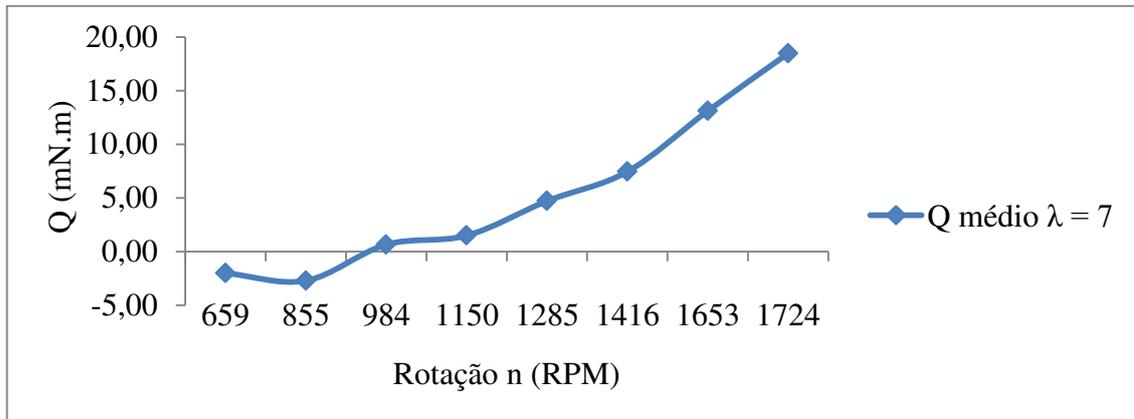
O torque médio resultante das pás (Q médio resultante pás), mostrado na Tabela 3, foi calculado subtraindo o valor do torque médio nos mancais do torque médio das pás como explicado anteriormente.

O Coeficiente de potência foi calculado com base na Equação (15), onde a potência do rotor P é dada pelo produto da rotação (em radiano por segundo) pelo Q médio resultante pás.

Os valores negativos de torque para as rotações de 659,34 e 855,32 rpm foram devido à dificuldade do motor em girar o rotor por causa da inércia das pás. O torque gerado pelas pás estava maiores que a do mancal, isso significa dizer que era preciso fornecer torque no sistema ao invés dele fornecer torque, ou seja, mais energia tinha que ser jogada ao sistema para fazer as pás girarem. Para esses dois valores de rotação, foi necessário gerar um impulso para iniciar a rotação das pás.

Utilizando os dados da Tabela 3, foi possível mostrar como o torque médio resultantes das pás se comporta com relação a velocidade angular (n). Comportamento esse que pode ser mostrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Torque médio resultante das pás



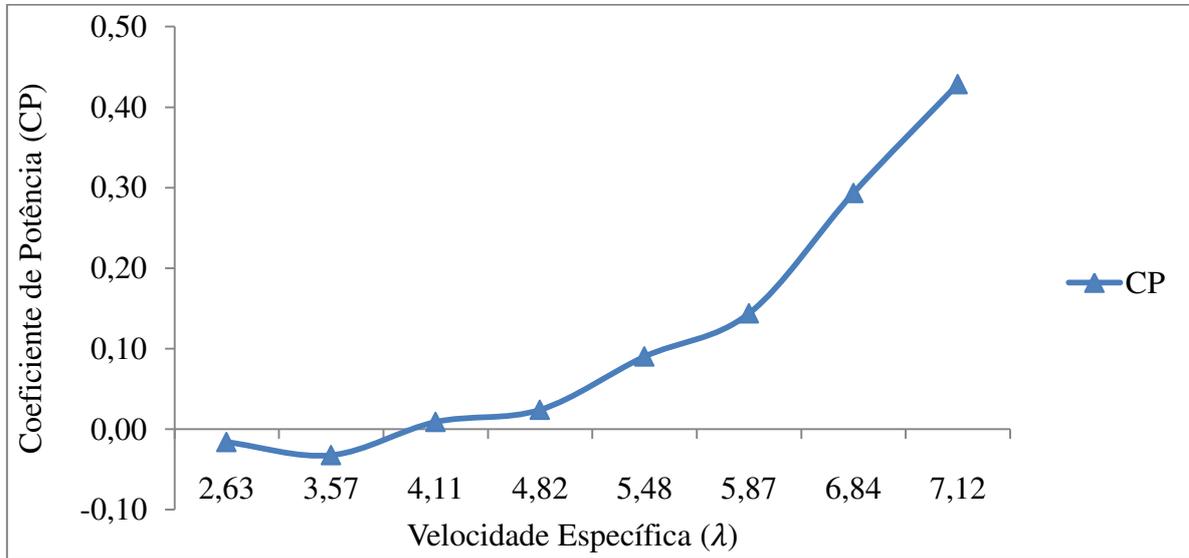
Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo o Gráfico 6 é possível notar que os valores de torque começam negativos para baixas rotações. Isso já era esperado devido ao problema gerado por essas tais rotações que já foi explicado anteriormente. Outro fato que o gráfico mostra, é que os valores de torque começam a aumentar a partir desses valores negativos, chegando a atingir o valor de 18,47 (mN.m) para $\lambda = 7,12$. Como as pás foram projetadas para $\lambda = 7$, o valor do torque deverá diminuir para λ maior do que 7. A explicação disso se deve ao fato que, para tais valores de velocidade específica as pás perdem sustentação. Infelizmente, não foi possível atingir valores de λ maiores que 7,12 devido à vibração intensa que o equipamento de teste experimentava. Por isso, foi preferível não trabalhar nessa faixa de valores para evitar possíveis acidentes.

6.4 Coeficiente de Potência do sistema

O coeficiente de potência (C_p) de um gerador eólico diz qual a fração da energia oferecida pelo o vento é convertida em energia elétrica, por tanto, quanto maior for o C_p , maior o rendimento do aerogerador. Usando os dados da Tabela 2 foi possível montar o Gráfico 7, que mostra a relação entre o coeficiente de potência e a velocidade específica.

Gráfico 7 – Coeficiente de Potência



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser visto no Gráfico 7, os valores de C_p começam negativos, devido aos torque negativos em baixas rotações. O gráfico também mostra que o maior valor C_p foi de 0,43 para $\lambda = 7,12$, ou seja, 43% da energia do vento poderia ser aproveitada para gerar energia.

6.5 Torque conjunto rotor - difusor

Para realizar as medições com o difusor, foi preciso construir um suporte para que o conjunto rotor-difusor ficasse à mesma altura da linha de centro do escoamento. A Figura 31 mostra o conjunto rotor-difusor com o suporte e a Figura 32, mostra todo o conjunto já pronto para os testes. O suporte foi projetado e construído por (MACÊDO, 2016).

Figura 31 – Suporte do Difusor



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 – Foto conjunto rotor-difusor



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 4 apresenta os dados do conjunto rotor-difusor obtidos ao longo de todo o experimento, onde podem ser observados os valores de rotação (n), velocidade específica de ponta (λ), Torque médio dos mancais (Q médio mancal), velocidade média de corrente livre (U médio), torque médio das pás (Q médio pás), torque médio resultante das pás (Q médio resultante pás) e Coeficiente médio de Potência (C_p médio).

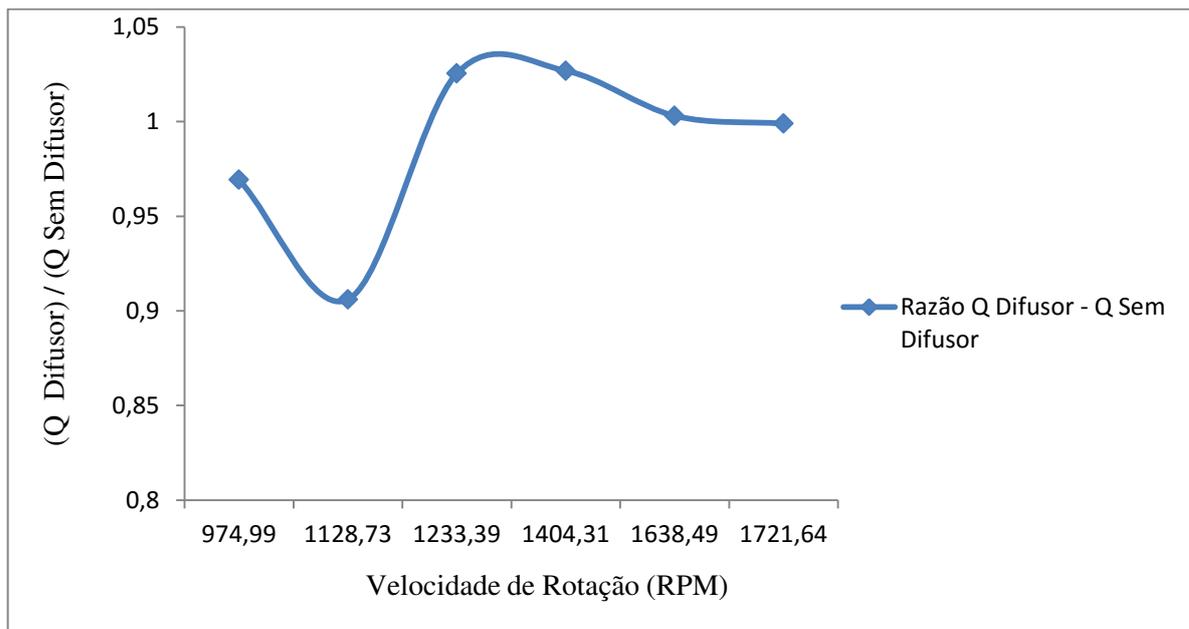
Tabela 4 – Parâmetros medidos do conjunto pás-difusor de $\lambda=7$

n (RPM)	λ	Q médio mancal	Q médio pás	Q médio resultante pás	U médio (m/s)	C_p médio
648,49	2,63	29,66	27,67	-1,99	4,89	-0,01
849,25	3,57	29,32	26,69	-2,63	4,73	-0,03
974,99	4,11	29,09	29,72	0,63	4,72	0,01
1128,73	4,82	28,26	29,61	1,35	4,66	0,02
1233,39	5,48	28,26	33,09	4,83	4,48	0,10
1404,31	5,87	27,91	35,56	7,65	4,76	0,15
1638,49	6,84	27,55	40,70	13,15	4,77	0,30
1721,64	7,12	27,45	45,90	18,45	4,81	0,43

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Gráfico 8 mostra o comportamento da razão (torque com difusor / torque sem difusor) com relação a velocidade de rotação dada em RPM.

Gráfico – 8 Razão de torque rotor com e sem o Difusor



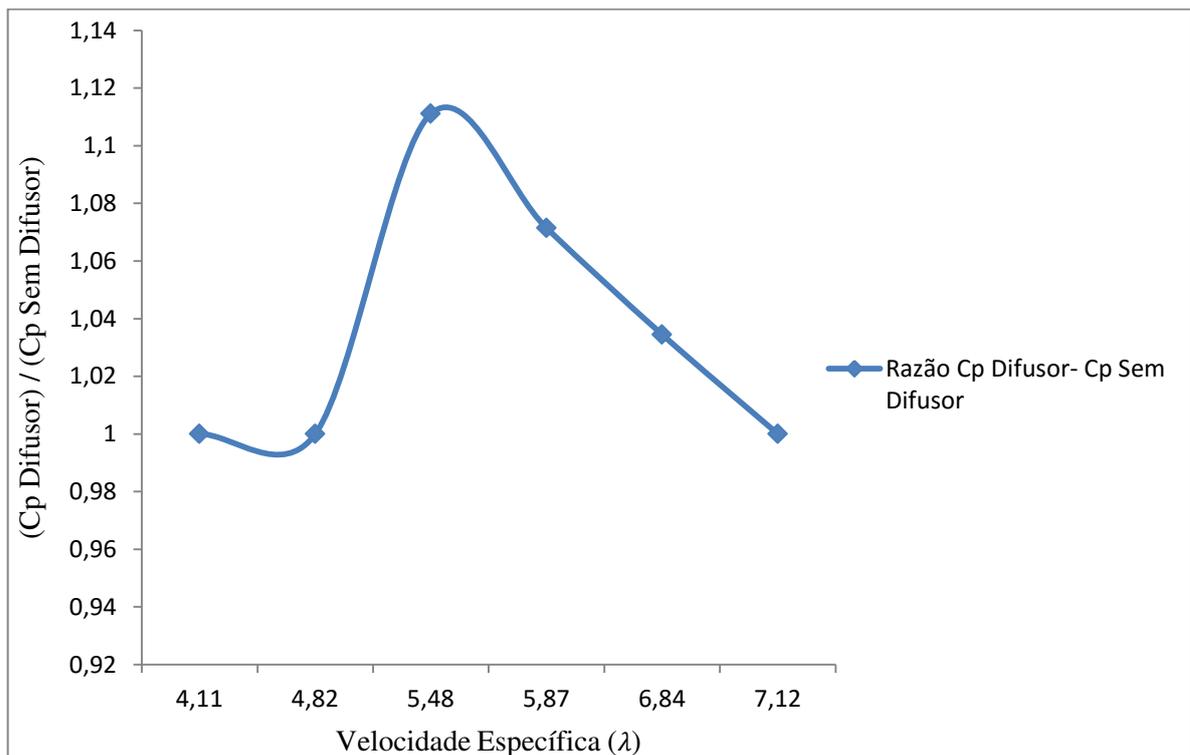
Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo Gráfico, é possível notar que os valores de torque com o difusor foram maiores que os valores sem o difusor para três valores de rotação (1233,39 , 1404,31 e 1638, 49RPM), pois para esses valores a razão foi maior do que 1. É importante lembrar que para a construção desse gráfico não foram considerados os valores negativos de torque.

6.6 Coeficiente de potência conjunto rotor - difusor

Para comparar o C_p do rotor com difusor e sem o difusor foi feito o Gráfico 9, mostra a relação entre a razão (C_p difusor / C_p sem difusor) e a velocidade específica de projeto λ .

Gráfico 9 – Razão de Coeficiente de Potência do rotor com e sem o difusor



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo Gráfico acima é possível notar que para $\lambda = 5,48$ a $\lambda = 6,84$, a curva sempre esteve acima de 1. Isso significa que para tais valores o C_p do rotor acoplado ao difusor foi maior em relação ao rotor convencional.

Já para os outros valores de λ (4,11, 4,82 e 7,12), o coeficiente de potencia foram iguais em ambos os casos. Mais uma vez não foram considerados, na construção do gráfico, os valores negativos.

A Tabela 5 mostra o aumento percentual do C_p do conjunto rotor-difusor em comparação com rotor convencional para cada λ , exceto para aqueles que o C_p deram negativos e iguais.

Tabela 5 – Aumento Percentual do C_p

λ	Aumento percentual CP
5,48	11,11%
5,87	7,14%
6,84	3,45%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pela tabela 5 e gráfico 9 é possível notar, para o experimento realizado, que o rendimento do conjunto de pás acoplado a um difusor foi superior em relação ao conjunto sem o difusor, verificando um aumento percentual máximo do coeficiente de potencia de 11,11% e um aumento de 3,45 % para λ próximo de 7 (λ de projeto).

O aumento esperado do coeficiente de potência era de duas vezes em relação ao rotor convencional (aumento de 100%), segundo Ozer Igra (1981, apud MACÊDO, 2016). Tal fato não foi comprovado pelo experimento, que teve um aumento máximo do CP de 11,11%.

Os valores de C_p encontrados nos testes foram relativamente baixos, porém satisfatórios. Isso significa dizer que melhorando o sistema de aquisição de dados, reduzindo o atrito e a vibração nos mancais da bancada de testes e se os experimentos forem realizados em ambientes mais controlados, como o túnel de vento, poderia ser encontrados valores mais significativos de C_p . Isso provavelmente podia justificar que o acoplamento do difusor em turbinas reais seria uma vantagem.

7. CONCLUSÃO

Foi construído um difusor com perfis aerodinâmicos com ângulo de ataque igual a 4°. Os perfis foram feitos utilizando madeira compensado. Para a fabricação do difusor foi utilizado espuma de poliuretano (devido ao seu baixo peso), que após ser lixado foi colocado uma camada de fibra de vidro, e em seguida, uma camada vinil para diminuir as irregularidades.

Foram medidos torques do conjunto rotor - difusor e do conjunto sem difusor, e em seguida, foi plotado um gráfico comparativo com as duas curvas no mesmo eixo. O rotor – difusor obteve resultados superiores em relação ao conjunto sem o difusor, para $\lambda = 2,63$, $\lambda = 3,57$, $\lambda = 5,48$, $\lambda = 5,87$ e $\lambda = 6,84$, ou seja, para 5 valores de λ , o rotor difusor teve um melhor desempenho.

Foram medidos coeficientes de potencia (C_p) para o conjunto rotor - difusor e do conjunto sem difusor, e em seguida, foi plotado um gráfico comparativo com as duas curvas no mesmo eixo. Foi Obtido um resultado de C_p para o rotor- difusor melhor do que o rotor convencional para $\lambda = 5,48$, $\lambda = 5,87$ e $\lambda = 6,84$

Através dos resultados obtidos, a tecnologia de inserir um difusor em uma turbina eólica tem uma grande potencialidade, pois houve uma melhora do coeficiente de potência. E dependendo de mais estudos, pode ser utilizada em grande escala em turbinas reais para aumentar a geração de energia.

Não foi possível obter o aumento esperado do C_p , provavelmente, devido a alguns problemas encontrados durante as medições com o conjunto rotor-difusor, o exaustor-ventilador produzia zonas de instabilidade, e como era preciso que ele ficasse próximo a bancada de testes para atingir a velocidade de 5 m/s ($\lambda = 7$), a formação da zona de baixa pressão na saída do difusor, necessária para aumentar o fluxo de vento na entrada do difusor, foi dificultada. O conjunto suporte - difusor vibrava muito, implicando em dados obtidos insatisfatórios. Outro fato que explica a não obtenção do aumento do CP esperado, foi que a construção do difusor foi praticamente feita de maneira manual, o que provavelmente pode ter acarretado erro humano em alguma fase do processo de construção.

Mesmo com os diversos problemas encontrados, ainda foi possível conseguir um aumento de 11,11% do coeficiente de potência utilizando o difusor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Airfoi Investigation Database* . Disponível em: <<http://airfoils.worldofkrauss.com/>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, São Paulo - ABEEólica. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 2002. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 24 mar. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 2.ed. Brasília: Atlas, 2005. 243 p.
- ANDERSON, J. D., Jr., *Fundamentals of aerodynamics*, 3a ed., New York, McGraw-Hill, 2001.
- ANIKET C., VINOD K.. *Computational Analysis of Shrouded Wind Turbine Configurations*. Aerospace Sciences. 2013.
- BRIGGS, A. S. *Projeto aerodinâmica de turbinas eólicas* 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2013.
- BURTON, T., SHAPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E.. *Wind Energy – Handbook*, Wiley. By John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England 2001. ISBN 0 471 48997 2
- CARNEIRO, W. F. *Experimento em Escala para Aperfeiçoamento do Rendimento de uma Turbina Eólica*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CAVALCANTE, M. S. *Aperfeiçoamento da Bancada de Testes para Protótipos de Pás Eólicas* 2016. Monografia (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

DUTRA, R., *Energia Eólica: Princípios e Tecnologia*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito/CRESESB. Brasília., 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2009, <http://www.epe.gov.br>.

FÓRUM CAPIXABA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E USO RACIONAL DA ÁGUA (FCMC), *Energia Eólica, em Portal do Governo do Estado do Espírito Santo*, Disponível em: <http://www.fcmc.es.gov.br/download/energia_eolica.pdf >. Acesso em: 24 mar. 2016.

FOREMAN, K.M., GILBERT, B., OMAN, R.A.. *Diffuser augmentation of wind turbines*. *Energy*. 1978, Pages 305–311

HANSEN, M., O., L. *Aerodynamic of Wind Turbine*, 2nd Edition, Earthscan. United Kingdom 2008. ISBN: 978-1-84407-438-9.

HAU, E., *Wind Turbine – Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd edition, Springer 2006. ISBN 103-540-24240-6.

IGRA, O. *Research and development for shrouded wind turbines*, *Energy Conversion and Management* 21, 1981

JHA, A. R.. *Wind Turbine Technology*, 1^a ed, Taylor & Francis Group, 2011

LOPES, A. S., Projeto, Desenvolvimento, Montagem e Testes de uma Estrutura de Medição de Eficiência de Pequenos Aerogeradores, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará.

MACÊDO, C. H.F. *Experiento em escala e comparação do desempenho de duas turbinas eólicas equipadas com difusor com diferentes angulos de ataque*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016

MANWELL, J.,F., MCGOWAN, J., G., ROGERS, A., L., 2009. *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*, 2nd Edition, Wiley. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom. ISBN: 978 – 0 – 470 – 01500 – 1.

PEREIRA, M. M. *Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante*. 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004.

TANGLER J.L, SOMERS DM. *NREL airfoil families for HAWTs*. In: *Proceedings of the American wind energy association wind power 95 conference*, Washington, DC; March 26–30, 1995.

TANGLER, J. L, 2000. The evolution of rotor and blade design. Conference paper "American Wind Energy Association". National Renewable Energy Laboratory (NREL), Palm Springs, California.

TOSHIMITSU,K., NISHIKAWA., K., HARUKI W., OONO, S., MANABU T., OHYA Y. *PIV Measurements of Flows around the Wind Turbines with a Flanged-Diffuser Shroud*. *Journal of Thermal Science* Vol.17, No.4 (2008) 375–380

World Wind Energy Association (WWEA). Disponível em: <<http://www.wwindea.org>>. Acesso em: 15 de março de 2015.