UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITARIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ATAMY REIS TANOUE

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DIFUSOR CÔNICO APLICADO A UM MICROGERADOR EÓLICO

ANANINDEUA
2018

ATAMY REIS TANOUE

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DIFUSOR CÔNICO APLICADO A UM MICROGERADOR EÓLICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica.
Orientador: Prof. Msc. Disterfano Lima Martins Barbosa

ANANINDEUA
2018

Dados Internacionais de CatalogaçãonaPublicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
GeradaautomaticamentepelomóduloFicat, medianteos dados fornecidospelo(a) autor(a)

T375e Tanoue, AtamyReis
ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DIFUSOR CÔNICO APLICADO A UM MICROGERADOR EÓLICO / Atamy Reis Tanoue. — 2018
59 f. :il. color

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.
Orientação: Prof. Me. Disterfano Lima Martins Barbosa

1. EnergiaEólica. 2. TurbinasEólicas com Difusores. 3. DifusoresCônicos. 4. Conversão de Energia. I. Lima Martins Barbosa, Disterfano, *orient.* II. Título

---

CDD 333.92

ATAMY REIS TANOUE

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DIFUSOR CÔNICO APLICADO A UM MICROGERADOR EÓLICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica da Universidade Federal do Para, Campus Universitário de Ananindeua como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica.

APROVADO EM: 02/08/2018.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientador Prof. Msc. Disterfano Lima Martins Barbosa
Faculdade de Ciência e Tecnologia / UFPA

_____

Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
Faculdade de Engenharia Industrial / UFPA

_____

Prof. Jouberson Leônidas da Rocha Moreira
Faculdade de Engenharia de Materiais / UFPA

_____

Engª. Elcilane Araújo de Freitas
Programa de C&T – Engenharia Física / UFOPA

Dedico este trabalho a minha família que proporcionou o apoio necessário para que esta pesquisa pudesse ser realizada, sem o suporte de vocês estes resultados não seriam possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a força regente do universo pois sem ela nada seria possível inclusive a minha existência.

Agradeço a minha família por me apoiar e me ajudar quando foi necessário, em especial a minha mãe Lucimar, ao meu padrasto Luiz e a minha tia Rosely.

Agradeço aos meus amigos pois nas diversas vezes em que o trabalho me consumiu eu pude contar com a compreensão e o cuidado deles para me manter firme e saudável.

Agradeço aos meus colegas e amigos de classe por terem disponibilizado parte do seu tempo em diversas vezes para discutir assuntos relacionados a temática deste trabalho e em especial agradeço a Miriane por me ouvir, entender e ajudar muito nesse processo de aprendizado. Aos Lucas e Talhes eu agradeço pelo trabalho, pois sem a ajuda de ambos eu não teria enfim realizado os experimentos necessários.

Agradeço aos meus professores pois sem eles não seria possível a existência deste trabalho e a obtenção de seus resultados, em especial agradeço ao meu professor, orientador e agora amigo, Disterfano Barbosa pela parceria, dedicação e compromisso demonstrados durante o desenvolvimento deste trabalho, sem seu apoio e competência não seria possível a realização das etapas deste estudo.

Ao professor Jerson Vaz agradeço pela disponibilização do laboratório o qual coordena bem como seus conhecimentos notáveis sobre a temática, sem sua colaboração muitas dúvidas não seriam sanadas.

“O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece”

(Benjamin Disraeli)

RESUMO

O difusor cônico instalado em volta da turbina causa um aumento na velocidade do vento que incide sobre o seu rotor, acarretando em um aumento de eficiência na geração de energia elétrica. Uma vez conhecido o comportamento do vento no interior do difusor, pode-se determinar a região ideal para a instalação da turbina (maiores velocidades), de modo a aproveitar a maior energia cinética disponível. Este aumento global na velocidade do vento que chega ao rotor da turbina ocasiona um aumento na extração de energia. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o aumento da geração de energia elétrica de uma turbina eólica com a instalação de difusores cônicos, além de um levantamento experimental acerca do comportamento do escoamento de ar em um difusor cônico. Desta forma, além de avaliar a influência da geometria do difusor na geração de energia elétrica, o trabalho busca levantar informações que complementem o modelo matemático proposto por Barbosa (2013), o qual prevê a distribuição de velocidades no interior do difusor em função de sua geometria. Os resultados obtidos por este trabalho indicaram que de fato há o aumento de tensão em função da presença do difusor em torno da turbina, o aumento de velocidade foi da ordem de 21%, enquanto que o aumento de velocidade tensão elétrica foi da ordem de 16%. Mostrou também que o comportamento obtido é compatível com a literatura disponível e com os resultados de trabalhos acerca da temática.

Palavras – chave: Energia Eólica, Difusores Cônicos, Turbinas Eólicas com Difusores, Conversão de Energia.

ABSTRACT

The conical diffuser installed around the turbine causes an increase in the speed of the wind that is incident on its rotor, causing an increase of efficiency in the generation of electric energy. Once the wind behavior inside the diffuser is known, it is possible to determine the ideal region for the turbine installation (higher speeds) in order to take advantage of the higher available kinetic energy. This global increase in wind speed reaching the turbine rotor causes an increase in energy extraction. The present work has the objective of evaluating the increase of the electric power generation of a wind turbine with the installation of conical diffusers, besides an experimental survey about the behavior of the air flow in a conical diffuser. In this way, in addition to evaluating the influence of the diffuser geometry on the generation of electric energy, the present work seeks to gather information that complements the mathematical model proposed by Barbosa (2013), which provides for the distribution of speeds within the diffuser in function of its geometry. The results obtained by this work indicated that in fact there is the increase of tension due to the presence of the diffuser around the turbine, the increase of velocity was of the order of 21%, while the increase of velocity electric tension was of the order of 16 %. It also showed that the behavior obtained is compatible with the available literature and the results of work on the subject.

Keywords: Wind Energy, Tapered Diffusers, Wind Turbines with Diffusers, Energy Conversion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Turbina Eólica 11
Figura 2 – Parque Eólico 11
Figura 3 – Parque eólico (turbinas eólicas com difusor) 12
Figura 4 – a) Moinho de vento b) Turbina eólica de eixo horizontal 17
Figura 5 – Capacidade mundial acumulada 2001 – 2017 19
Figura 6 – Ranking dos países com maior capacidade acumulada. 19
Figura 7 – a) Turbina de eixo horizontal b) Turbina de eivo vertical 21
Figura 8 – Turbinas de grande porte 21
Figura 9 – Turbinas de pequeno porte. 21
Figura 10 – Coeficiente de potência em função de λ 23
Figura 11 – Turbinas eólicas com difusores 24
Figura 12 – a) Concentrador de vórtices b) Turbina eólica com difusor a direita 24
Figura 13 – Difusores puramente cônicos 26
Figura 14 – Desenho das dimensões. a) Bocal-difusor b) Difusor-flange 27
Figura 15 – Experimento a) Bocal-difusor b) Difusor-flange. 27
Figura 16 – Coeficiente de desempenho da microturbina sem o difusor, com o difusor e com o bocal-difusor 28
Figura 17 – Estrutura de um túnel de vento 29
Figura 18 – Etapas da metodologia experimental de acordo com os objetivos propostos 30
Figura 19 – a) Modelo do difusor b) Molde para confecção 34
Figura 20 – Dimensões do molde do difusor 35
Figura 21 – Difusor finalizado 35
Figura 22 – Motor de DVD 36
Figura 23 – Molde do rotor (formado de 4 pás) 36
Figura 24 – Rotor de aço (formado de 4 pás) 37
Figura 25 – Cubo do rotor. a) Frente b) Verso 37
Figura 26 – Parafusos, porcas e arruelas 38
Figura 27 – Componentes utilizados para montagem 38
Figura 28 – Microturbina finalizada 39
Figura 29 – Desenho de projeto com as dimensões da estrutura de suporte da microturbina 39
Figura 30 – Estrutura de suporte da microturbina confeccionada em metalon 40
Figura 31 – Detalhe do mecanismo de suporte a microturbina 40

Figura 32 – Desenho de projeto com as dimensões da estrutura de suporte do difusor 41
Figura 33 – Estrutura de suporte do difusor confeccionado em metalon 41
Figura 34 – Detalhes da estrutura de suporte do difusor 42
Figura 35 – Plano de posicionamento da microturbina para ensaio 42
Figura 36 – Microturbina sem o difusor posicionada a frente do túnel de vento 43
Figura 37 – Túnel de vento 43
Figura 38 – Detalhes do aparato de aquisição 44
Figura 39 – Detalhes do tubo de pitot 44
Figura 40 – Mesa com recursos de apoio computacional 45
Figura 41 – Esquema de medição da velocidade no difusor 45
Figura 42 – Tubo de Pitot posicionado no interior do difusor 46
Figura 43 – Plano de posicionamento do tubo de Pitot para ensaio no interior do difusor 46
Figura 44 – Detalhes do plano de posicionamento (posições ao longo do difusor) 46
Figura 45 – Esquema de medição da tensão no difusor 47
Figura 46 – Microturbina com difusor posicionado na saída do túnel de vento 47
Figura 47 – Plano de posicionamento da microturbina no interior do difusor 48
Figura 48 – Pitot posicionado na saída do túnel de vento 48
Figura 49 – Valores de tensão medidos na microturbina de acordo com a posição 49
Figura 50 – Valores de velocidade obtidos para o difusor de 22,5º 51
Figura 51 – Variação de velocidade no difusor 52
Figura 52 – Tensão medida na microturbina com o difusor de acordo com a posição 53
Figura 53 – Variação de tensão x Variação de velocidade 54
Figura 54 – Razões de velocidades para difusores cônicos (5°, 22° e 40°). 55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 Justificativa 14
1.2 Objetivos 15
1.2.1 Objetivo geral 15
1.2.2 Objetivos específicos 15
1.3 Estrutura e organização do trabalho 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 Considerações sobre turbinas eólicas 17
2.1.1 Breve histórico das turbinas eólicas 17
2.1.2 Mercado eólico no mundo 18
2.1.3 Turbinas eólicas 20
2.2 Turbinas com difusores 24
2.3 Turbinas com difusores cônicos 26
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL 29
3.1 Materiais 31
3.2 Procedimento experimental 33
3.2.1 Construção do difusor cônico 33
3.2.2 Construção da microturbina acoplada ao microgerador 35
3.3.3 Estruturas de suporte 39
3.3.4 Medição da tensão elétrica sem o difusor 42
3.3.5 Medição da velocidade no difusor 44
3.3.6 Medição da tensão elétrica na microturbina com o difusor 47
4 RESULTADOS 49
4.1 Tensão elétrica na microturbina sem o difusor 49
4.2 Velocidade no interior do difusor 50
4.3 Tensão elétrica na microturbina com o difusor 52
4.4 Comparação entre o aumento de velocidade com o aumento de tensão elétrica 53
5 CONCLUSÃO 56
5.1 Sobre os resultados 56
5.2 Propostas de melhorias 57
REFERÊNCIAS 58

1 INTRODUÇÃO

No chamado Mundo Moderno em meio à incessante busca por novas fontes de recursos, um dos maiores desafios encontra-se no setor energético. Pois ainda hoje a maior parte da energia utilizada no mundo principalmente a elétrica que é utilizada no planeta é de origem não renovável como, por exemplo, os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), ou seja, não pode ser facilmente reposta pela ação humana ou pela natureza em um prazo útil.

Figura 1 – Turbina Eólica

Fonte: Revista Veja

A eletricidade que pode ser obtida por meio turbinas eólicas (Figura 1) desperta grande interesse em função de ser uma fonte renovável de energia e existir em abundância na natureza (Figura 2). Apresenta ainda como fator positivo, a possibilidade de implantação desta tecnologia em comunidades que não possuam acesso à energia elétrica por meio das redes usuais de distribuição, além de apresentar baixo impacto ambiental (PINHO et al, 2006).

Figura 2 – Parque Eólico

Fonte: Revista Veja

O aumento do consumo de energia e a crescente pressão econômica e ambiental têm justificado um planejamento mais rigoroso quanto ao uso de fontes alternativas de energia, tal como a eólica (FERREIRA, 2008). O aproveitamento da energia eólica ocorre por meio da conversão da energia cinética contida nos ventos em energia mecânica, e finalmente em energia elétrica por meio de um gerador. A quantidade de energia cinética contida em uma massa de ar em movimento depende da velocidade do vento, da área circular varrida pelo rotor da turbina e da massa específica do ar (HANSEN, 2008). A potência disponível na massa de ar em movimento (ou vento) é dada pela Equação 1.

$$P_d = \frac{1}{2}\rho . A . V_\infty^3 \quad (1)$$

em que (ρ) é a massa específica do ar, (A) é a área varrida pela turbina e (V_∞) é a velocidade incidente do vento sobre a turbina. Entretanto, apenas uma parte desta energia pode ser aproveitada para geração de eletricidade. Esta porção depende basicamente do coeficiente de potência da turbina, o qual por sua vez indica o rendimento da turbina.

A energia disponível no vento não pode ser integralmente convertida em energia mecânica, sendo assim, a quantidade máxima de energia que pode ser extraída é de 59,3%, valor conhecido como limite de Betz (HANSEN, 2008). Geralmente, em função da eficiência das pás do rotor e de perdas aerodinâmicas, as turbinas eólicas mais eficientes alcançam valores em torno de 40% (FOREMAN et al, 1979). Uma maneira de se melhorar a eficiência de uma turbina eólica é a utilização de difusores (Figura 2). Os difusores são dispositivos instalados em volta da turbina, que objetivam aumentar o fluxo de massa de ar que passa através de seu rotor.

Figura 3 – Parque eólico (turbinas eólicas com difusor)

Fonte: Adaptado de *Eartheasy* (2012)

O uso de difusores em turbinas eólicas tem como efeito o aumento da velocidade do vento que atinge o rotor, onde os resultados podem chegar a alcançar o limite de Betz (HANSEN, 2008). Como a potência disponível no vento é proporcional ao cubo da velocidade incidente no rotor da turbina (Equação 1), um pequeno aumento dessa velocidade resulta em um significativo aumento na produção de energia elétrica, justificando então a utilização de difusores em volta das turbinas convencionais.

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é desejável que a velocidade mínima dos ventos seja da ordem de 7 m/s, com uma altura acima de 50 m, onde segundo a Organização Mundial de Meteorologia, apenas 13% da superfície terrestre apresenta tais condições (GRUBB; MEYER, 1993). Desse modo, a avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime dos ventos.

Assim, para localidades que apresentam ventos em baixas velocidades, a utilização de difusores apresenta-se como uma alternativa bastante útil e eficiente. Entretanto, o uso de difusores em turbinas eólicas não é tão difundido no meio industrial quando comparado às turbinas tradicionais, devido ao custo para a construção do difusor e da estrutura que irá suporta-lo. Barbosa (2013) propôs uma formulação matemática para prever o comportamento da velocidade no interior de difusores cônicos aplicados às turbinas eólicas.

Em seguida Barbosa (2013) propôs uma formulação matemática mais completa, de modo a relacionar a eficiência do difusor cônico com as suas dimensões geométricas. O foco deste trabalho foi avaliar o comportamento da velocidade do vento sobre os difusores, mas não foram utilizadas turbinas para verificar e medir efetivamente este aumento de geração de energia elétrica.

Assim, o presente trabalho propõe analisar e avaliar o comportamento da geração de eletricidade em uma microturbina com difusor cônico. Foi realizado também um levantamento experimental para verificar a distribuição de velocidade no interior do difusor, e em seguida, comparar estes resultados com a formulação matemática proposta por Barbosa (2013, 2015), de modo a validar sua eficiência.

Espera-se que este estudo possa indicar as regiões internas ideais ao difusor para a instalação da turbina eólica de modo a aumentar a eficiência da geração de energia elétrica.

1.1 Justificativa

A relevância do tema deste trabalho se dá pela necessidade de se projetar sistemas eólicos mais eficientes a partir do uso de difusores instalados em turbinas eólicas. Assim, fez-se necessário avaliar o comportamento da geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas instaladas em difusores puramente cônicos, já que alguns trabalhos científicos mostram o aumento da velocidade do vento no interior do difusor a partir da variação de sua geometria.

Os resultados experimentais deste trabalho também irão fornecer dados para verificação e validação das formulações matemáticas disponíveis na literatura que objetivam prever a localização da região de maior velocidade do vento no interior do difusor.

Nos estudos contidos na literatura, a maioria dos difusores utilizados em turbinas é dotada de mecanismos que propiciam o aumento de sua eficiência, tais como flanges e perfis aerodinâmicos, apresentando maior complexidade construtiva, elevando o seu custo de fabricação. Assim, existem poucos estudos que tratam de difusores puramente cônicos, que apesar de possuírem eficiência pouco inferior aos demais tipos, apresentam menor custo e construção mais simples.

O potencial eólico é um aspecto de enorme importância no estudo da viabilidade de uma instalação. Através dele é possível determinar a potência disponível no vento, capaz de ser convertida em energia elétrica pela turbina eólica. A quantificação desta energia é fundamental, quer no planejamento financeiro do projeto, quer na verificação do real funcionamento das turbinas implantadas. Como existe um valor teórico mínimo para que a turbina eólica seja acionada e passe a gerar energia elétrica, regiões que apresentam valores de velocidade abaixo do ideal necessitam de dispositivos que possam gerar mais energia elétrica, com o mínimo de velocidade, no caso, os difusores.

Desse modo, o presente trabalho é relevante no sentido de compreender o comportamento da turbina e do escoamento no difusor para que se possam projetar sistemas eólicos eficientes, também para regiões com baixas velocidades de vento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento da geração de energia elétrica de um microgerador eólico com difusor cônico, e estabelecer uma relação entre o aumento de velocidade, causado pelo difusor, com o aumento da tensão elétrica esperado para o micro gerador.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir materiais de baixo custo para construção do aparato experimental.
- Quantificar a geração de energia da microturbina eólica sem o difusor cônico.
- Quantificar a geração de energia da microturbina no difusor cônico, variando a posição da microturbina no interior do difusor.
- Obter a razão de velocidades a partir da distribuição de velocidades no interior do difusor, sem a presença da microturbina.
- Obter analiticamente a razão de velocidades no difusor a partir do modelo matemático obtido por Barbosa (2013).
- Obter analiticamente a razão de velocidades no difusor a partir de modelos matemáticos disponíveis na literatura.
- Comparar o aumento de velocidade com o aumento de tensão elétrica gerados.

1.3 Estrutura e organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 compreende a apresentação da temática, aborda a importância de fontes renováveis de energia, da energia oriunda do vento, da utilização de difusores em turbinas eólicas, seguida dos motivos e objetivos a serem alcançados neste trabalho.

O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica. Nela discorre-se brevemente sobre o mercado eólico. A maior ênfase desse capítulo é mostrar as teorias que embasam os estudos sobre as turbinas eólicas e suas características, sobre os difusores e suas aplicações, observando as características, fazendo assim, a contextualização do objetivo deste trabalho, no que se refere à utilização de um difusor cônico em uma microturbina eólica.

No capítulo 3, é descrito o levantamento experimental realizado para obtenção das velocidades no interior do difusor. Estes resultados indicarão o comportamento da velocidade ao longo do difusor e permitirão observar o aumento da geração de energia a parti de sua utilização.

O capítulo 4 mostra a análise dos resultados obtidos para os experimentos realizados. A partir dos resultados experimentais obtidos, será possível verificar o aumento na geração de energia a partir deste modelo. Poderá ser visto também, como se comporta o escoamento de ar no interior de difusor cônico.

O capítulo 5 se destina a verificar se os objetivos propostos que foram alcançados. Neste capítulo, são feitas sugestões para trabalhos e pesquisas que possam aperfeiçoar o trabalho realizado proposto. E no último capítulo são indicadas as referências bibliográficas utilizadas para a construção deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações sobre turbinas eólicas

2.1.1 Breve histórico das turbinas eólicas

É difícil apontar precisamente o momento da história onde a energia proveniente dos ventos foi utilizada pela primeira vez. A energia do vento foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas pelo homem para auxiliar seus trabalhos. Os primeiros indícios de sua utilização datam 4000 A.C. pelo povo Sumério, e continuam no Egito em 2800 A.C., no Japão em 2000 A.C., na Babilônia, 1700 A.C., por volta de 1000 A.C. estão presentes nas navegações até que por volta de 200 A.C., fossem utilizados para bombear água e moer grãos, segundo se acredita pelos persas (TIBOLA, 2009).

Figura 4 – a) Moinho de vento b) Turbina eólica de eixo horizontal

Fonte: DUTRA (2008)

A partir do século XI, os moinhos como assim foram chamados, se desenvolveram com o intuito de garantir um melhor aproveitamento do recurso, em meio a Revolução Industrial, os moinhos de vento sofreram variadas modificações para se adaptarem às novas exigências é nesse período que são criados os primeiros sistemas de controle e de potência.

A produção de eletricidade através de energia eólica se inicia no final do século XIX, tendo a Dinamarca como pioneira (TIBOLA, 2009). Pequenos geradores eram utilizados para o abastecimento de baterias permitindo acesso de áreas rurais a energia elétrica.

Na década de 1950 com a expansão das redes de eletrificação as turbinas começam a deixar de ser produzidas. Mas quase um século depois, com a crise internacional do petróleo, por volta de 1970, o alto preço do combustível fóssil levou vários países importadores a investirem em pesquisas para criação de turbinas com maior capacidade de produção.

Tipicamente, essas máquinas poderiam fornecer até 1000 Watts de potência quando o vento estivesse soprando. Muitos países europeus construíram enormes geradores de vento. Durante os anos 1950 e 1960, os franceses construíram desenhos avançados de unidades de 100 kW a 300 kW.

Há cerca de 150 anos estudos científicos vêm sendo desenvolvidos para a conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica, atualmente a energia eólica firma-se cada vez mais como uma fonte de energia renovável ascendente em termos de produção de energia elétrica no curto prazo, ao considerarem-se os fatores de segurança energética, as questões de custo sócio ambiental e as problemáticas da viabilidade econômica (MARTINS et al, 2008).

De acordo com Dutra (2008), no decorrer dos últimos 15 anos, comercialmente, os aerogeradores eólicos no mundo se desenvolveram rapidamente tanto na tecnologia como nos tamanhos. O mercado hoje oferece diversos tipos e modelos que estão à disposição no mercado, frente à demanda de novos projetos de parques eólicos.

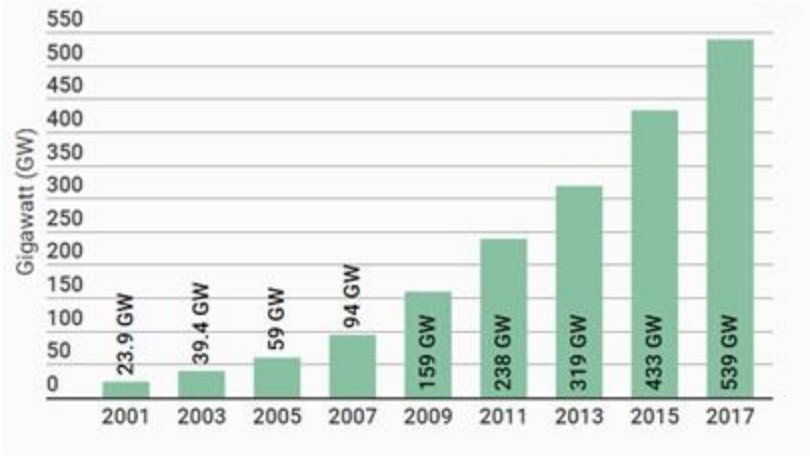
2.1.2 Mercado eólico no mundo

As informações acerca da capacidade de geração de eletricidade por energia eólica no mundo se tornaram documentadas a partir do ano de 1980 com um montante de 7 MW (MME, 2017 apud LAMARCA, 2018).

O Conselho Global de Energia Eólica (GWEC, na sigla em inglês) divulgou no início do ano de 2018 as estatísticas referentes ao mercado anual do setor. Em 2017, o mundo instalou um total de 52,57 *gigawatts* (GW) de potência, aumentando à produção mundial para 539,58 GW de capacidade instalada global, o investimento financeiro total no ano foi de aproximadamente 107 bilhões de dólares (GWEC, 2018).

O aumento da potência instalada no mundo pode ser visualizado na Figura 5.

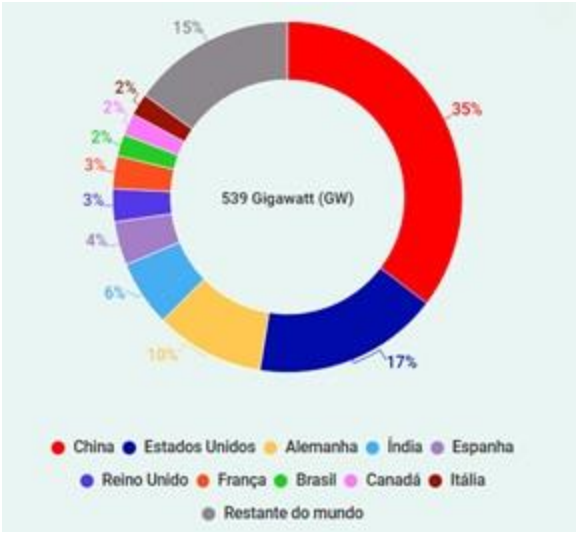
Figura 5 – Capacidade mundial acumulada 2001 – 2017



Fonte: Adaptado de GWEC (2018)

Dentre as vantagens do uso de fontes renováveis no país, podemos destacar o fator de capacidade produtiva do setor, que já ultrapassa a média mundial, além disso a cadeia produtiva que atualmente é 80% nacionalizada, gerou no ano de 2017 mais de 30 mil postos de trabalho. Segundo a ABEEólica "Até 2020, considerando os contratos assinados e leilões já realizados, vamos chegar a 18,63 GW e esse número ainda vai crescer. Hoje, as eólicas são a opção mais competitiva, conforme resultado do último leilão".

Figura 6 – Ranking dos países com maior capacidade acumulada.



Fonte: Adaptado de GWEC (2018)

O cenário positivo se consolida quando apesar das crises políticas e econômicas vivenciadas pelo país, o Brasil instalou mais de 2 GW em capacidade de energia eólica (EPE, 2017). No ranking dos dez países com mais capacidade de energia eólica no acumulado, o país subiu uma posição e aparece agora em oitavo na lista (Figura 6), com 12,76 GW, ultrapassando o Canadá, que está com 12,39 GW.

Sob esta perspectiva no cenário mundial, que a energia eólica avança com força no alto-mar. Análise recente da consultoria *Navigant Research* indica que a indústria eólica global instalou 3,3 *gigawatts* (GW) de capacidade *offshore* em 2017, elevando o total mundial para quase 17 GW no acumulado. Nos próximos cinco anos, o mercado global de energia eólica *offshore* deve instalar mais de 24 GW de nova capacidade, atingindo no acumulado mais de 40 GW até o final de 2022.

2.1.3 Turbinas eólicas

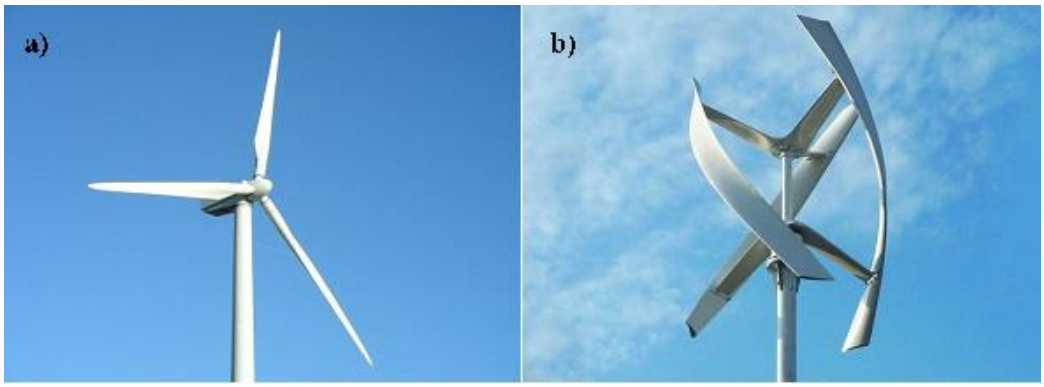
As turbinas eólicas são definidas como equipamentos que absorvem a energia cinética contida no vento e a convertem em energia cinética de rotação do rotor da turbina. Parte desta energia é convertida em energia elétrica por meio de um gerador elétrico. A energia eólica é resultado da transformação de parte do efeito térmico solar em energia cinética da atmosfera e por conta da variação da radiação solar ao redor do mundo ocasiona o deslocamento das camadas de ar, ou seja, os ventos. Contudo somente uma parte dessa energia é recuperável (SILVA, 2013). As turbinas podem ser classificadas em diversas categorias.

Quanto ao eixo de rotação em torno do qual as pás giram, podem ser classificadas em Turbinas de Eixo Horizontal-VAWT (V*ertical Axis Wind Turbine*) e Turbinas de Eixo Horizontal-HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*). Outra forma de classificar as turbinas é em função da quantidade de energia gerada, podendo ser de: pequeno, médio e grande porte. As turbinas de pequeno porte geram potência inferior ou igual a 500 kW, geralmente utilizadas em propriedades rurais, fazendas e aplicações remotas.

As turbinas de médio porte geram potência na faixa de 500 a 1000 kW, com aplicações em pequenas comunidades e sistemas híbridos. As turbinas de grande porte geram potência igual ou superior a 100 kW (ou 1 MW), com aplicações em parques eólicos e geração distribuída (DUTRA, 2008).

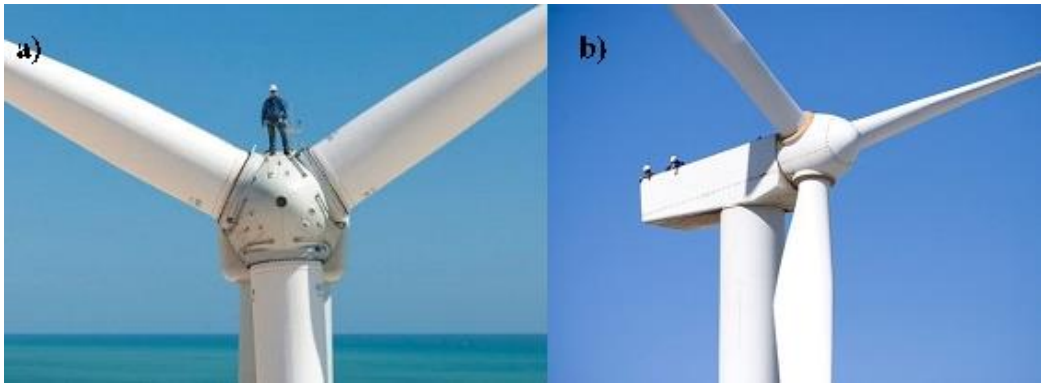
As Figuras abaixo mostram alguns tipos de turbina eólica:

Figura 7 – a) Turbina de eixo horizontal b) Turbina de eivo vertical



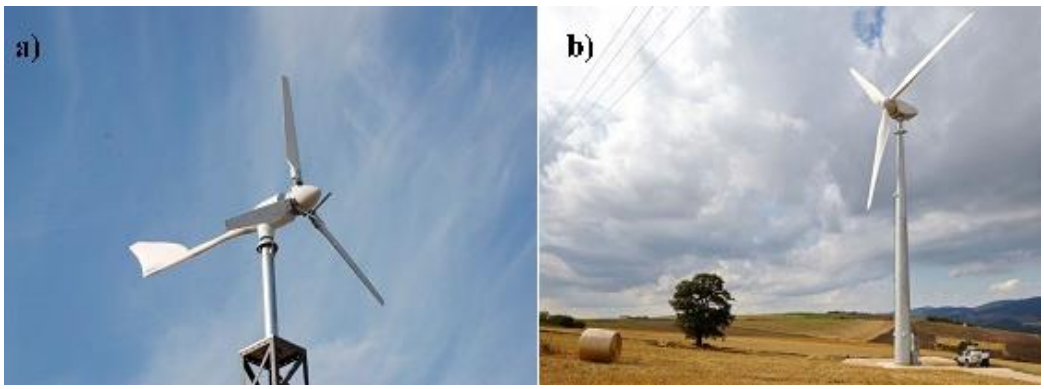
Fonte: Adaptado de GWEC (2018)

Figura 8 – Turbinas de grande porte



Fonte: Adaptado de GWEC (2018)

Figura 9 – Turbinas de pequeno porte.



Fonte: Adaptado de GWEC (2018)

O coeficiente de potência (C_p) de uma turbina é definido como a relação entre a energia extraída do vento pela turbina e a energia disponível no vento:

$$c_P = \frac{P_{ext}}{P_d} \tag{2}$$

em que P_{ext} é a potência extraída pela turbina e P_d é a potência disponível no vento.

Assim pode-se reescrever a potência extraída por uma turbina como:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} c_P \rho A V_\infty^3 \tag{3}$$

em que ρ é a massa específica do ar, *A* é a área varrida pela turbina e V_∞ é a velocidade

O coeficiente de potência representa a eficiência aerodinâmica da turbina eólica e depende do perfil aerodinâmico dos aerofólios das pás do rotor, assim como da velocidade de vento e da velocidade rotacional do rotor.

No entanto, existe um valor máximo para o coeficiente de potência que nenhuma turbina mesmo em seu melhor desempenho pode exceder. Esse valor é conhecido como limite de Betz. Em 1926, o físico alemão Albert Betz, publicou o livro "Energia Eólica" no qual afirmou que uma turbina eólica ideal só pode diminuir a velocidade do vento em 2/3 de sua velocidade original, ou seja, não é possível converter mais do que 16/27 (ou 59%) da energia cinética contida no vento (SILVA, 2013).

Assim, o coeficiente de potência teórico máximo para uma turbina é:

$$c_{P,máx} = 0{,}59 \tag{4}$$

Este é o valor máximo obtido através da Teoria do Disco Atuador (HANSEN, 2008). Atualmente, verifica-se que em média as HAWTs operam com um coeficiente de potência real entre 3% e 45% (GALIZIA, 2004). Este coeficiente é então reduzido ainda mais depois de considerar as perdas mecânicas nos elementos mecânicos do sistema de transmissão, tais como rolamentos, engrenagens, ente outros (FLOYD, 2016).

Uma formulação mais completa define o coeficiente de potência como:

$$c_P = \frac{8}{\lambda^2}\int_0^{\lambda} a'(1-a)x^3 dx \tag{5}$$

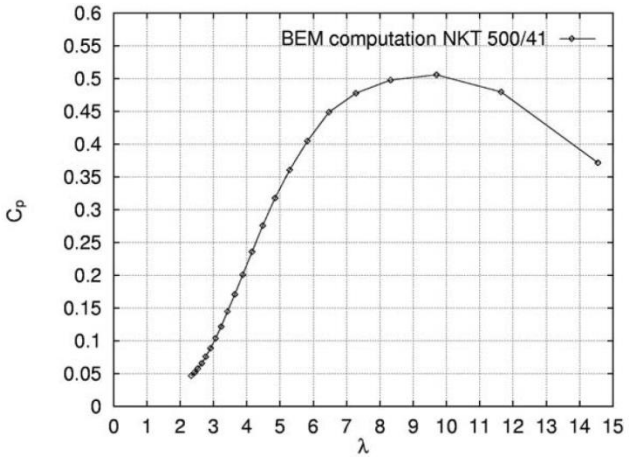
em que λ é a razão de ponta de pá, e *x* é a razão de velocidade local, definidos por a como fator de indução axial, a' como fator de indução tangencial

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty} \tag{6}$$

$$x = \frac{\omega r}{V_\infty} \tag{7}$$

em que ω é a velocidade de rotação do rotor da turbina; r é a posição radial; R é o raio da turbina e V_∞ é a velocidade de escoamento livre. A Figura 10 mostra a relação entre a TSR e o coeficiente de potência:

Figura 10 – Coeficiente de potência em função de λ



Fonte: HANSEN (2008)

2.2 Turbinas com difusores

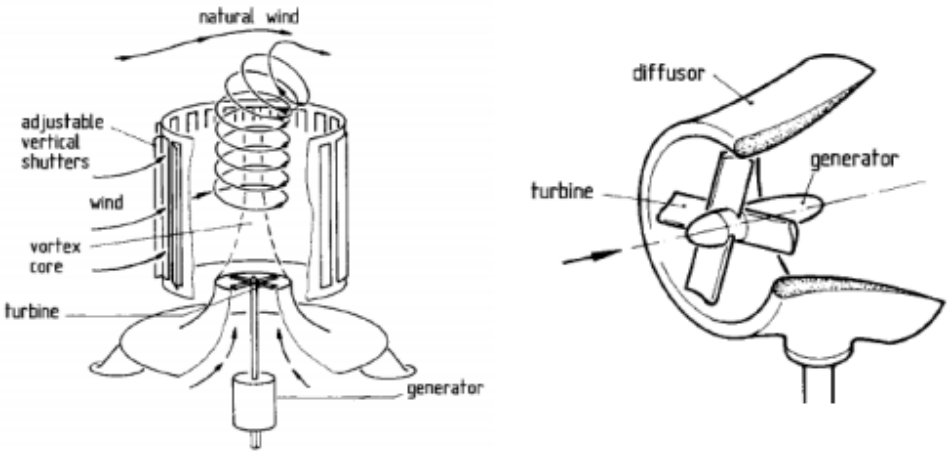
As turbinas eólicas com difusores (Figura 11) conhecidas por *DAWTs* (*Diffuser Augmented Wind Turbine*), são capazes de aumentar a produção de energia quando comparadas a turbinas de mesmo diâmetro. Os difusores são dispositivos instalados em volta da turbina, com o objetivo de aumentar a velocidade do vento incidente sobre a turbina.

Figura 11 – Turbinas eólicas com difusores

Fonte: Jornal do Brasil (http://www.jb.com.br)

A tendência geral da última década no uso de turbinas de pequeno porte é de crescimento contínuo como indicam os dados do mercado nos últimos anos. As turbinas eólicas de pequeno porte são instaladas em baixas altitudes e em ambientes que normalmente apresentam muitos obstáculos, afetando significativamente a intensidade e direção do vento (LOPES, 2012).

Figura 12 – a) Concentrador de vórtices b) Turbina eólica com difusor a direita



Fonte: SHAPOVAL (2017)

Outra maneira de alcançar o aumento de desempenho é adicionando uma estrutura estática "estator" rotacional (Figura 12), que induz uma aceleração do fluxo que passa pelo plano do rotor (SHAPOVAL, 2017).

A relação entre os coeficientes de potência da turbina sem e com difusor é (HANSEN, 2008):

$$c_{P,D} = \varepsilon \frac{c_P}{1-a} \tag{8}$$

em que ε é a razão de velocidades, definida por:

$$\varepsilon = \frac{V_i}{V_\infty} \tag{9}$$

em que V_i é a velocidade induzida que incide sobre o rotor.

A ideia de usar um difusor para aumentar a potência de uma máquina eólica não é recente, já nos anos 20, Albert Betz em seu trabalho concluiu que o uso do difusor não era uma solução viável por conta do custo adicional. Isso desencorajou os pesquisadores da época, até que em meados da década de 50, baseando-se no trabalho de cientistas japoneses, Lilley (1956) publicou em seu trabalho teórico que o coeficiente de expansão da geometria do difusor e o coeficiente de pressão negativa na saída do mesmo, são os fatores que podem melhorar o desempenho de uma turbina convencional até 65%.

Ao mesmo tempo, Kogan et al. (1961, 1963) conduziu uma série de experimentos sobre aqueles que analisaram diferentes parâmetros geométricos do difusor em forma de sino. A pesquisa sobre DAWT foi reativada, após a crise do petróleo de 1973, quando se experimentou um difusor construído a partir de um perfil NACA, adicionando uma aba sob a forma de um anel para controlar a separação do fluxo, infere que o seu projeto testado em um Túnel de vento, produziu duas vezes mais energia em comparação com uma turbina ideal sem difusor. (IGRA, 1976, 1977a, 1977b). Do final dos anos 80 ao início dos anos 90, B.L Gilbert, K.M. Foreman e R.A. Omã publicaram em um relatório técnico e em vários outros trabalhos o resultado da análise de várias geometrias de difusores com um grande ângulo de abertura e controle da camada limite (SHAPOVAL, 2017).

Os testes experimentais indicaram como resultado um aumento de potência em comparação com uma turbina convencional sem difusor. Eles apontaram que esse aumento de energia se dá em função de um aumento de pressão dentro do difusor, e o efeito da turbulência externa do fluxo, produz pressão sob atmosférica na saída do difusor. Da mesma forma, eles analisaram aspectos econômicos da aplicação DAWT, indicando que o uso de difusor poderia ser viável para turbinas de pequeno porte, ao invés de seu uso em grandes turbinas eólicas aumentariam significativamente seu custo. (SHAPOVAL, 2017).

2.3 Turbinas com difusores cônicos

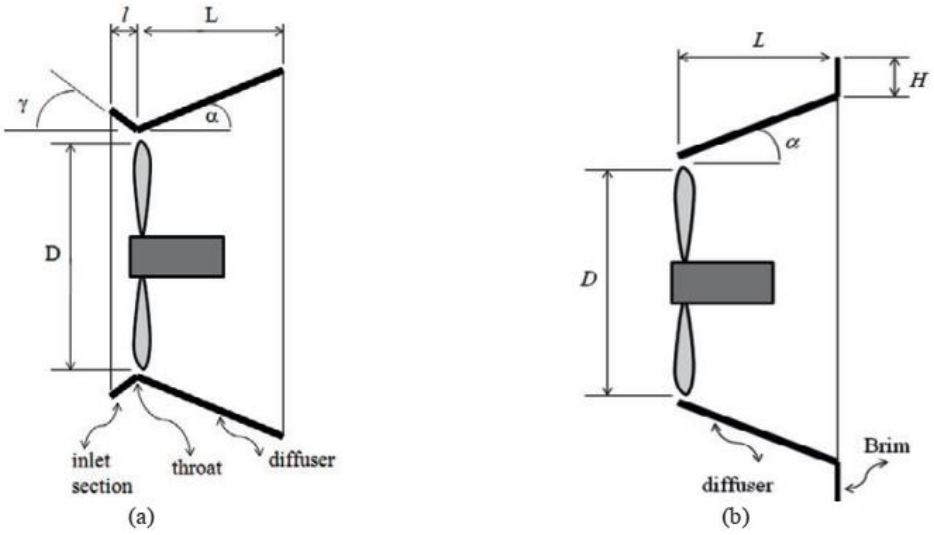
O uso e as aplicações de difusores puramente cônicos (Figura 13) aplicados a turbinas eólicas são restritos, no entanto é possível observar alguns resultados obtidos no uso de algumas de suas variações.

Figura 13 – Difusores puramente cônicos

Fonte: BARBOSA (2013)

No trabalho de Kosasih e Tondelli (2012) foram investigados os desempenhos do uso do difusor a partir de três características geométricas diferentes: o difusor cônico, a combinação bocal-difusor e a combinação difusor-flange. Na figura 14 é possível observar as dimensões de duas das geometrias mencionadas.

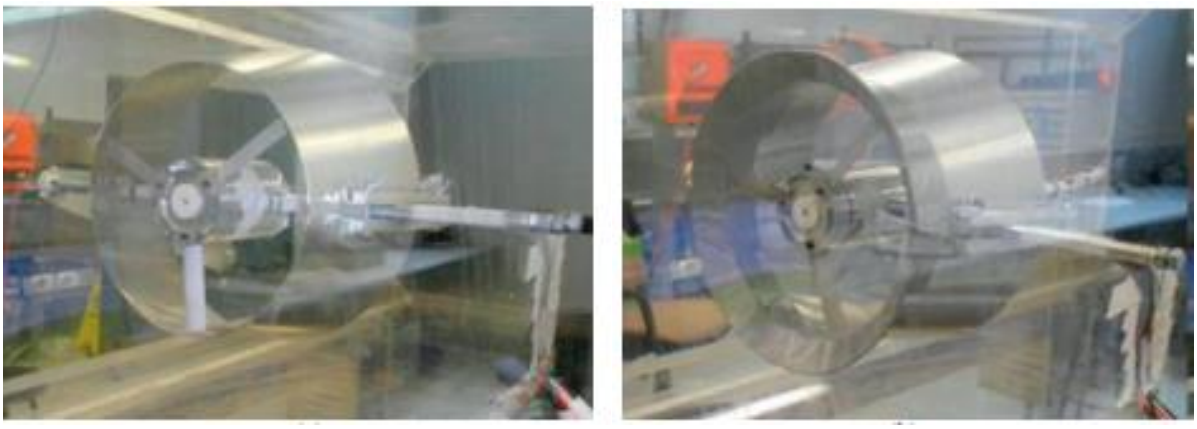
Figura 14 – Desenho das dimensões. a) Bocal-difusor b) Difusor-flange



Fonte: KOSASIH e TONDELLI (2012)

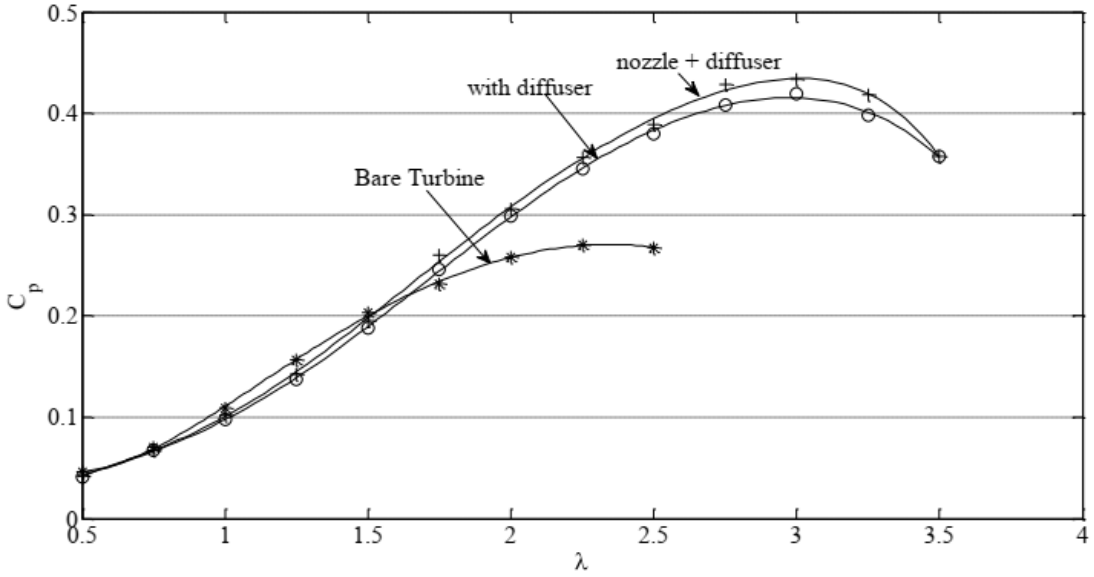
Os resultados obtidos confirmaram que o uso do difusor em uma microturbina melhora substancialmente seu desempenho em aproximadamente 60% se comparado com a turbina sem o difusor, já o desempenho registrado com o uso da combinação bocal-difusor foi de 63%, neste caso ligeiramente melhor que o difusor puramente cônico. O uso da combinação difusor-flange também apresentou melhorias substanciais no desempenho (KOSASIH e TONDELLI, 2012). É possível visualizar os modelos reais utilizados na figura 15.

Figura 15 – Experimento a) Bocal-difusor b) Difusor-flange.



Fonte: KOSASIH e TONDELLI (2012)

Figura 16 – Coeficiente de desempenho da microturbina sem o difusor, com o difusor e com o bocal-difusor



Fonte: KOSASIH e TONDELLI (2012)

A relação de velocidades aumentou em 33% com o uso do difusor e da combinação bocal-difusor quando comparado aos resultados da turbina sem o difusor. No entanto, ao contrário do difusor apenas, o aumento da combinação bocal-difusor manteve muito bem seu desempenho sob o influxo, apenas com pequenas diminuições no coeficiente máximo de desempenho (KOSASIH e TONDELLI, 2012).

Em um contexto semelhante, Barbosa (2013) realizou um trabalho experimental com aporte matemático sobre o uso de difusores em turbinas eólicas como forma de melhorar seu desempenho, no entanto diferente de Kosasih e Tondelli (2012) em seu estudo ele utilizou difusores de geometria puramente cônica, os resultados e comparações resultantes de seus trabalhos foram constituídos apenas pela variação dos ângulos e não contavam com a presença física de uma turbina, somente levou em conta aspectos e teorias que a representariam. Demonstrando assim que o uso de difusores e suas variações aplicadas a uma microturbina eólica, não só melhora seu desempenho, como pode apontar as características ideais de geometria do difusor (*L/D* ou *H/D*) onde (L) representa o comprimento, (D) o diâmetro e (H) a altura que podem ser usadas em outros projetos, tornando-a útil e adequada a variados locais e suas condições.

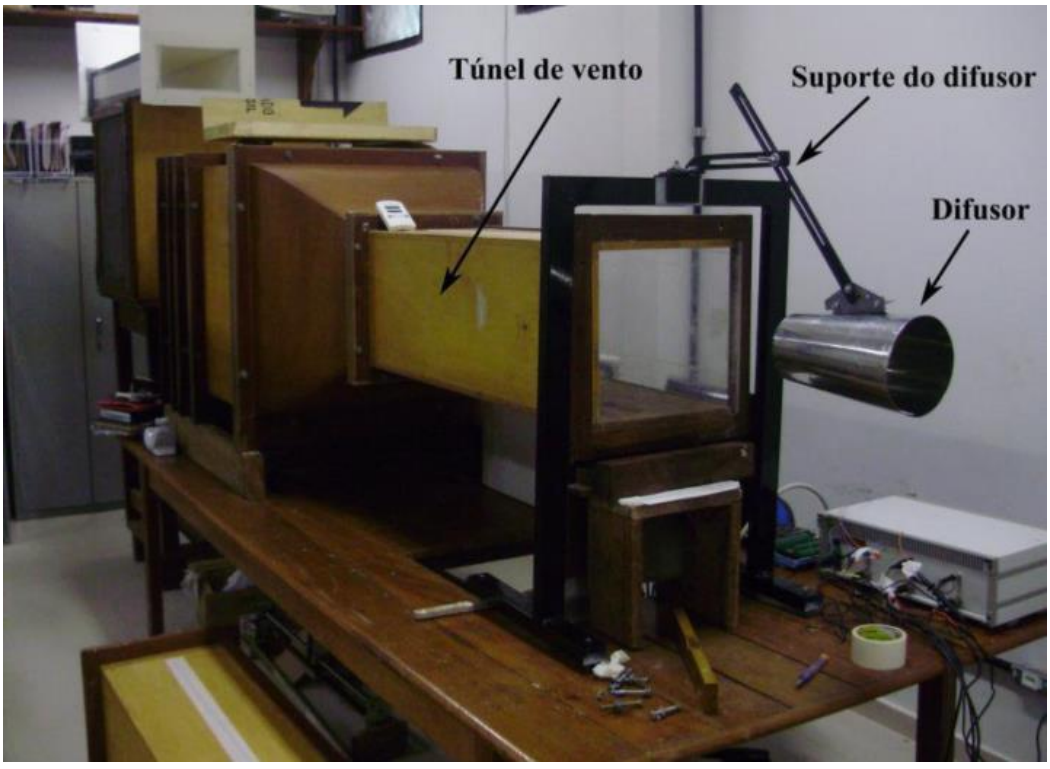
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para se alcançar os objetivos do presente trabalho, foi necessário construir o aparato experimental com matérias de baixo custo e/ou reaproveitáveis. O túnel de vento foi construído a partir de um segundo Trabalho de Conclusão de Curso, e devidamente validado de modo que o passo a passo de sua construção não será abordado aqui. Os demais materiais tais como motor de DVD, motor de impressora, chapas de aço, foram obtidos a um custo bastante reduzido, de modo a permitir a reprodução destes resultados de maneira mais fácil.

O presente trabalho é baseado no trabalho de Barbosa (2013), o qual ensaiou três difusores cônicos externamente ao túnel de vento. Do mesmo modo, aqui, o ensaio será feito na tentativa de reproduzir as mesmas condições de operação do trabalho de Barbosa (2013).

Neste capitulo, é feita uma descrição resumida dos equipamentos utilizados na medição das velocidades, potência elétrica, assim como, os equipamentos que foram construídos para condução do trabalho.

Figura 17 – Estrutura de um túnel de vento



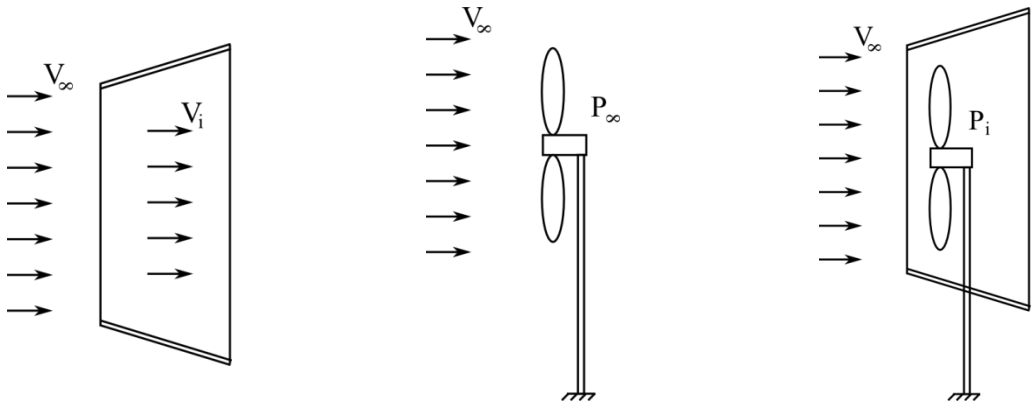
Fonte: BARBOSA (2013)

Etapas se fizeram necessárias para que todo o aparato experimental fosse produzido de forma simples, porém adequada, sendo assim, a fim de alcançar os objetivos propostos por este trabalho foi definida uma sequência de atividades a serem executadas para tal.

Segue um resumo da metodologia deste trabalho:

- Definir os materiais de baixo custo para a construção do aparato experimental.
- Construir uma microturbina eólica com gerador de baixa potência.
- Construir um difusor cônico com ângulo de abertura de 15°.
- Construir as estruturas de suporte tanto da turbina quanto do difusor.
- Medir o aumento de velocidade apenas do difusor com o auxílio do tubo de pitot, definindo a posição em que ocorre a velocidade máxima, figura 18 (a).
- Medir a geração de energia elétrica da turbina sem o difusor, figura 18 (b).
- Medir a geração de energia elétrica da turbina com o difusor variando a posição da turbina no seu interior, figura 18 (c).
- Relacionar a o aumento de velocidade com o aumento de tensão elétrica gerada.
- Comparar a distribuição de velocidades obtida com o resultado analítico de Barbosa (2013).

Figura 18 – Etapas da metodologia experimental de acordo com os objetivos propostos



a) b) c)

Fonte: Próprio autor

3.1 Materiais

Para o presente trabalho, foram construídos: a) um difusor cônico; b) um microgerador eólico; c) uma estrutura de suporte para o difusor; e d) uma estrutura de suporte para o microgerador.

Para a construção dos componentes anteriormente citados foram necessários os seguintes materiais:

a) Difusor cônico
   - Chapa de aço (0.3 mm de espessura)
   - Parafusos de fixação (2 mm de diâmetro)
   - Porcas sextavadas
   - Arruelas

b) Microgerador eólico
   - Motor de DVD (25 mm de diâmetro x 10 mm de altura – tensão nominal 2 V)
   - Adaptador de DVD para o rotor
   - Parafusos de fixação (2 mm de diâmetro)
   - Porcas sextavadas
   - Arruelas
   - Rotor (chapa de aço de 0.3 mm)

c) Estrutura de suporte do difusor
   - Tubos de metalon de seção retangular (30 mm x 50 mm)
   - Parafusos
   - Porcas e arruelas

d) Estrutura de suporte da turbina
   - Tubos de metalon de seção retangular (30 mm x 50 mm)
   - Tubos de metalon de seção quadrada (20 mm x 20 mm)
   - Parafuso sem fim

Para o presente trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Túnel de Vento
- Tubo de Pitot (TPL – 06 – 500 – T)
- Transdutor de diferença de pressão (498,18 Pa)
- Fonte chaveada (12V, 1 A)
- Microcomputador
- Multímetro Digital

Segue uma breve descrição dos principais componentes:

Chapa de aço: Uma chapa de aço galvanizado é um corpo de metal que recebeu um tratamento com processos químicos adicionais com o intuito de protege-lo de diversos elementos naturais. Neste trabalho a espessura da chapa utilizada na construção de diversos componentes foi de 0.4 mm.

Parafusos sextavados com porcas e arruelas: é uma peça metálica em formato cônico ou cilíndrico, sulcada em espiral ao longo de sua face externa. Tem por finalidade ser o elemento de fixação de duas ou mais superfícies, combinadas ou em junções diferentes, neste trabalho são utilizados em associação ao uso de porcas e arruelas a fim de garantir uma maior fixação dos elementos.

Microgerador eólico: Pequeno sistema de geração elétrica de baixa potência que a partir da força do vento transforma energia mecânica e produz eletricidade. Basicamente constituído por um **Motor de DVD** de diâmetro 25 mm por 10 mm de comprimento. Tensão Nominal: 6 V (corrente contínua).

Tubos de metalon de seção retangular e quadrada: Trata – se de um tubo de aço em formato retangular muito utilizado na área industrial, pois são altamente resistentes a forças e efeitos tanto na horizontal quanto na vertical. Neste trabalho as sessões dos tubos de metalon retangular (30mm x 50 mm) e quadrada (20mm x 20mm).

Estrutura de suporte para o difusor e para microturbina: É um tipo de suporte utilizado para posicionar o difusor e a microturbina diante da saída do túnel de vento.

Parafuso sem fim: É um tipo de parafuso, onde o movimento circular gerado pelo parafuso proporcionara a movimentação da estrutura de aporte da microturbina eólica dentro da extensão do difusor, bem como permitirá o seu posicionamento em frente à sessão de testes neste caso o túnel de vento.

Túnel de Vento: Instalação que tem por objetivo simular o efeito do escoamento de ar sobre ou ao redor de corpos sólidos. A velocidade do escoamento de ar no túnel de vento é controlada por um inversor de frequência, que varia a rotação do ventilador que movimenta o ar. A seção transversal do túnel de vento utilizado neste trabalho é de 500 x 500 mm.

Transdutor de diferença de pressão: também conhecido como transmissor de pressão, é um equipamento que converte a pressão em um sinal elétrico analógico. A pressão aplicada ao transdutor de pressão (a partir do tubo de Pitot) produz uma deflexão do diafragma, que causa deformação aos sensores. A deformação produzirá uma alteração de resistência elétrica proporcional à pressão.

Tubo de Pitot: Instrumento que tem por função, medir a velocidade de fluidos em suas formas liquida ou gasosa. Neste trabalho o instrumento utilizado apresenta 6 mm de diâmetro e 50 cm de extensão de comprimento.

Microcomputador: É uma máquina eletrônica capaz de manipular informações. Neste trabalho o equipamento serviu de apoio para o desenvolvimento de variadas atividades vitais da pesquisa, desde a aquisição de aquisição de dados até a análise e o registro dos mesmos.

Multímetro Digital: ou multi-teste como também é conhecido, é um aparelho que mede diferentes grandezas concernentes a uma corrente elétrica, tais como corrente, voltagem, resistência. Neste trabalho foi utilizada a sua versão analógica com a finalidade de medir os dados gerados pela microturbina em associação ao microgerador diante da sessão de testes do túnel de vento.

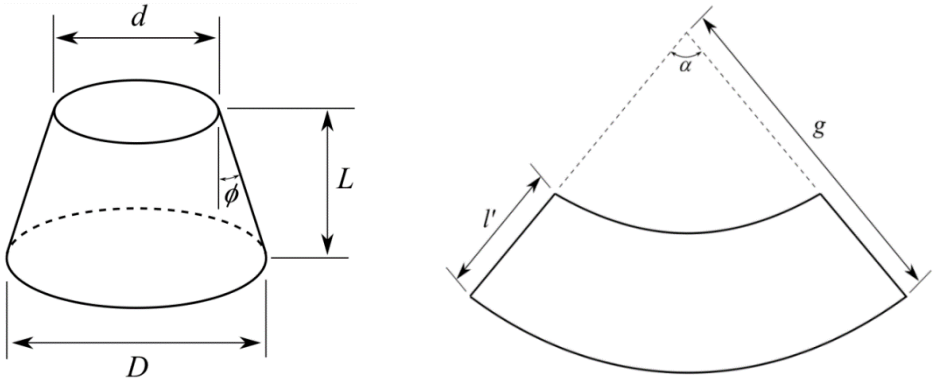
3.2 Procedimento experimental

Para execução do presente trabalho, foram construídos variados componentes, as etapas de sua construção a partir dos materiais já citados serão descritos nos itens a seguir.

3.2.1 Construção do difusor cônico

O difusor foi construído a partir de uma chapa de aço galvanizado de 0,4 mm de espessura. Para se obter a geometria desejada, as dimensões espaciais do difusor foram convertidas em dimensões no plano, em um molde como pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 – a) Modelo do difusor b) Molde para confecção



a) b)

Fonte: Próprio autor

Sabendo que o valor de $\phi =$ 15º, os valores l', g, α , são calculados a partir de:

$$l' = \sqrt{L^2 + (R-r)^2}$$

$$g = \frac{Rl'}{R-r}$$

$$\alpha = \frac{90r}{g}\left(\frac{4L\tan\phi}{r} + 1\right)$$

Em que:

$$r = \frac{d}{2} \qquad R = \frac{D}{2}$$

Valores obtidos:

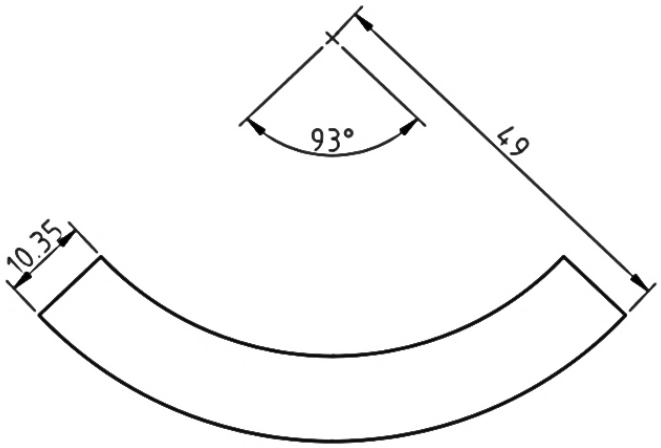
$l' =$ 10,35 cm

$g =$ 49 cm

$\alpha =$ 93º

Definidas as dimensões do molde (Figura 20), o mesmo foi impresso em papel e colado sobre a chapa de aço. Em seguida, o corte da chapa foi realizado com o auxílio de uma tesoura de corte para aço. Depois, a chapa foi dobrada e fixada por parafusos de modo a formar um tronco de cone.

Figura 20 – Dimensões do molde do difusor



Fonte: Próprio autor

A peça finalizada do difusor pode ser observa na Figura 21.

Figura 21 – Difusor finalizado

Fonte: Próprio autor

3.2.2 Construção da microturbina acoplada ao microgerador

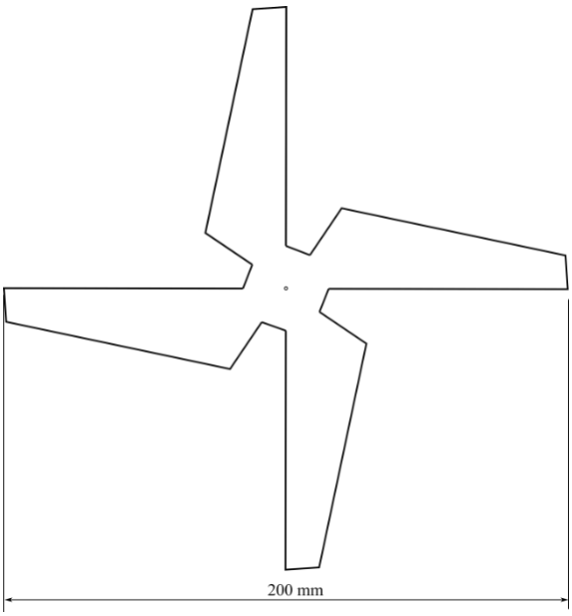
Este componente é constituído pela estrutura de pás feita de fixadas por parafusos a uma peça plástica chamada de cubo do rotor e pelo microgerador neste caso, o motor de DVD (Figura 22).

Figura 22 – Motor de DVD

Fonte: Próprio autor

De forma semelhante à construção do difusor. Para se obter a geometria desejada, as dimensões das quatro pás que constituem o rotor foram convertidas em um molde como pode ser visualizado na Figura 23. Antes de optarmos pela utilização de um rotor composto por 4 pás confeccionado em aço, outros modelos de apenas 3 pás foram construídos com material plástico reciclado e também a partir de tubos de PVC, no entanto durante os testes preliminares os modelos não demonstraram ser resistentes as condições técnicas utilizadas de incidência e velocidade do vento, além disso a confecção de vários elementos se faziam necessários gerando um certo tempo de trabalho e um custo desnecessário.

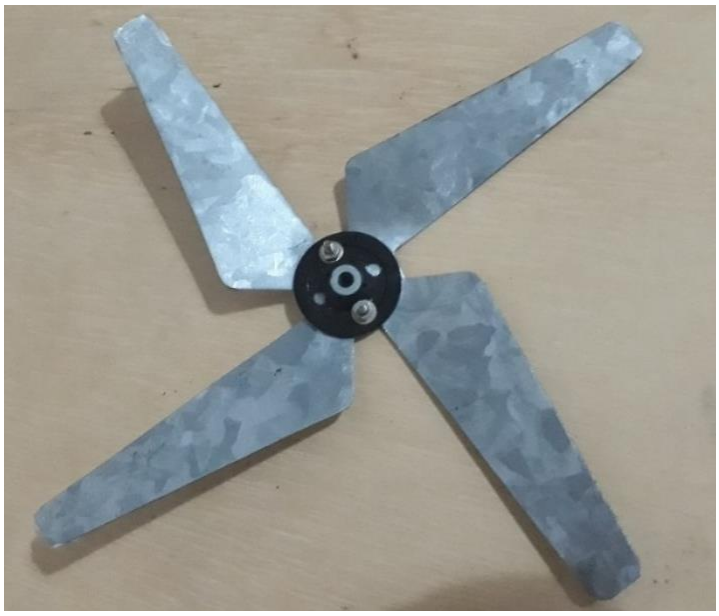
Figura 23 – Molde do rotor (formado de 4 pás)



Fonte: Próprio autor

Definidas as dimensões do molde, o mesmo foi impresso em papel A4 e colado sobre a chapa de aço em seguida, foi realizado o corte da chapa com o auxílio de uma tesoura especifica para este fim. A peça depois de finalizada (Figura 24) teve cada uma das suas pás do rotor recebeu uma leve torção, mudando assim seu ângulo em relação à base de fixação.

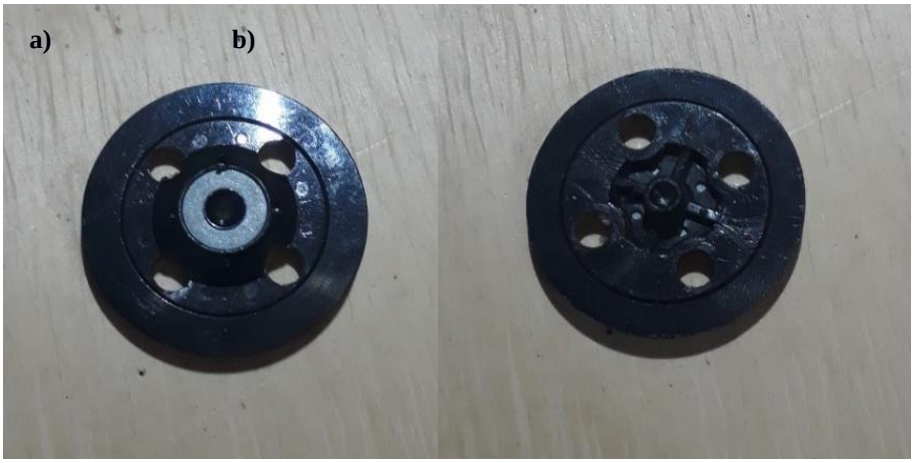
Figura 24 – Rotor de aço (formado de 4 pás)



Fonte: Próprio autor

Finalizado o processo de confecção das pás a mesma foi fixada a uma peça plástica de formato circular nomeada para fins práticos de cubo do rotor (Figura 25), além dos elementos de fixação constituídos pelos parafusos, porcas e arruelas (Figura 26).

Figura 25 – Cubo do rotor. a) Frente b) Verso



Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Parafusos, porcas e arruelas

Fonte: Próprio autor

O cubo do rotor possui um furo central de diâmetro similar e compatível com o eixo do microgerador proporcionando a fixação exata dos demais componentes citados.

Figura 27 – Componentes utilizados para montagem

Fonte: Próprio autor

A figura 27 mostra os principais componentes utilizados para montagem. A estrutura final do modelo pode ser visualizada na figura 28.

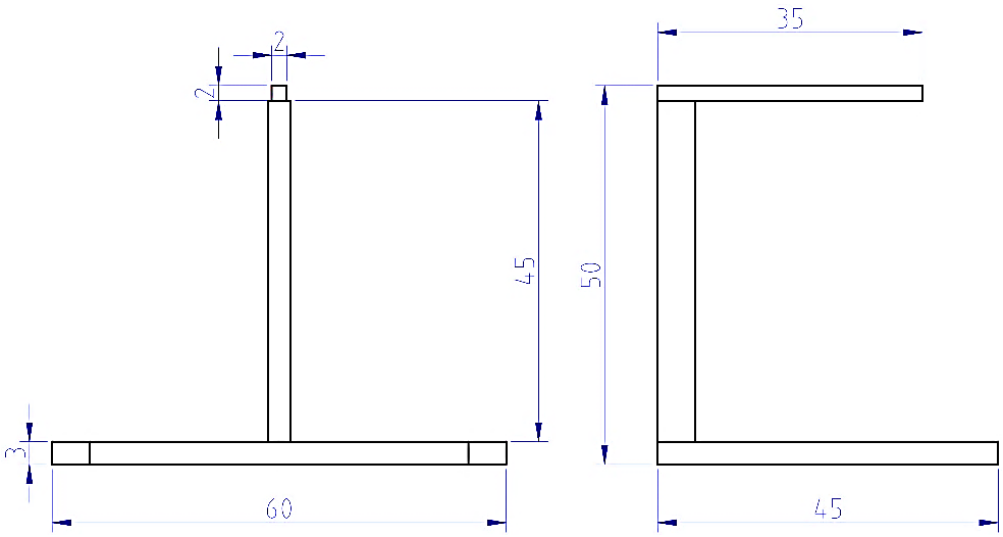
Figura 28 – Microturbina finalizada

Fonte: Próprio autor

3.3.3 Estruturas de suporte

Para posicionar tanto a microturbina no interior do difusor, quanto o difusor à frente do túnel de vento, foi necessário construir dois suportes: 1) Suporte da turbina; e 2) Suporte do difusor. O suporte da turbina foi feito de tubos de metalon de seção 20 mm x 20 mm, com as dimensões mostradas na Figura 29.

Figura 29 – Desenho de projeto com as dimensões da estrutura de suporte da microturbina



Fonte: Próprio autor

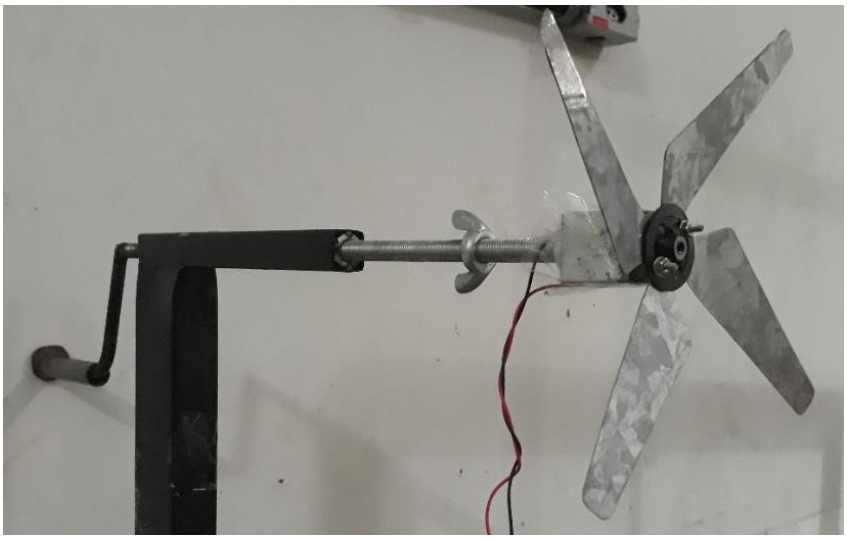
A fixação das partes foi feita por solda. Em seguida a estrutura foi pintada. Segue a estrutura finalizada (Figura 30).

Figura 30 – Estrutura de suporte da microturbina confeccionada em metalon

Fonte: Próprio autor

O uso do parafuso se justifica por um dos objetivos do trabalho, que é de verificar e avaliar a geração de energia internamente ao difusor, esse mecanismo pode ser observado com mais detalhes na Figura 31.

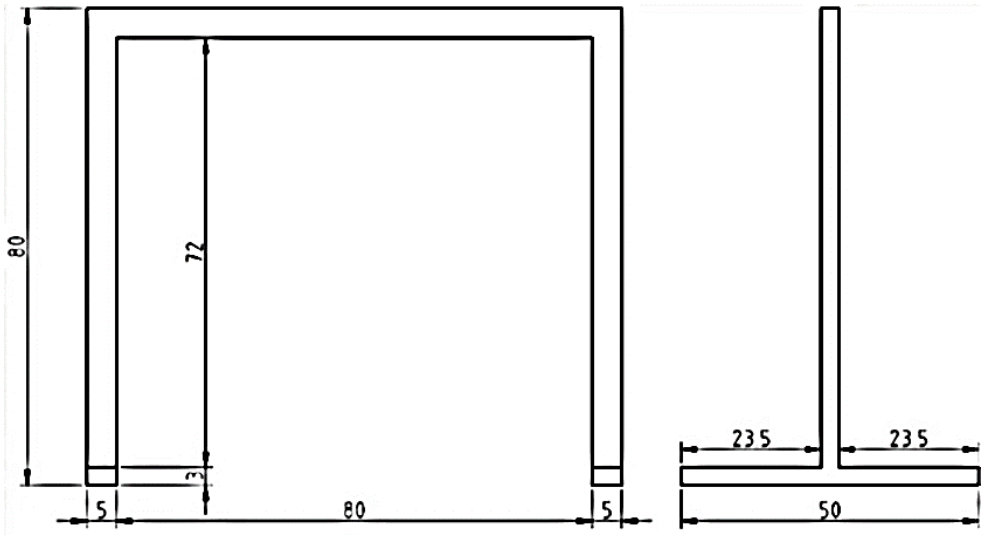
Figura 31 – Detalhe do mecanismo de suporte a microturbina



Fonte: Próprio autor

O suporte do difusor foi feito de tubos de Metalon de seção 30 mm x 50 mm de acordo com o desenho do projeto confeccionado em software do tipo CAD (ver Figura 32).

Figura 32 – Desenho de projeto com as dimensões da estrutura de suporte do difusor



Fonte: Próprio autor

Os parafusos foram soldados internamente ao tubo de Metalon (20 mm x 20 mm) A fixação das partes foi feita por solda. Em seguida a estrutura foi pintada. Segue a estrutura finalizada na figura 33.

Figura 33 – Estrutura de suporte do difusor confeccionado em metalon

Fonte: Próprio autor

Mais detalhes de como o difusor foi fixada a estrutura se encontram na Figura 34.

Figura 34 – Detalhes da estrutura de suporte do difusor

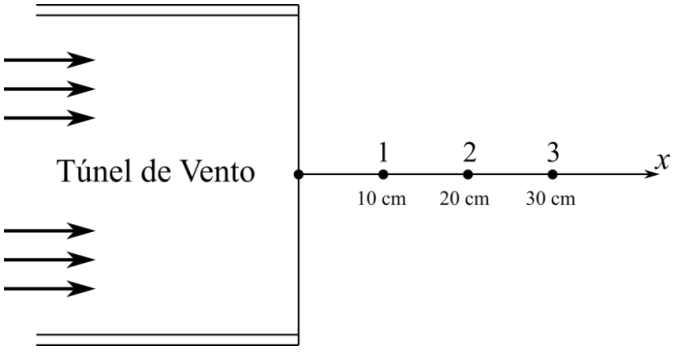
Fonte: Próprio autor

3.3.4 Medição da tensão elétrica sem o difusor

Para equiparar a metodologia com o trabalho de Barbosa (2013), foi realizado o mapeamento do jato de ar na saída do túnel de vento para avaliar se havia diferença na leitura da tensão elétrica posicionando a microturbina, sem o difusor, em posições distantes da boca do túnel de vento.

Feito isso, a turbina foi posicionada à frente do túnel em três posições, as quais correspondem às dimensões do difusor, para otimização do processo de aquisição dos dados um plano de posicionamento foi elaborado como mostra a figura 35.

Figura 35 – Plano de posicionamento da microturbina para ensaio



Fonte: Próprio autor

Figura 36 – Microturbina sem o difusor posicionada a frente do túnel de vento

Fonte: Próprio autor

Na Figura 36 segue o posicionamento da estrutura de medição com a microturbina sem a presença do difusor, e na Figura 37 segue a estrutura do túnel de vento utilizado nos ensaios.

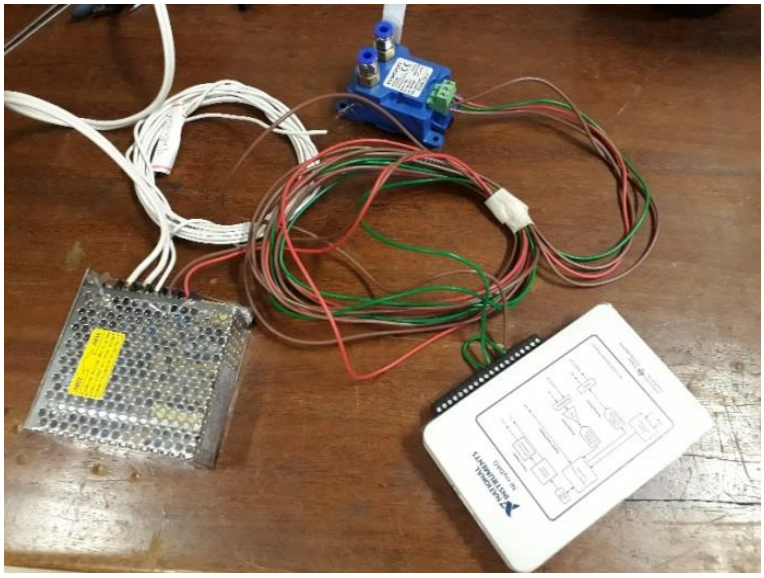
Figura 37 – Túnel de vento

Fonte: Próprio autor

3.3.5 Medição da velocidade no difusor

Para obtenção das informações sobre o comportamento do escoamento, o aparato de aquisição foi posicionado em frente a saída do túnel de vento. Na Figura 38 estão dispostos com maior detalhe quais foram os equipamentos utilizados para realizar o mapeamento da velocidade no interior do difusor, estão presentes na ilustração o transdutor de diferença de pressão conectado a placa de aquisição de dados, ambos alimentados por uma fonte chaveada.

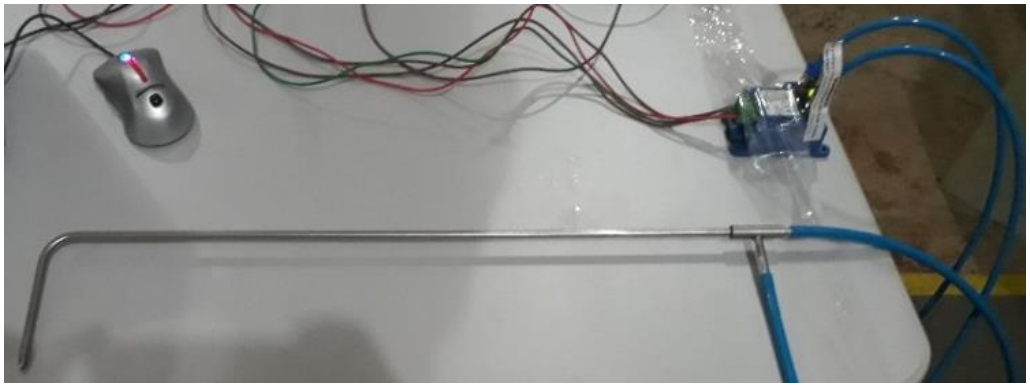
Figura 38 – Detalhes do aparato de aquisição



Fonte: Próprio autor

Na Figura 39 se encontra ilustrado o tubo de Pitot utilizado, o mesmo já se encontra conectado as mangueiras, que por sua vez está conectada ao transdutor de diferença de pressão.

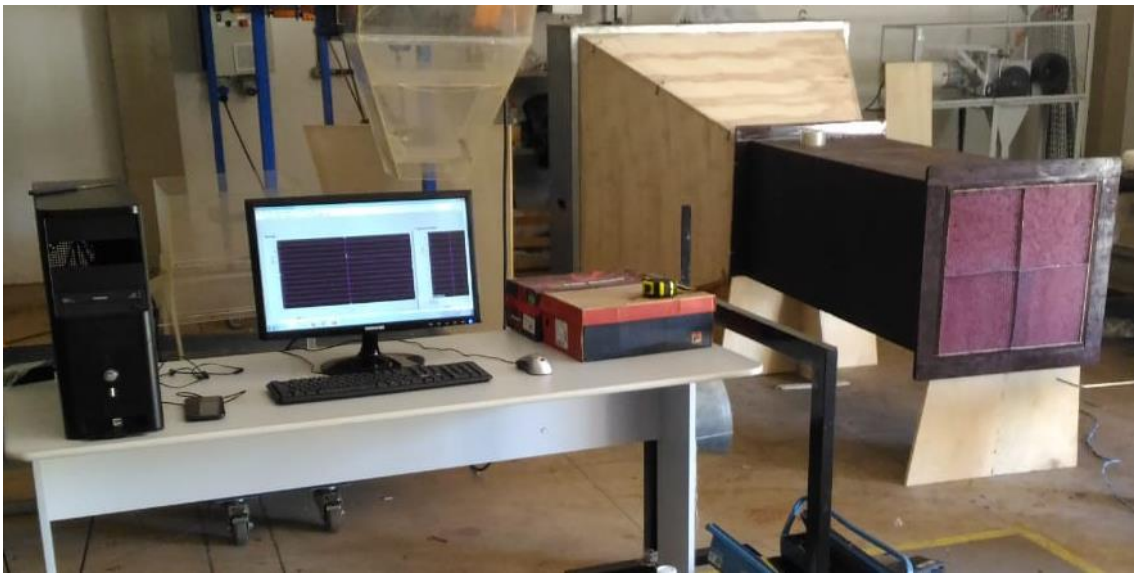
Figura 39 – Detalhes do tubo de pitot



Fonte: Próprio autor

A Figura 40 ilustra a disposição final dos equipamentos, bem como a organização do espaço do laboratório onde os ensaios foram realizados, é possível observar a estrutura de aquisição de velocidade já conectada ao apoio computacional utilizado para registrar as informações obtidas.

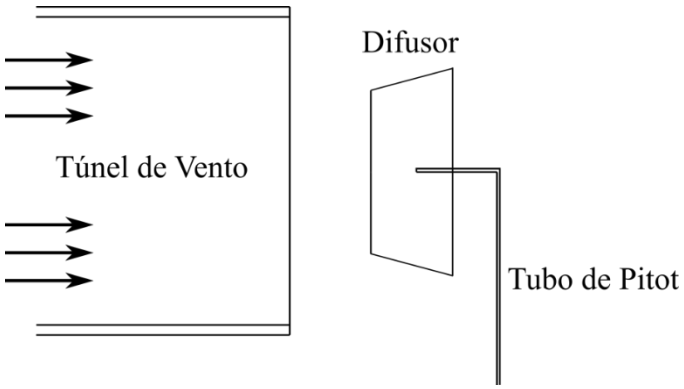
Figura 40 – Mesa com recursos de apoio computacional



Fonte: Próprio autor

A partir do esquema de medição definido na Figura 41, o tubo de Pitot foi posicionado no interior do difusor, e o conjunto por sua vez foi posicionado em frente a saída do túnel de vento como pode ser observado na Figura 42.

Figura 41 – Esquema de medição da velocidade no difusor



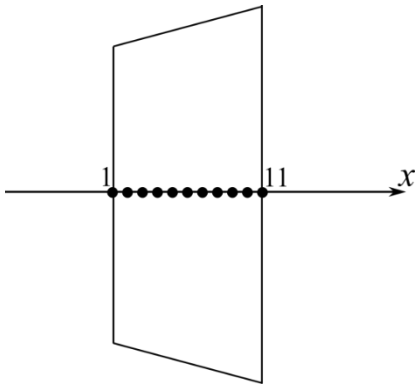
Fonte: Próprio autor

Figura 42 – Tubo de Pitot posicionado no interior do difusor

Fonte: Próprio autor

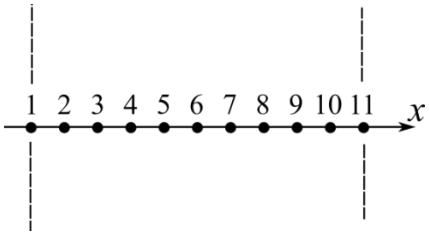
As medições foram realizadas ao longo da geometria do difusor, o plano de posicionamento pode ser observado na Figura 43 e os detalhes sobre a distribuição dos pontos no interior do difusor pode ser observada na Figura 44.

Figura 43 – Plano de posicionamento do tubo de Pitot para ensaio no interior do difusor



Fonte: Próprio autor

Figura 44 – Detalhes do plano de posicionamento (posições ao longo do difusor)

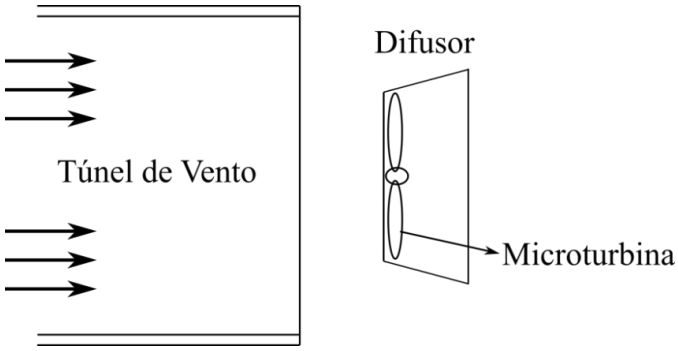


Fonte: Próprio autor

3.3.6 Medição da tensão elétrica na microturbina com o difusor

A partir do esquema de medição definido na figura 45, a microturbina com o difusor foi posicionada na saída do túnel de vento como pode ser observado na figura 46.

Figura 45 – Esquema de medição da tensão no difusor



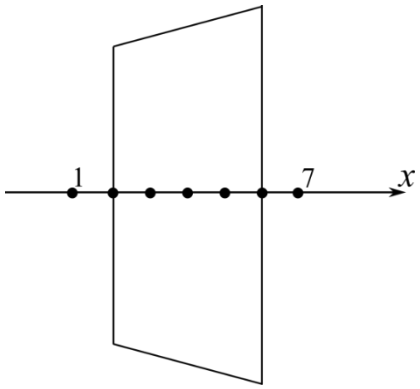
Fonte: Próprio autor

Figura 46 – Microturbina com difusor posicionado na saída do túnel de vento

Fonte: Próprio autor

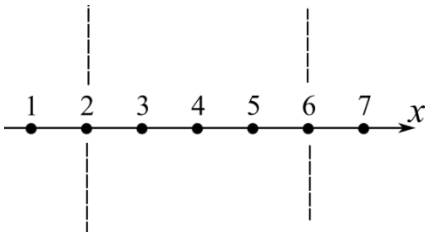
A partir do plano de posicionamento conforme a figura 47, as medições foram realizadas variando a posição da microturbina no interior do difusor, e os detalhes sobre a distribuição dos pontos no interior do difusor pode ser observada na figura 48.

Figura 47 – Plano de posicionamento da microturbina no interior do difusor



Fonte: Próprio autor

Figura 48 – Pitot posicionado na saída do túnel de vento



Fonte: Próprio autor

4 RESULTADOS

Os resultados dos ensaios foram obtidos a partir de três condições distintas: 1) medição da tensão elétrica na microturbina sem o difusor; 2) medição da velocidade no interior do difusor sem a microturbina; e 3) medição da tensão elétrica na microturbina com o difusor. Os resultados são mostrados a seguir.

4.1 Tensão elétrica na microturbina sem o difusor

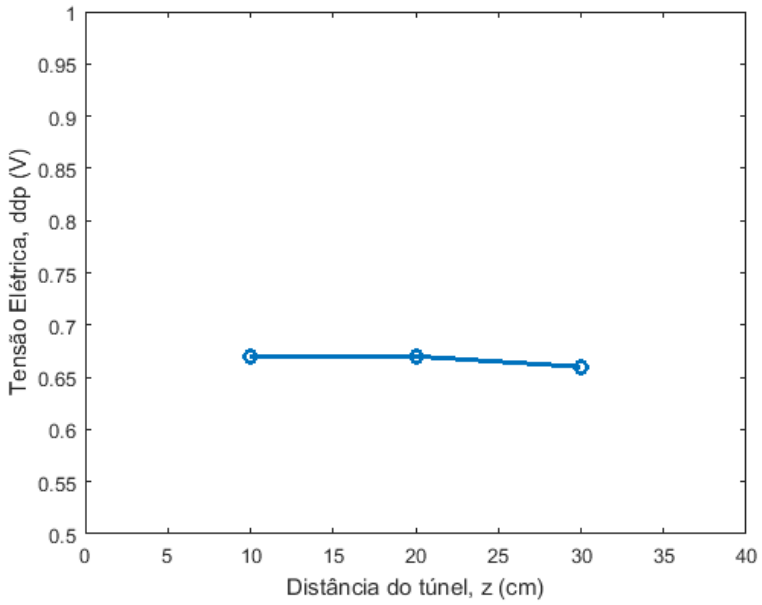
Os valores de tensão medidos nas três posições distantes 10 cm, 20 cm e 30 cm a partir da saída do túnel de vento, são dados na Tabela 1. A figura 49 mostra o gráfico de tensão obtido para a turbina sem o difusor.

Tabela 1 – Valores de tensão medidos na microturbina de acordo com a posição

i	z (cm)	ddp (V)
1	10	0,67
2	20	0,67
3	30	0,66

Fonte: Próprio autor

Figura 49 – Valores de tensão medidos na microturbina de acordo com a posição



Fonte: Próprio autor

Estes resultados indicam que há uma leve redução na tensão elétrica à medida que se afasta da boca do túnel (Figura 49). De todo modo, a redução é pequena, não interferindo nos resultados das medições. Assim, nesta região, de x = 0 cm a x = 30 cm, o escoamento de ar é uniforme a não havendo interferência da distância no escoamento sobre o difusor. Este resultado é similar ao mapeamento do jato de ar na boca do difusor no trabalho de Barbosa (2013).

4.2 Velocidade no interior do difusor

Os valores das velocidades no interior no difusor (esquema da Figura 39) são mostradas no Tabela 2 logo abaixo, assim como as coordenadas adimensionalizadas e a razão de velocidade, a partir da velocidade de referência V = 2,1 m/s, este valor foi obtido apenas com a presença da turbina.

Tabela 2 – Valores de velocidade medidos no interior do difusor de acordo com a posição

i	x (cm)	V, i (m/s)	x/L	ε,V
1	0	2,45	0,0	1,17
2	1	2,43	0,1	1,16
3	2	2,48	0,2	1,18
4	3	2,55	0,3	1,21
5	4	2,52	0,4	1,20
6	5	2,52	0,5	1,20
7	6	2,43	0,6	1,16
8	7	2,40	0,7	1,14
9	8	2,29	0,8	1,09
10	9	2,21	0,9	1,05
11	10	2,11	1,0	1,01

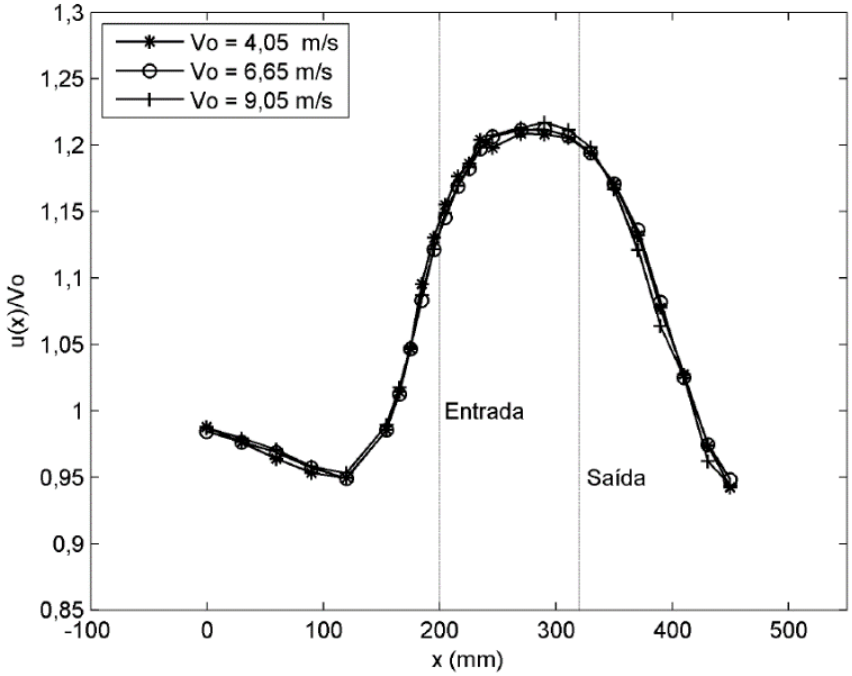
Fonte: Próprio autor

Tal como esperado, a presença do difusor acarreta num aumento de velocidade no seu interior, alcançando um ganho máximo de 21%, na posição x/L=0,3. Este resultado concorda com os resultados experimentais de Barbosa (2013), o qual utilizou difusores com ângulo de abertura de 5° e 22,5°.

O presente trabalho utiliza um difusor com ângulo de abertura de 15°, logo, mais próximo do difusor de 22,5° de Barbosa (2013), o qual obteve aumento de 22% de velocidade.

Entretanto, a razão entre a área de saída e área de entrada para ambos são diferentes, logo, percebe-se que para o difusor de 22,5°, o aumento de velocidade ocorre em uma região mais próxima do plano de saída do difusor como pode ser observado na Figura 50, enquanto que no de 15°, o aumento de velocidade ocorre na região mais próxima do plano de entrada do difusor.

Figura 50 – Valores de velocidade obtidos para o difusor de 22,5º

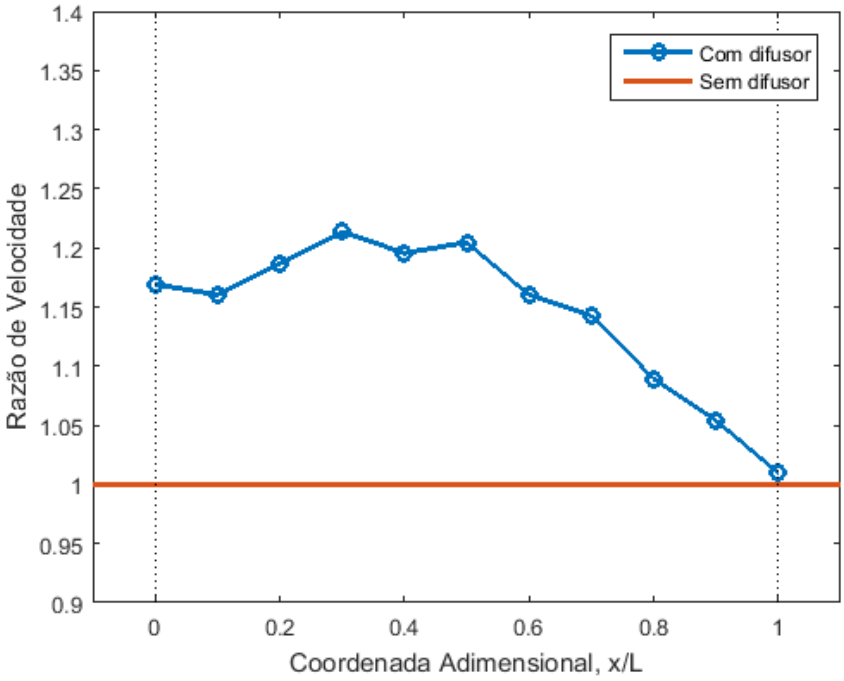


Fonte: BARBOSA (2013)

Sendo assim, apesar de não ser possível comparar de forma direta os valores obtidos em ambos os trabalhos, é possível observar que o comportamento foi proporcional e além disso aferiu-se que a presença da turbina no interior do difusor modifica de forma significativa a curva de velocidade obtida em comparação ao difusor sem a turbina.

A Figura 51 mostra a curva da razão de velocidade, internamente ao difusor os valores foram obtidos a partir dos sete pontos definidos anteriormente (ver Figura 39)

Figura 51 – Variação de velocidade no difusor



Fonte: Próprio autor

4.3 Tensão elétrica na microturbina com o difusor

Os valores de tensão medidos pela microturbina nas posições internas ao difusor são mostrados na Tabela 3 abaixo, com a tensão de referência ddp = 0,67 V. Na posição 3 a 2,5 cm de distância da saída do túnel de vento obteve-se o valor máximo de tensão que foi de 0,78 V.

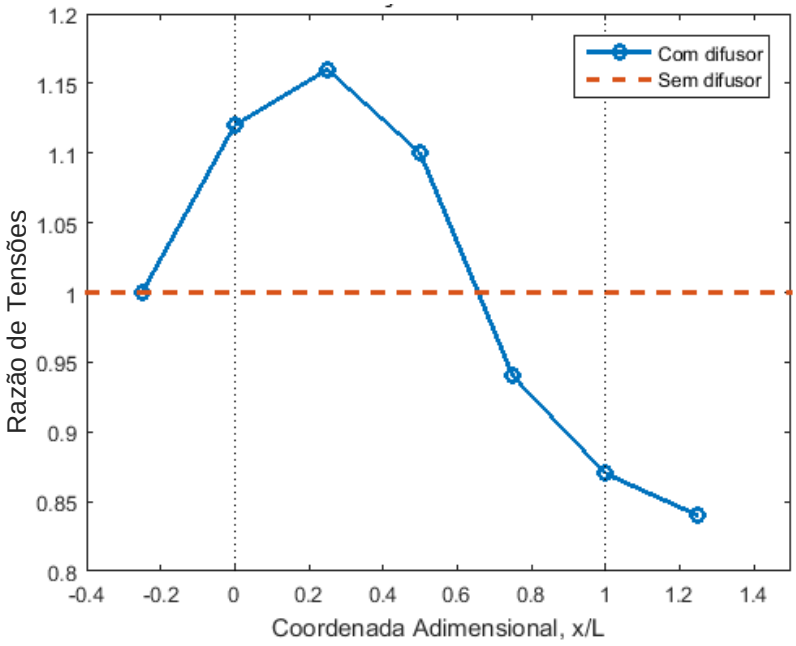
Tabela 3 – Tensão medida na microturbina com o difusor de acordo com a posição

i	x (cm)	ddp (V)	x/L	ε,ddp
1	-2,5	0,67	-0,25	1,00
2	0	0,75	0,00	1,12
3	2,5	0,78	0,25	1,16
4	5	0,74	0,50	1,10
5	7,5	0,63	0,75	0,94
6	10	0,58	1,00	0,87
7	12,5	0,56	1,25	0,84

Fonte: Próprio autor

A figura 52 mostra o aumento de tensão elétrica internamente ao difusor.

Figura 52 – Tensão medida na microturbina com o difusor de acordo com a posição



Fonte: Próprio autor

Estes resultados mostram que o uso do difusor ocasiona um aumento real da tensão elétrica na microturbina. Este aumento de tensão era esperado, entretanto, pela dificuldade em se encontrar trabalhos científicos que tratam do uso de difusores puramente cônicos, a única referência para se quantificar este aumento de tensão é o aumento de velocidade no difusor sem a presença da turbina. Logo, o aumento de velocidade até então era apenas um indicativo de que o difusor promoveria uma maior extração de energia pela microturbina.

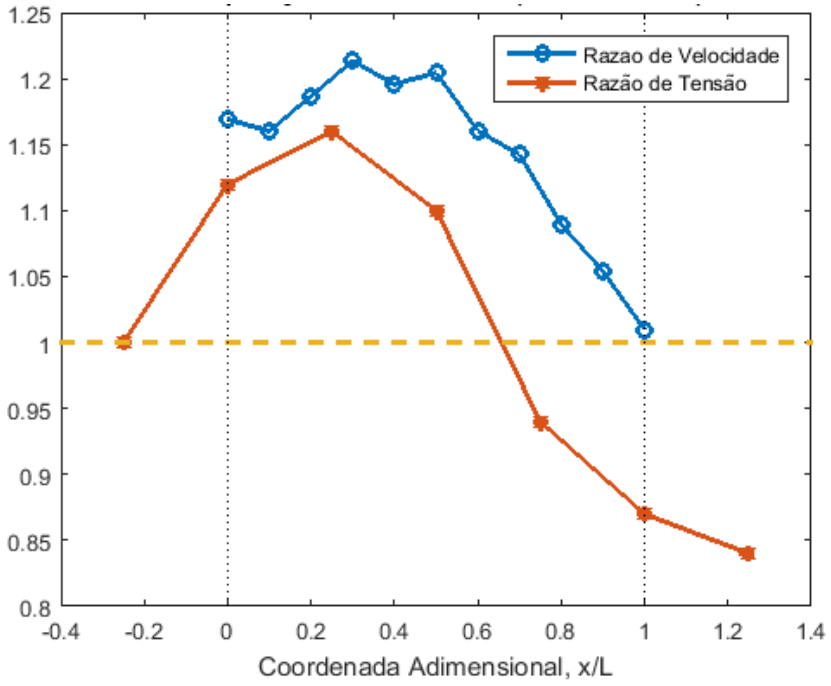
Os resultados mostram que o aumento de tensão elétrica ocorre na região próxima ao plano de entrada do difusor (x/L=0) concordando com o aumento de velocidade obtido anteriormente. Para avaliar a posição ideal para instalação da turbina no interior do difusor, se faz necessário realizar mais ensaios utilizando difusores de diferentes geometrias.

4.4 Comparação entre o aumento de velocidade com o aumento de tensão elétrica

De acordo com o comportamento da variação de tensão gerada somente pela microturbina representada no gráfico da Figura 51 e o comportamento da variação de tensão gerada pela microturbina com o difusor.

Ambos em função da posição em frente à saída do túnel de vento representada no gráfico da figura 52. Foi possível perceber que houve sim um aumento de tensão como pode ser observado no gráfico da Figura 53.

Figura 53 – Comparação entre os aumentos (Velocidade x Tensão)



Fonte: Próprio autor

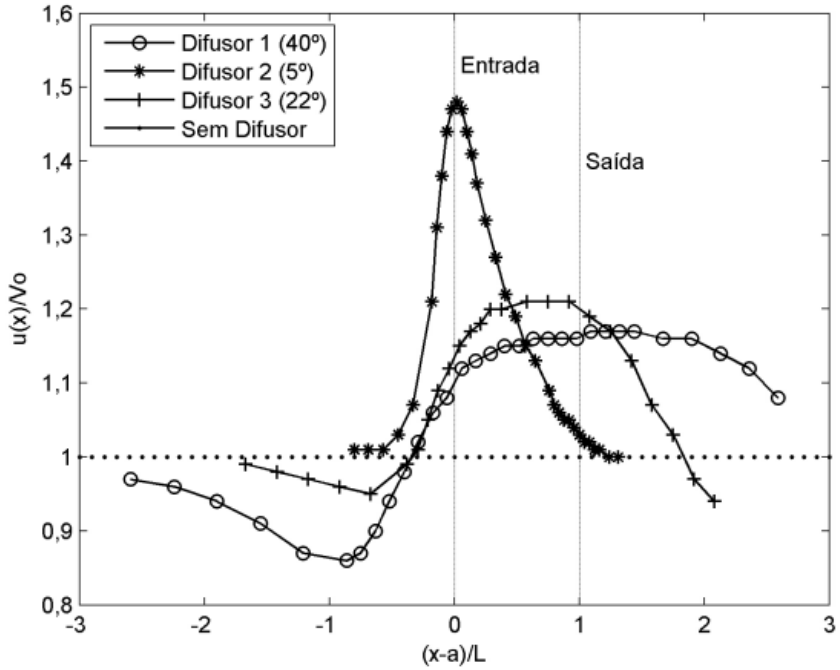
Por conta da influência de fatores externos os valores de tensão obtidos foram menores do que os esperados para a microturbina com o difusor apesar de não haverem muitos trabalhos experimentais que sirvam de referência para comparações especificas. Porém, há trabalhos que mostram como se dá o comportamento da variação de velocidade em difusores cônicos e é a partir deles que se validaram os resultados obtidos por este trabalho.

O gráfico da Figura 53 mostra que o comportamento dos ganhos de tensão elétrica e velocidade são proporcionais, mas ainda distantes de serem coincidentes. Ambas apresentam similaridade quanto ao aumento de velocidade e tensão na região próxima a entrada do difusor, ao passo que em direção ao plano de saída do difusor, estes valores decaem.

É nítido perceber que a presença do difusor melhora a eficiência da microturbina, seja pela aerodinâmica em função da velocidade, seja pela geração de energia elétrica por meio da tensão elétrica.

Os aumentos obtidos não são ideais, já que a proposta do trabalho é de relacionar os ganhos (tensão elétrica e velocidade), mas sem levar em conta a geometria mais eficiente para o difusor. Assim, espera-se que ganhos de tensão elétrica e velocidade possam ser maiores para difusores devidamente projetados.

Figura 54 – Razões de velocidades para difusores cônicos (5°, 22° e 40°).



Fonte: BARBOSA (2013)

No trabalho de Barbosa (2013), constatou-se que difusores que apresentam elevados ângulos de abertura (22,5° e 40°) apresentam uma redução da velocidade do ar que incide sobre a turbina, de modo que estes difusores funcionam como uma barreira para o escoamento, mas ainda assim, ocorreu o aumento de velocidade como pode ser observado na Figura 54. Desse modo, os pontos de maior velocidade se localizam mais próximo ao plano de saída do difusor.

Logo, como o presente trabalho utilizou um ângulo de abertura (15°) inferior a 22,5°, o efeito da redução da velocidade é menor, já que a região de maior velocidade se localiza mais próximo a região de entrada do difusor.

Ainda segundo os resultados obtidos por Barbosa (2013) a distribuição de velocidades depende somente de sua geometria. Como neste trabalho apenas uma geometria foi utilizada, as comparações com os resultados de Barbosa (2013) serão realizadas apenas com a finalidade de validar o comportamento observado nos resultados obtidos do presente trabalho.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram satisfatórios mediante os objetivos propostos pelo trabalho.

5.1 Sobre os resultados

Quanto ao objetivo geral, o mesmo foi atendido, o qual foi definido como avaliar o comportamento da geração de energia elétrica de um microgerador eólico com difusor cônico, e estabelecer uma relação entre o aumento de velocidade, causado pelo difusor, com um esperado aumento de tensão. Percebeu-se o aumento da tensão elétrica na microturbina quando posicionada em diversos pontos no interior do difusor. O aumento de velocidade também foi constatado, o que de certo modo já era esperado, já que os valores das dimensões do difusor utilizado neste trabalho foram baseados nas dimensões dos difusores utilizados em Barbosa (2013), os quais mostram os ganhos de velocidade.

Os resultados do presente trabalho concordam com os resultados obtidos em trabalhos científicos que utilizam difusores em turbinas, Kosasih e Tondelli (2012) obtiveram um aumento de desempenho em sua microturbina na faixa de 60%, e um aumento de 33% na velocidade com o uso de difusores cônicos modificados (com flanges e concentradores) quando comparados a microturbina sem o difusor. Além disso, seus resultados indicaram que os difusores cônicos modificados apresentaram apenas um valor ligeiramente maior quando comparado aos valores obtidos para o modelo puramente cônico, em torno de 1,7% de aumento.

Já no trabalho de Masukume et al. (2016), foi demonstrado que o aumento da velocidade do vento em difusores cônicos aumenta com o ângulo de expansão do difusor até o ângulo ideal de expansão, que então passa a diminuir. Para um difusor cônico construído a partir da relação de geometria $\frac{L}{D}$ =3 o aumento de velocidade do vento pode alcançar em torno de 4,7% de em relação a $\frac{L}{D}$ = 0,5.

No presente trabalho, obteve-se o aumento de velocidade da ordem de 21%, enquanto que o aumento de velocidade tensão elétrica foi da ordem de 16%. A não coincidência destes aumentos se dá também pelo fato de que a presença da turbina modifica o escoamento do ar no interior do difusor, assim, os pontos de máximo aumento não são coincidentes.

Os demais objetivos também foram alcançados com êxito, já que todo o aparato experimental foi projetado e construído a partir da definição de uma lista de materiais de custo reduzido e por meio de processos simplificados de confecção, construção e montagem.

Os resultados do presente trabalho são de extrema importância para o desenvolvimento de tecnologias eólicas, já que o estudo de difusores puramente cônicos aplicados às turbinas eólicas mostra um ganho real de geração de energia elétrica.

Mostrou-se também perfeitamente possível montar um aparato experimental para avaliar a geração de energia utilizando materiais de baixo custo, já que para se alcançar o objetivo principal deste trabalho, foi necessário construir uma série de equipamentos, dispositivos e estruturas que permitissem o estudo proposto.

Espera-se também que estes resultados possam incentivar empresas da área de energia que desejam investir nesta tecnologia, a eólica, já que a mesma está em expansão em todo o mundo.

5.2 Propostas de melhorias

Apesar da experiência exitosa deste trabalho, compreende-se que a metodologia experimental exige disponibilidade de tempo e recursos, sendo assim para trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar um estudo experimental completo em difusores cônicos com uma maior variedade de geometrias, para objetivar definir qual é a mais eficiente.

- Utilizar microturbinas e difusores com diâmetros maiores, com o objetivo de verificar o ganho de potência com o uso de turbinas com perfil aerodinâmico.

- Testar microgeradores de diferentes voltagens para verificar se os parâmetros elétricos dos componentes podem influenciar na geração de energia.

- Testar difusores de comprimentos menores em relação ao seu diâmetro de entrada variando seu ângulo de abertura. Comprimentos menores acarretam menor custo de fabricação e menor dificuldade de montagem.

- Realizar um estudo numérico computacional (CFX, Fluent, etc) para simular o escoamento em difusores de modo a prever o comportamento aerodinâmico da turbina para diferentes geometrias e otimizar o projeto de sistemas eólicos.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, D. L. M. **Estudo do Comportamento Aerodinâmico de Difusores Cônicos Aplicados as Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará. Belém, 2013.

BARBOSA, D.L.M., VAZ, J.R. P, FIGUEIREDO, S.W.O., SILVA, M. O., MESQUITA, A. L. A, LINS, E.F. **Na Investigation of a Mathematical Model for the Internal Velocity Profile of Conical Diffusers Applied to DAWTs.** In Anais da Academia Brasileira de Ciências, Vol. 87, ISS 2. Brasil, 2015.

DUTRA, Ricardo Marques (Org.). **Energia Eólica: princípios e tecnologia.** Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB, 2008. Disponível em:<http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 12 de janeiro de 2018.

FERREIRA, H., T. **Energia eólica: Barreiras a sua participação no setor elétrico brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

EARTHEASY. **The jornal of Renewable Energy (Site)**. Disponível em: < www.eartheasy.com>. Acesso em: 12 de janeiro de 2017.

FLOYD, Brett; JOHNSON, Tavon; ZABIHIAN, Farshid; PANTA, Yogendra. **Increasing Power of Horizontal Axis Wind Turbine by Addition of a Shroud and Diffuser:** Preliminary Results. West Virginia University Institute of Technology.Montgomery, 2016.

FOREMAN, K.M., GILBERT, B., OMAN, R.A. **Diffuser Augmentation of wind turbines. Solar energy**. Vol.20 pp. 305 – 311, 1978.

GALIZIA, Fábio R. C. **Geração de Energia a Partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a um Conversor Estático Duplo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2004. Disponível em:<http://www.teses.usp.br/teses>. Acesso em: 15 de janeiro de 2018.

GRUBB, M. J; MEYER, N. I. **Wind energy: resources, systems and regional strategies**. In: JO-HANSSON, T.B. et.al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

GWEC, Global Wind Energy Council. **Global Wind Report: Annual Market Update 2017**. 2018. Disponível em:<www.gwec.netr>. Acesso em: 15 de abril de 2018.

HANSEN, MOL. **Aerodynamics of Wind turbines.** Second Edition, 2008.

IGRA, O. "Design and performance of a turbine suitable for an aerogenerator". Energy Conversion Vol. 15, pp. 134 – 151, 1976.

IGRA, O. "Compact Shrouds for wind turbines". Energy Conversion. Vol. 16, pp. 149 – 157, 1977a.

IGRA, O. "**The shrouded aerogenerator".** Energy, Vol. 2 pp 429 – 439, 1977b.

KOGAN, ABRAHAM; NISSIM, E; SEGINER, ARNAN. 1961. **Shrouded Aerogenerator Design Study.** Technion Research and Development Foundation.

KOGAN, ABRAHAM; SEGINER, ARNAN. 1963. **Shrouded Aerogenerator Design Study: II Axis y metrical Shroud Performance.** Technion – Israel Institute of Technology, Department of Aeronautical Engineering.

KOSASIH, Buyung; TONDELLI, Andrea. **Experimental study of shrouded micro – wind turbine.** Procedia Engineering, v.49. p.92 – 98, 2012. doi: 10.1016/j.proeng. 2012.10.116. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acessado em: 15 de dezembro de 2017.

LAMARCA, Bernardo Arruda. **Projeto de Aerogerador Tripá para Pequena Comunidade no Litoral do Nordeste.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (Escola Politécnica). Rio de Janeiro, 2018.

LILLEY, G. M.; RAINBIRD, W. J. 1956. **A preliminary report on the design and performance of ducted windmills.** College of Aeronautics Cranfield.

LÓPEZ, Miguel Villarrubia. **Ingeniería de La Energía Eólica.** Barcelona. Marcombo, 2012. ISBN 978 – 84 – 267 – 1580 – 7.

MARTINS, Fernando R.; GUARNIERI, R.A.;PEREIRA, E.B. **O aproveitamento da energia eólica .** Revista Brasileira de Ensino de Física , v. 30, n.1, 2018. Disponivel em: <www.sbcfisica.org.br>. Acessado em: 01 de março de 2018.

MASUKUME, Peace Maker; MAKAKA, Golden; TINARWO, David. **Optimum Geometrical Shape Parameters for Conical Diffusers in Ducted Wind Turbines**. International Journal of Energy and Power Engineering. Vol. 5, No. 6, 2016. Disponível em: < http://www.sciencepublishinggroup.com>. Acessado em: 20 de fevereiro de 2018.

PINHO, J. T.; SAMPAIO, G. F.; BLASQUES, L. C. M. e SILVA, A.Wind **Resource Assessment and Comparative Analysis of Different Wind Turbines for Electricity Generation in the Brazilian Coastal Region**. Windpower Conference and Exhibition 2006, Pittsburgh, 2006.

REVISTA VEJA. Revista e portal de notícias (Site). Disponível em: < www.veja.abril.com.br >. Acesso em: 12 de abril de 2017.

SHAPOVAL, Artem. **Optimización de un difusor mediante simulación computacional**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universitat Politècnica de Catalunya.Catalunya, 2017.

SILVA, Selênio Rocha (Coord.). **Tecnologia em Aerogeradores**. Apostila do Curso de Especialização em Energia Eólica. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG: Belo Horizonte, 2013.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009. 285 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.