



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

THALES CUNHA E SILVA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ÂNGULO DE ABERTURA DE DIFUSORES
CÔNICOS EM UM MICROGERADOR EÓLICO**

ANANINDEUA

2019

THALES CUNHA E SILVA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ÂNGULO DE ABERTURA DE DIFUSORES
CÔNICOS EM UM MICROGERADOR EÓLICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia, com ênfase em Tecnologia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Disterfano Lima Martins Barbosa

ANANINDEUA

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

C972e Cunha E SILVA, Thales
Estudo experimental do ângulo de abertura de Difusores
cônicos em um microgerador eólico / Thales Cunha E SILVA. —
2019.
56 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Disterfano Lima Martins Barbosa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ciência
e Tecnologia, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade
Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

1. Difusores . 2. Energia eólica. 3. Microgerador. I. Título.

CDD 333.92

THALES CUNHA E SILVA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ÂNGULO DE ABERTURA DE DIFUSORES
CÔNICOS EM UM MICROGERADOR EÓLICO**

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

Aprovado em 13 de dezembro de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Msc. Disterfano Lima Martins Barbosa
Orientador - FACT/UFPA

Prof. Dr. Silvio Bispo do Vale
Membro Interno - FACT/UFPA

Prof. Dr. Luiz Cláudio Fialho Andrade
Membro Interno - FACT/UFPA

Prof^ª. Dr^ª. Roseane de Lima Silva
Membro Interno - FEMAT/UFPA

ANANINDEUA
2019

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do ângulo de abertura de difusores cônicos, utilizando materiais de baixo custo, em um microgerador eólico. O difusor, ou intensificador de potência, atua na formação de zonas de baixa pressão na sua seção de saída, promovendo um efeito de “aspiração” da corrente de ar, aumentando a velocidade que incide sobre o rotor da turbina eólica, conseqüentemente elevando a geração de energia elétrica. Neste trabalho foram construídos 5 difusores cônicos com diâmetros de entrada e comprimentos fixos, variando seus ângulos de abertura, no caso, 5°, 10°, 15°, 20° e 25°. A razão entre o comprimento de cada difusor (L/d) e o seu diâmetro de entrada foi de 0,5. O túnel de vento utilizado para os ensaios foi construído a partir de materiais de baixo custo, assim como o microgerador eólico. Foram realizadas leituras de tensões elétricas, por meio do microgerador, no interior de cada difusor. Em seguida, foram realizadas leituras de velocidade, por meio do tubo de Pitot, no interior de cada difusor. A partir destes valores, foram determinados os fatores de aumento de velocidade e de tensões elétricas, que posteriormente foram comparados. Foi observado que todos os difusores promoveram aumento de velocidade e de tensão elétrica. Observou-se também, que para a relação L/d utilizada, as razões de velocidade e as razões de tensões aumentavam de acordo com o aumento do ângulo de abertura. Entretanto, ângulos de abertura elevados, como 40°, causam redução de velocidade, como visto em Barbosa (2013). Os resultados mostraram a influência da geometria do difusor no aumento da geração de velocidades e de tensões elétricas na ordem de até 32%. Os resultados obtidos neste trabalho apresentam boa concordância com os trabalhos disponíveis na literatura, mesmo que difusores cônicos sejam pouco utilizados em aplicações eólicas.

Palavras-chave: Difusores. Energia Eólica. Microgerador.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the influence of the opening angle of conical diffusers in a wind micro generator using low cost materials. The diffuser, or power intensifier, acts in the formation of low-pressure zones in the outlet section, promoting an effect of “suction” of the air stream, increasing the speed that affects the wind turbine rotor, consequently increasing the generation of electric power. In this work, five conical diffusers with inlet diameter and fixed lengths were built, varying their opening angles, in this case, 5°, 10°, 15°, 20° and 25°. The ratio between the length of each diffuser (L/d) and its inlet diameter was 0.5. The wind tunnel used for the tests was built with low cost materials, as well as the wind generator. Electrical voltage readings were taken through the micro generator inside each diffuser. Then, velocity readings were taken through the Pitot tube inside each diffuser. From these values, the factors of speed increase and electric voltages were determined, which were later compared. It was observed that all diffusers promoted speed and voltage increase. It was also observed that for the ratio L/d used, the velocity ratios and the stress ratios increased as the opening angle increased. However, high opening angles, such as 40 °, cause speed reduction, as seen in Barbosa (2013). The results showed the influence of diffuser geometry in increasing the generation of velocities and electric voltages of up to 32%, but in different locations. The results obtained in this work are in good agreement with the works available in the literature, even though conical diffusers were less used in wind applications.

Keywords: Wind Energy. Diffuser. Microgenerator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – a) Parque eólico Pedra do Reino em Sobradinho – PE. b) Fazenda de energia eólica na Escócia.	8
Figura 2 – Turbinas eólicas com difusores.	9
Figura 3– a) Parque eólico de Gravatá-PE. b) Catavento para bombeamento de água.	12
Figura 4 - Turbinas eólicas de eixo horizontal (a) e vertical (b)	13
Figura 5 - Componentes comuns de uma turbina eólica.	14
Figura 6 - Fluxo de ar através de uma sessão transversal.	15
Figura 7 - Perdas de velocidade do vento na passagem pelo conjunto de pás.	16
Figura 8 – Exemplos de DAWTs.	17
Figura 9 – Modelo-A1 de difusor.	18
Figura 10 – Modelo-B de difusor.	18
Figura 11 - Difusor com Bocal e Flange.	19
Figura 12 - Difusor cônico com perfil aerodinâmico interno.	19
Figura 13 – Fluxo de massas de ar através de <i>DAWT</i> com bocal e flange.	20
Figura 14 - Esquema representando a formação de vórtices em difusor com flange.	20
Figura 15 – Linhas de corrente de ar com injeção de fumaça movimentando-se em difusor cônico.	21
Figura 16 – (a) Ensaio de turbina com e sem difusor. (b) Projeto.	25
Figura 17 - <i>DAWT</i> com revestimento variado.	25
Figura 18 - Comparação de C_p para turbinas sem difusor, com difusor e com difusor-bocal.	26
Figura 19 - Microturbina eólica.	27
Figura 20 - Túnel de vento.	28
Figura 21 - Esquema dos difusores ensaiados.	29
Figura 22 - Difusores cônicos.	29
Figura 23 - Modelo do difusor em perspectiva (a) e planificado (b).	30
Figura 24 – Esquema dos moldes dos difusores em escala reduzida: 5° (a) 10° (b) 15° (c) 20° (d) 25° (e)	31
Figura 25 - Moldes em tamanho real dispostos na chapa de aço galvanizado (a). Planificação dos difusores (b).	32
Figura 26 - Difusores montados.	32
Figura 27 - Esquema geral dos ensaios	33
Figura 28 - Pontos de leitura de velocidade e tensão	33

Figura 29 - Esquema de posições do tubo de pitot para mapeamento de velocidades.....	34
Figura 30 - Tubo de pitot posicionado na saída do túnel de vento.....	34
Figura 31 - Esquema de posições para mapeamento de velocidades.	35
Figura 32- Microgerador eólico com difusor	35
Figura 33 - Esquema de posições para mapeamento de velocidades.	36
Figura 34- Leitura de velocidade com difusor.....	36
Figura 35 – Gráfico do mapeamento da região de saída do túnel.	37
Figura 36 – Gráfico das tensões elétricas nas posições interiores aos difusores.	38
Figura 37 – Gráfico das razões de tensões nas posições internas aos difusores.....	39
Figura 38 - Gráfico das curvas de velocidade nas posições internas do difusor.	40
Figura 39 - Gráfico de razão de velocidades no interior dos difusores.	41
Figura 40 - Gráfico de razão de velocidades e tensão para difusor de 5°.	43
Figura 41- Gráfico de razão de velocidades e tensão para difusor de 10°.	44
Figura 42 - Gráfico de razão de velocidades e tensão para difusor de 15°.	45
Figura 43 - Gráfico de razão de velocidades e tensão para difusor de 20°.	46
Figura 44 - Gráfico de razão de velocidades e tensão para difusor de 25°.	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Considerações gerais	8
1.2 Justificativa	10
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo Geral	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Turbinas Eólicas	12
2.2 Turbinas Eólicas com Difusores.....	17
2.3 Modelagem matemática de DAWTs	21
2.4 Difusores cônicos aplicados às turbinas eólicas	24
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	27
3.1 Aparato Experimental.....	27
3.1.1 Construção dos difusores cônicos	29
3.2 Procedimento Experimental	33
3.2.1 Mapeamento da velocidade na seção de testes	34
3.2.2 Leitura das tensões elétricas internamente aos difusores	35
3.2.3 Leitura das velocidades internamente aos difusores.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 Mapeamento da velocidade na seção de testes.....	37
4.2 Leitura das tensões elétricas internamente aos difusores	38
4.3 Leitura das velocidades internamente aos difusores	40
4.4 Relação entre as razões de tensões e de velocidades.....	43
5 CONCLUSÕES.....	48
5.1 Sobre os resultados	48
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	48
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE A – Tabelas utilizadas para construção dos gráficos.....	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A energia é um elemento-chave para a economia moderna, sendo essencial tanto para processos industriais quanto para necessidades básicas da sociedade, como iluminação, tecnologias de informação, comunicação e mobilidade (WEF, 2018). Questões relacionadas ao meio ambiente promovem a busca por soluções ecológicas e com boa eficiência para a melhora da qualidade do suprimento energético (DUTRA, 2001). De acordo com Bragança (2017) o aumento dos investimentos em energia limpa é essencial para a diminuição de problemas ambientais, sendo também vetor de desenvolvimento tecnológico e econômico. A tecnologia de geração de energia elétrica a partir da força dos ventos é uma das que mais cresce mundialmente, sendo motivado pela queda dos custos de instalação e manutenção (IRENA, 2018).

A conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica é feita através da utilização de turbinas eólicas (Figura 1), sendo encontradas em duas formas básicas: Turbina eólica de eixo vertical, caracterizada por sofrer ação do vento e adquirir força de arrasto, paralela à velocidade; Turbina eólica de eixo horizontal que transformam o movimento do ar em força de sustentação, perpendicular à velocidade, ambas provocando a rotação das pás em torno de um eixo acoplado a um gerador, este que transforma energia mecânica em energia elétrica.

Figura 1 – a) Parque eólico Pedra do Reino em Sobradinho – PE. b) Fazenda de energia eólica na Escócia.



Fonte: Eólica (2018)

De acordo com Hansen (2008), é possível melhorar a eficiência de turbinas eólicas com o uso de difusores (Figura 2), mas estes resultados dependem da geometria adotada no dispositivo. Estudos propostos por Ohya e Karasudani (2010) mostraram que o uso dos aumentadores de velocidade mostram melhores resultados quando são utilizados formas mais longas e com pequenos ângulos de abertura, porém torna-se inviável a construção dos mesmos, logo propuseram a utilização de bocais e flanges para aumentar a geração de energia com o uso de difusores, porém, a adição destes dispositivos provoca um aumento considerável no custo de fabricação. Portanto, propõe-se o uso de geometrias simplificadas, como a de tronco de cone, que de acordo com a literatura existente, demonstra resultados satisfatórios.

Figura 2 – Turbinas eólicas com difusores.



Fonte: a) Gipe (2016) b) Gipe (2012)

O aumento de velocidade ocasionado pelo difusor ocorre pela formação de vórtices na região de saída do aumentador de velocidades, provocando um efeito de aspiração e incrementando o fluxo de massa pela seção das pás (KOSASIH E TONDELLI, 2012). Se a natureza dinâmica do fluido for utilizada corretamente para promover acréscimo de velocidade ao ar em movimento, torna-se possível concentrar a energia eólica em uma região, aumentando substancialmente a potência de saída de um aerogerador (OHYA E KARASUDANI 2010). Por conta da semelhança de condições propostas, os resultados adquiridos serão comparados com os estudos sobre difusores cônicos de Barbosa (2013), que relaciona a geometria dos mesmos com os seus aumentos de velocidade.

O presente trabalho sugere a variação da geometria de difusores cônicos com o intuito de aumentar a geração de energia elétrica, porém utilizando-se da menor quantidade de material e promover diminuição de custos para facilitar na construção os corpos de prova, instigando a popularização dos estudos do tema na comunidade científica.

1.2 Justificativa

A relevância do tema deste trabalho corresponde à necessidade de se projetar turbinas eólicas de eixo horizontal mais eficientes a partir do uso de difusores puramente cônicos. Difusores são dispositivos que servem para aumentar o fluxo de massas de ar no seu interior, resultando em um aumento de velocidade do vento. Este aumento de velocidade pode então ser aproveitado para se extrair mais energia mecânica contida no vento, assim elevando a geração de energia elétrica com o auxílio de geradores elétricos.

Existem na literatura diversos tipos de difusores, cada um com sua particularidade e complexidade tanto de funcionamento quanto de construção. Os difusores cônicos são fáceis de serem construídos, entretanto, seu uso não é tão difundido, já que estes não promovem um aumento considerável quando comparado com outros tipos. Na comunidade científica, ainda não há consenso quanto às dimensões geométricas ideais de difusores cônicos, de modo que estas permitam o projeto mais eficiente de turbinas.

O presente trabalho também fornece dados relevantes para a aferição de modelos matemáticos que tentam prever o comportamento da velocidade internamente ao difusor, assim como para aferir modelos numéricos que utilizam a dinâmica dos fluidos computacional.

O ângulo de abertura e o comprimento do difusor são as principais dimensões que influenciam no seu comportamento. O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a influência do ângulo de abertura do difusor cônico no comportamento aerodinâmico de micro geradores eólicos.

Desse modo, este trabalho apresenta uma relevante contribuição para o projeto de turbinas eólicas com difusores puramente cônicos, além de fornecer mais informações sobre o escoamento nestes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar experimentalmente a influência do ângulo de abertura de 5 (cinco) difusores cônicos ($L/d = 0,5$) em um microgerador eólico, por meio da leitura das velocidades e das tensões elétricas internamente ao difusor, utilizando materiais de baixo custo, além de estabelecer uma correlação entre as distribuições de velocidade e de tensões elétricas desde a montante até a jusante do difusor.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar os difusores cônicos de modo que os seus ângulos de abertura sejam de 5° , 10° , 15° , 20° e 25° respectivamente, para uma relação comprimento-diâmetro de 0,5;
- Confeccionar os difusores cônicos a partir de chapas de aço galvanizado;
- Mapear a região de escoamento na seção de testes do túnel de vento;
- Realizar as leituras das velocidades no interior de cada difusor, por meio do tubo de Pitot, desde a montante até sua jusante, ao longo de 11 pontos igualmente espaçados;
- Realizar as leituras das tensões elétricas no interior de cada difusor, por meio do microgerador, desde a montante até sua jusante, ao longo de 11 pontos igualmente espaçados;
- Estabelecer uma relação entre os fatores de aumento de velocidade e os fatores de aumento de tensão elétrica para cada difusor;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas, também chamadas de Aero geradores, são conjuntos de elementos mecânicos que têm a finalidade de transformar parte da energia cinética contida do vento em energia mecânica de rotação. Parte desta energia é posteriormente convertida em energia elétrica por meio de geradores elétricos.

Compreende-se como energia eólica o aproveitamento da energia cinética contida no movimento do ar atmosférico. Ao longo da história, ocorreu um considerável desenvolvimento tecnológico para aproveitamento energético por meio de turbinas eólicas (Figura 3-a) para geração de energia elétrica e de moinhos (Figura 3-b) para geração de energia mecânica, utilizada para bombeamento de água ou moagem de grãos (HANSEN, 2008; ANEEL, 2018). Uma das características mais relevantes da energia dos ventos é o fato desta ser renovável e não agredir o meio ambiente, além de não gerar resíduos gasosos ou radioativos (DUTRA, 2001).

Nota-se diferentes usos de energia eólica, onde na Figura 3 (a) apresenta uma alta capacidade de geração energética de cerca de 20 MW em 12 turbinas instaladas (EÓLICA, 2018) e a Figura 3 (b) representa uma pequena geração com um baixo custo, porém de grande relevância por abastecer uma pequena comunidade que não dispõe de abastecimento de água (CABRAL e FILHO, 2011).

Figura 3– a) Parque eólico de Gravatá-PE. b) Catavento para bombeamento de água.



(a)

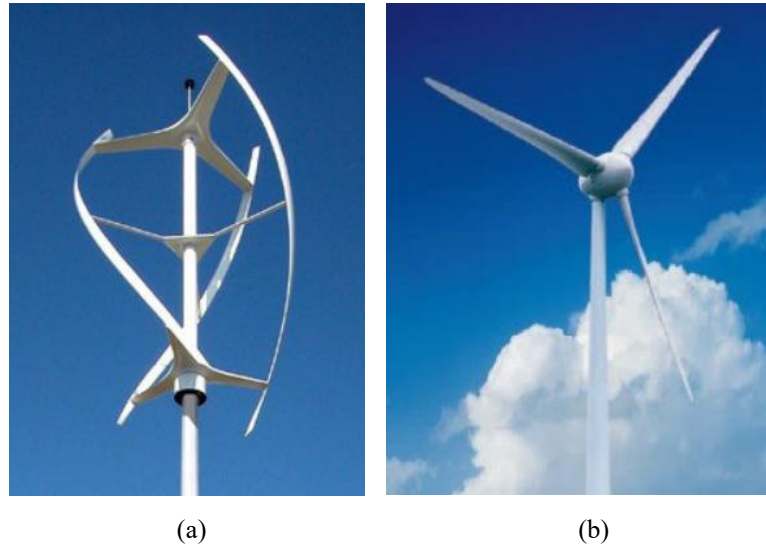


(b)

Fonte: (a) Eólica (2018) (b) Cabral e Filho (2011)

As turbinas eólicas são classificadas de acordo com a forma a qual estão dispostas: Turbinas de eixo horizontal (Figura 4-a). Turbinas de eixo vertical (Figura 4-b).

Figura 4 - Turbinas eólicas de eixo vertical, Darrieus (a) e horizontal (b)



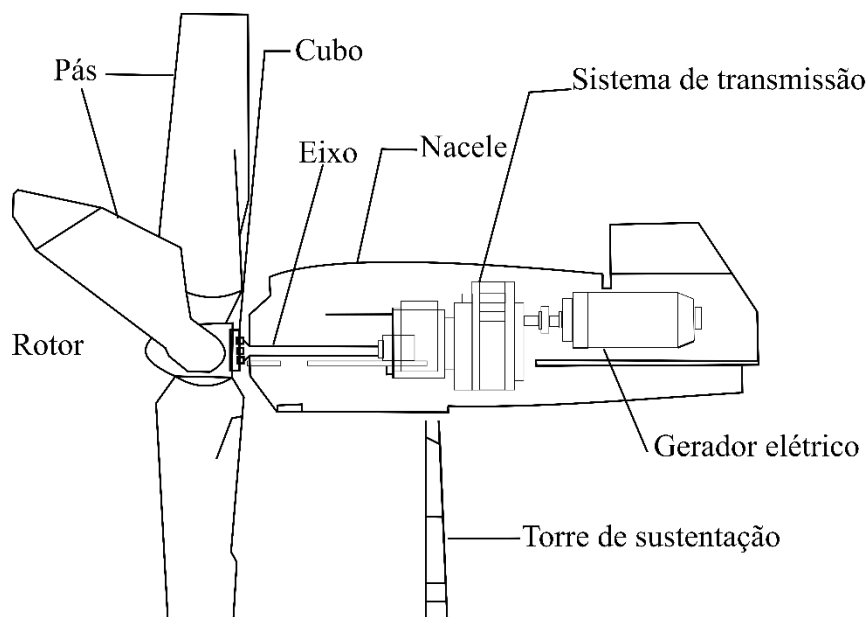
Fonte: Wenzel (2007)

Turbinas eólicas de eixo vertical (Figura 4-a): O eixo de rotação das turbinas verticais é perpendicular ao solo, pode possuir pás retas ou curvas, tendo como principal característica o fato de poder captar o vento de quaisquer direções, permite que o gerador elétrico seja colocado mais próximo do chão, tornando a construção do mesmo a menores custos (PURIFICAÇÃO e FONTE, 2012). Os aerogeradores de eixo vertical são pouco difundidos no mercado mundial por conta de algumas desvantagens, como certos modelos necessitarem de um sistema de partida para acionamento em baixas velocidades, necessidade de instalação em bases, rendimento baixo e a constante mudança da direção de ataque do vento, além de sofrer com altas vibrações. (PURIFICAÇÃO e FONTE, 2012).

As turbinas eólicas de eixo horizontal (Figura 4 - b) são mais comuns, tendo a maior parte das atenções de pesquisadores, logo dominam o mercado internacional na geração de energia eólica (DUTRA, 2008). Os aerogeradores de eixo horizontal ao longo do vento são majoritariamente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos que permitem que o disco varrido pelas pás do rotor esteja sempre em posição perpendicular ao vento, isto ocorre pelo fato de que o uso de forças de sustentação, nome dado à força perpendicular à velocidade do vento, é mais eficiente do que o uso de forças de arrasto, denominação da força atuando paralelamente ao escoamento.

De acordo com Dutra (2008), os rotores mais comuns na geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice normalmente com três pás. Os principais componentes deste são mostrados na Figura 5 e são: Nacele, uma estrutura onde são instalados a maior parte dos principais componentes do aerogeradores, as Pás, responsáveis pela interação do rotor com o vento, onde ao entrar em contato com o ar em movimento, promove a conversão de energia cinética dos ventos em trabalho mecânico, o Cubo posicionado na parte dianteira da turbina, onde ficam posicionadas as pás, o Eixo, onde prende-se o cubo ao aerogerador, um sistema de transmissão responsável por transmitir a energia mecânica do eixo do rotor até o gerador, normalmente conta com uma caixa multiplicadora para adaptar a baixa velocidade de rotação do eixo à alta velocidade de rotação do gerador que transforma a energia mecânica proveniente da rotação do eixo em energia elétrica. Os Aerogeradores mais modernos possuem um sistema de segurança e consiste um dispositivo de freios automáticos para controle de rotação, utilizado para manter estável a velocidade de rotação do eixo, evitando excessos e a sobrecarga do sistema.

Figura 5 - Componentes comuns de uma turbina eólica.

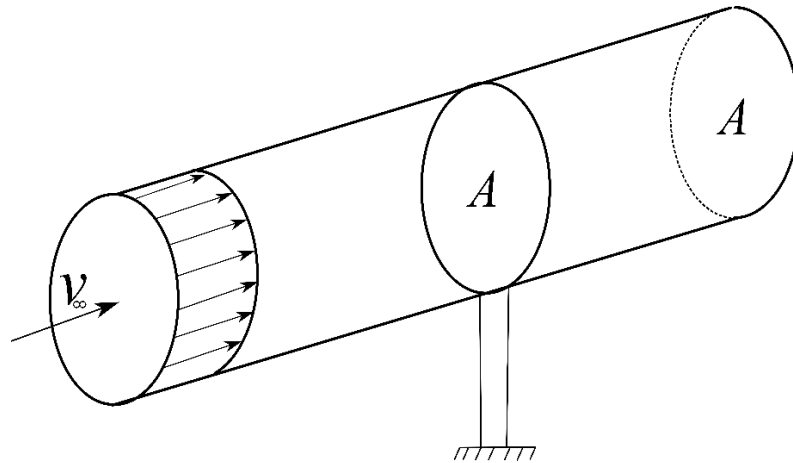


Fonte: Adaptado de Eólica (2018)

Outras formas de classificação adotadas são: Por potência nominal, onde existem turbinas de pequeno porte (até 50kW), médio porte (de 50kW até 1MW) e grande porte (acima de 1MW). E por posicionamento, onde há turbinas do tipo *downwind*, onde a nacelle encontra-se à frente das pás, sendo o primeiro elemento a entrar em contato com o ar, e do tipo *upwind*, onde as pás encontram-se na frente da nacelle, sendo o oposto do tipo anterior.

A Figura 6 representa o esquema do fluxo de ar através da sessão transversal, em que a partir desta, pode-se prever ou mensurar a quantidade de energia disponível na massa de ar que chega à turbina:

Figura 6 - Fluxo de ar através de uma sessão transversal.



Fonte: Adaptada de Dutra (2008)

A energia disponível ou *potência disponível* no vento é obtida a partir da relação conforme mostrada na Equação (1)

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

onde ρ é a massa específica do ar em movimento, v é a velocidade do vento e A é a área circular varrida pelo rotor da turbina.

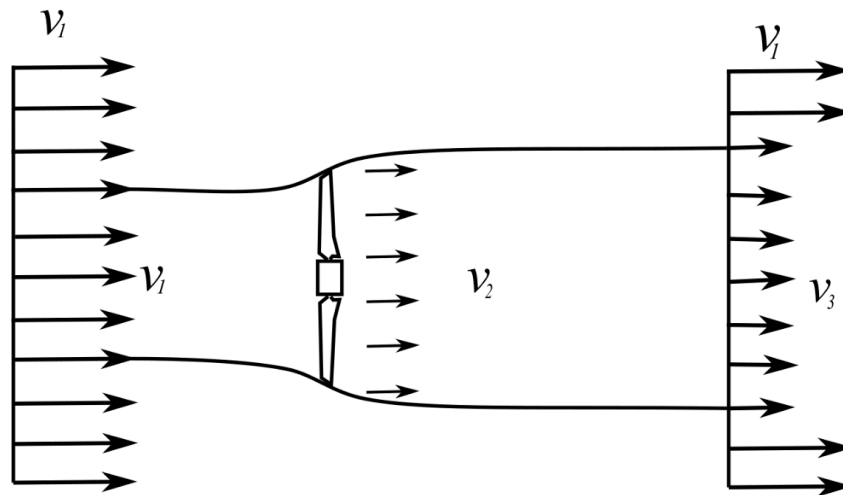
Para determinar a quantidade de potência aproveitada pela turbina, define-se o *coeficiente de potência*, mostrada na Equação (2):

$$c_p = \frac{P_t}{P_d} \quad (2)$$

onde P_t é a potência absorvida pela turbina.

A modelagem matemática de turbinas eólicas, que permite o projeto mais eficiente das mesmas, adota hipóteses de escoamento de modo que as velocidades sejam definidas de acordo com a interação com a turbina. A figura 7 mostra um esquema simplificado que é utilizado para definir os parâmetros que são relevantes para o dimensionamento das turbinas.

Figura 7 - Perdas de velocidade do vento na passagem pelo conjunto de pás.



Fonte: Adaptado de Dutra (2008)

Relacionando as Equações 1 e 2, obtém-se a potência absorvida pela turbina em função do coeficiente de potência, obtém-se a Equação (3):

$$P_t = \frac{1}{2} c_p \rho A v^3 \quad (3)$$

Nota-se que a potência disponível é função do cubo da velocidade do vento, assim, um pequeno aumento de velocidade acarreta num considerável aumento de potência gerada.

Segundo Hansen (2008), o valor máximo teórico do coeficiente de potência para uma turbina ideal é de 0,593 (59,3%), valor este também conhecido como *Limite de Betz*:

$$c_{p,máx} = 0,593 \quad (4)$$

Assim, a partir da Teoria de Betz, uma turbina eólica pode extrair no máximo 59,3% da energia contida no vento. Atualmente, as turbinas eólicas mais eficientes disponíveis no mercado possuem rendimentos da ordem de 30% a 40%.

Entretanto, por meio da utilização de difusores, as turbinas eólicas já conseguem extrapolar o limite de Betz, ou seja, extraindo bem mais que 59,3% da energia cinética que chega às turbinas. Assim, cientistas e engenheiros estão pesquisando e desenvolvendo modelos matemáticos que objetivam projetar turbinas eólicas mais eficientes a partir do uso de difusores.

2.2 Turbinas Eólicas com Difusores

Os difusores, aplicados às turbinas eólicas (Figura 8) são dispositivos que promovem o aumento da velocidade do vento que incide sobre a turbina. Essas turbinas também são conhecidas como DAWTs (*Diffuser Augmented Wind Turbines*). Esse aumento de velocidade é causado pela diferença de pressão entre as regiões de entrada e de saída do difusor. Essa diferença de pressão ocorre devido à formação de turbilência, formando vórtices na região à jusante do difusor, resultando na aceleração do vento à montante do difusor. Com o aumento de velocidade, observa-se aumento da geração de energia, pois de acordo com a Equação (1), a potência disponível no vento é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do escoamento.

Figura 8 – Exemplos de DAWTs.



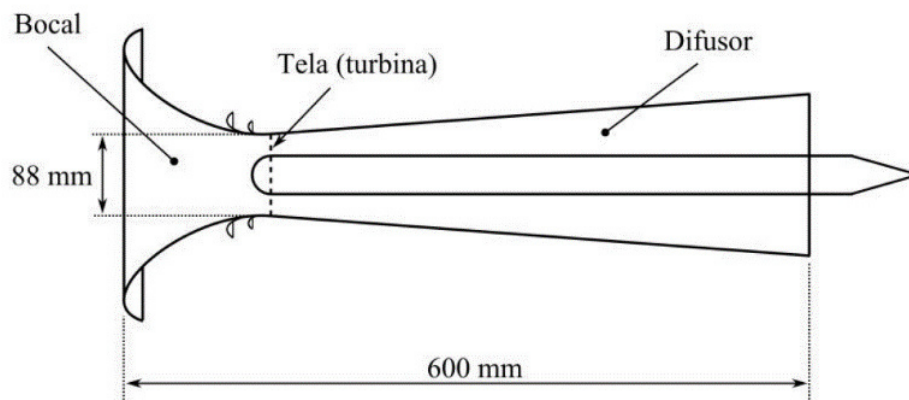
Fonte: Esquerda - Gipe (2010) Direita - Ohya *et al* (2010)

O uso de difusores em turbinas eólicas representa uma evolução essencial na geração de energia. Os estudos das DAWTs iniciou-se por volta da década de 1920, quando Albert Betz propôs que o uso de difusores em turbinas eólicas aumentaria a eficiência das mesmas. Entretanto, os primeiros difusores possuíam comprimento extremamente elevado, o que

naquele momento tornava inviável o uso de difusores, retornando a ser estudado por volta da década de 50.

Kogan *et al.* (1963) propôs o uso do difusor da Figura 9, dotado de um bocal e comprimento elevado. No lugar da turbina, utilizou telas para simular a queda de pressão causada pela turbina. Entretanto, o custo de produção do difusor era elevado, causado pela necessidade de uma estrutura muito maior do que o usual para as turbinas da época.

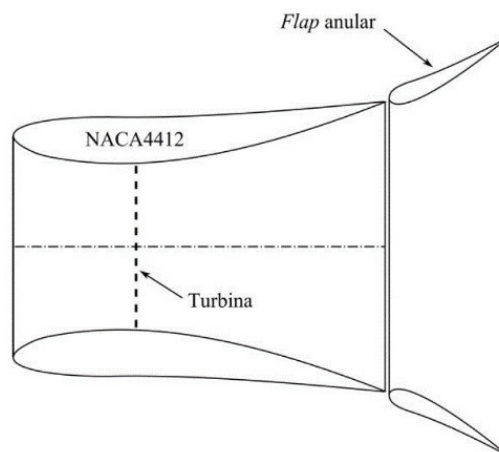
Figura 9 – Modelo-A1 de difusor.



Fonte: Adaptado de Kogan *et al* (1963)

Objetivando reduzir o comprimento do difusor, reduzindo seu custo de produção e facilitando a montagem de todo o conjunto, Igra (1977) estudou um difusor com perfil carenado (Figura 10) para aumentar a área de saída do difusor, provocando maior turbulência do escoamento de ar, obteve melhores resultados em comparação ao modelo anterior.

Figura 10 – Modelo-B de difusor.



Fonte: Adaptado de Igra (1977)

Abe *et al* (2005), realizou ensaios experimentais utilizando uma turbina eólica real, diferentemente dos modelos A1 e B que faziam uso de telas para simular a presença das pás. O difusor em questão era dotado de um bocal para melhorar a captura do vento incidente e de flange em forma de anel na saída para promover a formação dos vórtices, como mostra a Figura 11.

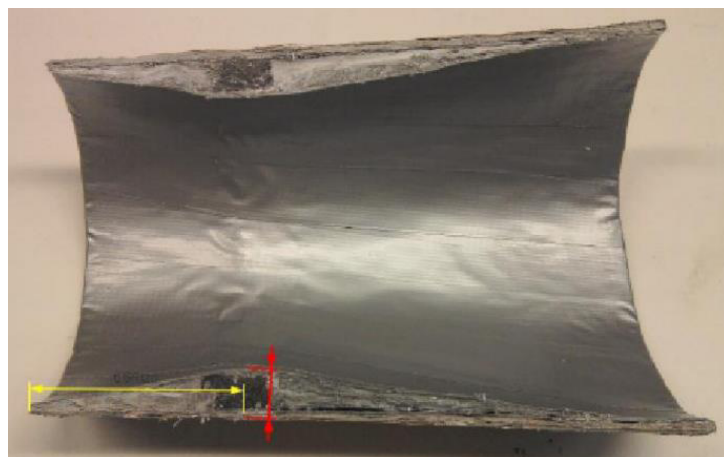
Figura 11 - Difusor com Bocal e Flange.



Fonte: Adaptado de Abe *et al* (2005)

Purwanto (2010) estudou a distribuição de velocidade de dois difusores cônicos com (Figura 12) e sem curvatura interna e concluiu que o difusor cônico simples apresentava aumento de velocidade inferior, pois este não possuía mecanismos para acelerar o vento no seu interior. Difusores cônicos são pouco utilizados e estudados no meio acadêmico por possuírem um desempenho abaixo dos outros tipos de difusores.

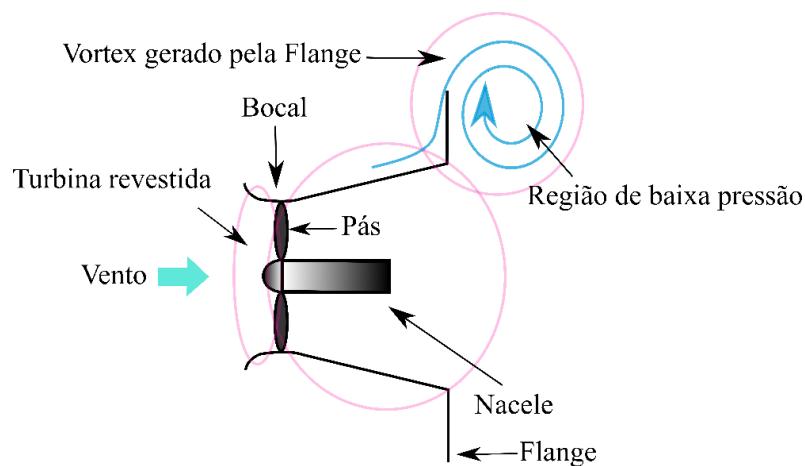
Figura 12 - Difusor cônico com perfil aerodinâmico interno.



Fonte: Adaptado de Purwanto (2010)

A Figura 13 mostra a representação de uma DAWT com flanges e bocal. O flange na saída do difusor é o elemento responsável pela geração de mais turbulência, gerando mais vórtices. Estes vórtices causam uma redução na pressão nesta região, criando uma diferença de pressão entre a montante e a jusante do difusor. Essa diferença de pressão acelera o ar que se concentra na região de entrada do difusor, similar ao efeito de aspiração, elevando sua velocidade, assim permitindo o posicionamento da turbina nesta região de modo a elevar a extração de energia por parte da turbina (OHYA e KARASUDANI, 2010).

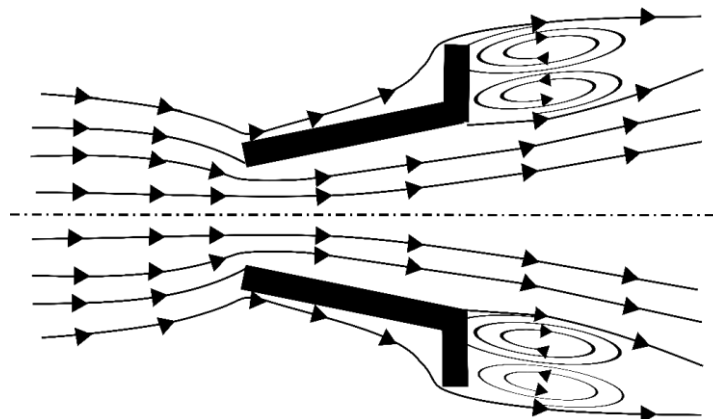
Figura 13 – Fluxo de massas de ar através de DAWT com bocal e flange.



Fonte: Adaptado de Ohya *et al* (2010)

A Figura 14 mostra uma representação de um dos diversos mecanismos que promovem o aumento da velocidade do vento, no caso, difusor com flanges. Ainda nesta figura, é mostrada uma representação das linhas de corrente se concentrando na região de entrada do difusor, além dos vórtices que se formam na região de saída.

Figura 14 - Esquema representando a formação de vórtices em difusor com flange.

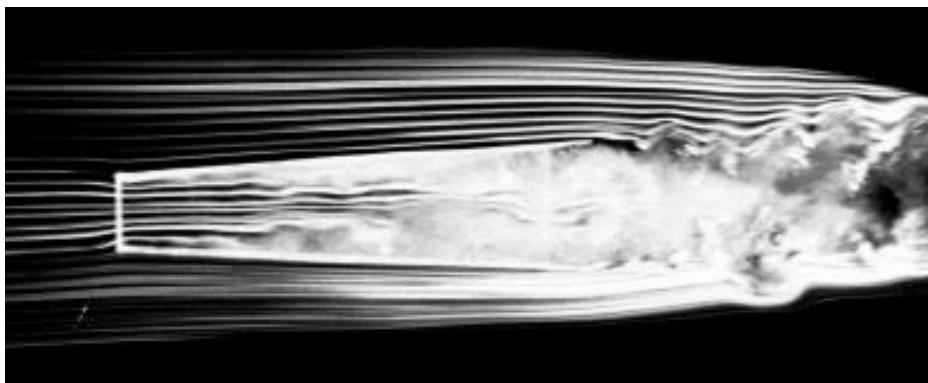


Fonte: Adaptada de Abe *et al.* (2004)

Os exemplos citados na Figura 13 e Figura 14 são apenas alguns dos diversos mecanismos que promovem a formação de vórtices, os quais podem ser vistos em Barbosa (2013), que faz um breve resumo histórico quanto ao uso de difusores em turbinas eólicas desde os seus primórdios até o ano de publicação deste trabalho, 2013.

No trabalho de Ohya e Karasudani (2010), é possível observar o estreitamento das linhas de corrente na seção de entrada do difusor e a formação dos vórtices na seção de saída do difusor em um trabalho experimental que utilizou a técnica de visualização de escoamentos com injeção de fumaça (Figura 15), levando em consideração que o fluido escoava no sentido da esquerda para a direita. De acordo com Ohya e Karasudani (2010), se o difusor possuir um comprimento elevado, o fluido terá seu ponto de maior velocidade na entrada do difusor.

Figura 15 – Linhas de corrente de ar com injeção de fumaça movimentando-se em difusor cônico.



Fonte: Adaptado de Ohya *et al.* (2010)

2.3 Introdução à modelagem matemática de DAWTs

O projeto de uma turbina eólica tem como objetivo extrair o máximo da energia contida no vento. O parâmetro que mede esta parcela de energia extraída é o coeficiente de potência. Uma das primeiras metodologias para a determinação do coeficiente de potência de uma turbina eólica com difusor foi mostrada em Hansen (2008), onde o autor faz uma estimativa do coeficiente de potência a partir do produto do coeficiente de empuxo pela razão de velocidades, conforme mostra a Equação (5):

$$C_p = C_{emp} \mathcal{E} \quad (5)$$

onde c_{emp} é o coeficiente de empuxo, sendo um fator de correção de indução axial, e ε é a razão de velocidades com a presença de turbina, dado pela Equação (6).

$$\varepsilon = \gamma(1 - a) \quad (6)$$

onde γ é a razão de velocidades do difusor sem a presença da turbina e a é o fator de indução axial.

A literatura utiliza o termo que aqui será intitulado *razão de velocidade*, ou também fator de aumento de velocidade, dado pela Equação (7):

$$\gamma = \frac{v_i}{v_0} \quad (7)$$

onde v_i é a velocidade induzida pelo difusor e v_0 é a velocidade do vento na região não perturbada. Sendo assim, a variável γ mede o aumento percentual da velocidade modificada pela presença do difusor.

A teoria clássica de difusores aplicados às turbinas considera que o coeficiente de potência de uma DAWT é definido pela Equação (8) (SORENSEN, 2016):

$$c_p = \varepsilon \left[1 - \left(\frac{v_4}{v_0} \right)^2 - 1(1 - \eta)(1 - \beta^2)\varepsilon^2 \right] \quad (8)$$

onde v_4 é a velocidade na esteira, η é a eficiência do difusor e β é a razão entre a área de entrada e a área de saída do difusor. A Equação (7) mostra a relação entre o coeficiente de potência e o aumento de velocidades causado pelo difusor. Assim, o estudo de difusores é útil para fornecer informações que aprimoraram os modelos matemáticos a serem utilizados no projeto mais eficiente de turbinas eólicas.

Ao longo dos anos, foram desenvolvidas diversas metodologias para calcular o coeficiente de potência de uma DAWT a partir da razão de velocidades.

Modelos matemáticos recentes para o projeto de DAWTs, utilizam o fator de aumento de velocidades em sua formulação para determinação do coeficiente de potência, como visto em Vaz e Wood (2016), que propõe a Equação (9):

$$c_p = \varepsilon(1 - c_{p3}) + \varepsilon^3[\eta(1 - \beta^2) - 1] \quad (9)$$

onde c_{p3} é o coeficiente de pressão na saída do difusor. A razão de velocidades para o difusor com a presença da turbina é mostrada na Equação (10):

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_0} \quad (10)$$

onde v_1 é a velocidade do escoamento com a presença de difusor e turbina. No trabalho de Silva et al (2018), o coeficiente de potência de uma turbina hidrocínética com difusor é dado pela Equação (11):

$$c_p = \gamma(1 - a)[4a(1 - a) - \gamma^2(1 - a)^2(1 - \eta)(1 - \beta^2)] \quad (11)$$

Um dos trabalhos mais recentes a respeito de difusores é o de Vaz (2019), em que o coeficiente de potência de uma turbina hidrocínética, cuja modelagem é similar às de turbinas eólicas, através do modelo BEM (*Blade Element Moment*), é dado por:

$$c_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^{\lambda} \gamma a'(1 - a)x^3 dx \quad (12)$$

onde λ representa a relação de velocidade de ponta de pá, a' é o fator de indução axial e x é a razão de velocidade local.

O presente trabalho tem como proposta analisar a influência do ângulo de abertura em difusores puramente cônicos na geração de energia em um microgerador. Entretanto, por limitações quanto à montagem do aparato experimental, em lugar da potência elétrica, foram medidas as tensões elétricas lidas nos terminais do microgerador.

Assim, este trabalho definiu um parâmetro similar à razão de velocidades, que aqui será chamado de, *razão de tensões*:

$$\varepsilon_v = \frac{U_i}{U_0} \quad (13)$$

onde U_i são as tensões elétricas medidas no microgerador com a presença do difusor, respectivamente e U_0 representa a mesma variável, mas sem a presença do difusor.

Assim, o fator ε_v quantifica o percentual de aumento de tensão elétrica, enquanto que ε quantifica o percentual de aumento de velocidade no difusor sem a presença do microgerador.

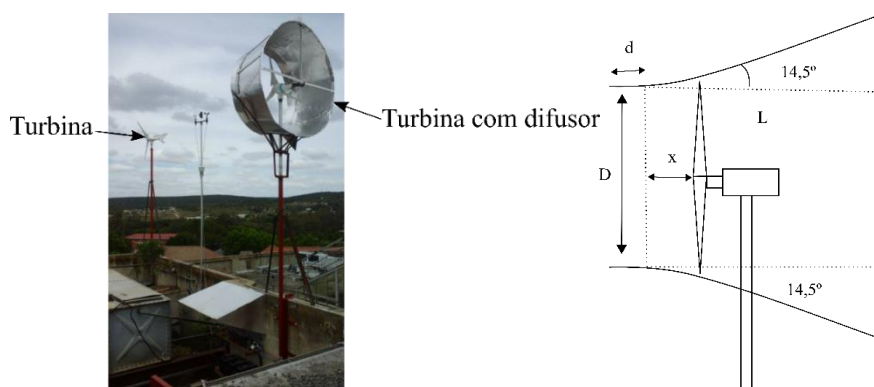
Verifica-se a necessidade de se estudar o fator de aumento de velocidade em difusores sem e com a presença da turbina para a formulação dos modelos matemáticos que permitem o seu dimensionamento.

2.4 Difusores cônicos aplicados às turbinas eólicas

Quanto ao uso de difusores puramente cônicos em turbinas eólicas, este é muito restrito pelo fato de que estes difusores não propiciam um grande aumento de velocidade e potência elétrica quando comparado com os demais tipos de difusores disponíveis na literatura, porém, por apresentar uma geometria simples, torna-se o tipo de difusor mais simples para ser ensaiado devido a sua facilidade e baixo custo de construção.

O trabalho de Masukume *et al* (2018) propõe a análise de dois aerogeradores idênticos (Figura 16), sendo um deles funcionando com um difusor acoplado e o outro, ao lado, sob as mesmas condições, sem nenhum aumentador de potência. Inicialmente determinou-se os parâmetros geométricos: ângulo de abertura (θ) e o valor de L/D , sendo $\theta = 14,5^\circ$ e $L/D = 0,5$, baseado no trabalho feito pelo mesmo autor em 2016. Após a construção e instalação dos aparatos, dados coletados indicaram o aumento de velocidade (*Wind speed*) implica em mais aumento de potência (*Power*) das turbinas eólicas com difusor (DAWT) em detrimento das sem difusor (*BWT – Bare Wind turbine*). Houve aumento de aproximadamente 2,5 vezes na potência gerada em alguns pontos.

Figura 16 – (a) Ensaio de turbina com e sem difusor. (b) Projeto.



Fonte: Masukume *et al* (2018)

O trabalho demonstra que ao instalar o difusor cônico, a velocidade de vento necessária para tirar as pás da inercia diminui de 2,5 m/s para 1,6 m/s, atestando que o uso destes aumentadores de potência são indicados para regiões com baixas velocidades incidentes.

Os estudos mostrados pelo trabalho de Siavach *et al.* (2019) referem-se a ensaios de uma microturbina eólica na geração de potência revestida por um anel e um difusor aerodinâmico que transforma-se, utilizando deslizamento entre as peças, um difusor completo, cobrindo 360° e diminuindo até um difusor de 180° , como mostra a Figura 17.

Figura 17 - DAWT com revestimento variado.



Fonte: Siavach *et al* (2019)

Ao executar os experimentos, concluiu-se que o aumento de potência depende, além da geometria do difusor e da velocidade do vento. Em um regime onde a velocidade do vento fica entre 7 m/s e 10 m/s, o difusor 360° apresenta os melhores resultados, sendo de até 55,33% de incremento de potência com velocidade de 7 m/s, e acima deste valor, o difusor 180° apresenta os melhores resultados com até 75% de aumento de potências com velocidade de 11,5 m/s.

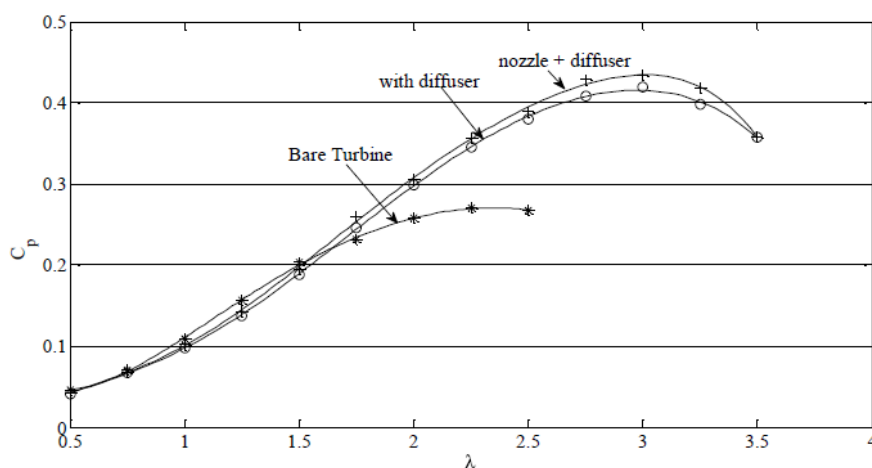
De acordo com os ensaios feitos por Tanoue (2018), onde utilizou-se o formato de tronco de cone, sem flanges e sem bocais, houve aumento de até 21% na velocidade

comparado ao mesmo aparato, sem o difusor, sendo o ângulo de abertura de 15° utilizado nos experimentos, mostrando que a viabilidade dos dispositivos, mesmo com eficiência abaixo do que os mais sofisticados, apresenta menor dificuldade na construção e baixo custo de produção, tornando-o utilizável.

Estudos propostos por Kosasih e Tondelli (2012) mostram resultados de coeficiente de potência c_p para turbinas sem difusor (*Bare Turbine*), com difusor (*with diffuser*) e difusor com presença de bocal (*nozzle+diffuser*).

O gráfico da Figura 18 mostra que, de acordo com as condições e parâmetros utilizados, as turbinas associadas ao mecanismo difusor-bocal apresentam melhores resultados se comparados aos números de coeficiente de potência de turbinas com difusor, que por sua vez apresenta valores muito melhores em comparação às turbinas sem o dispositivo.

Figura 18 - Comparação de C_p para turbinas sem difusor, com difusor e com difusor-bocal.



Fonte: Adaptado de Kosasih *et al* (2012)

No trabalho de Barbosa (2013) é mostrada a relação entre a distribuição de velocidade e as dimensões dos difusores cônicos. Entretanto, os ângulos de abertura dos difusores não foram padronizados de acordo com seus comprimentos.

Desse modo, o presente trabalho fixa um comprimento para todos os difusores, de modo que se possa analisar a influência somente do ângulo de abertura, ressaltando que estes resultados são válidos apenas para esse comprimento.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Esta seção descreve o aparato e o procedimento experimental, utilizados para a realização dos ensaios, para as leituras das velocidades e das tensões elétricas nos microgeradores e nos difusores cônicos.

3.1 Aparato Experimental

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados materiais de baixo custo para confecção dos elementos, em essencial, o túnel de vento (MOREIRA, 2018), o microgerador eólico (TANOUE, 2018) e os difusores cônicos, construídos neste trabalho. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) – UFPA Campus Guamá.

O microgerador eólico (Figura 19) utilizado para obtenção das tensões elétricas, foi construído a partir de chapas de aço galvanizado de 0,4mm para a construção das pás e um motor de bandeja de um DVD com tensão nominal de 2 Volts (gerador).

Figura 19 - Microturbina eólica.



Fonte: Autoria própria

O túnel de vento é do tipo soprador e constituído por um ventilador industrial, modelo HYA-1380 (1,5 hp). A seção de contração e a seção de estabilização foram construídas a partir de folhas de compensado. A seção de contração tem a forma de tronco de pirâmide e a seção de estabilização tem a seção quadrada, e conta com dois retificadores, sendo o primeiro feito de tubos de Cloreto de Polivinil (50 mm) e o segundo feito de canudinhos plásticos (10 mm).

Deve ser salientado que este túnel de vento se trata de uma versão de baixo custo, logo, seus resultados não possuem o mesmo grau de precisão de um túnel de vento profissional, entretanto, este túnel de vento consegue fornecer resultados que concordam com a literatura. A Figura 20 mostra o túnel de vento utilizado nos ensaios.

Figura 20 - Túnel de vento.



Fonte: Autoria própria

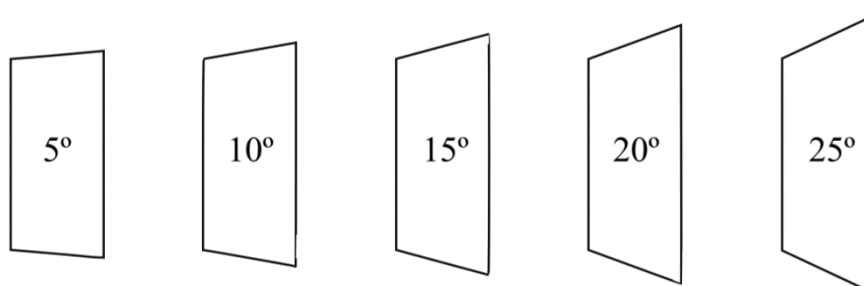
Para a aquisição de dados referentes às velocidades e às tensões, os equipamentos utilizados foram:

- Multímetro Digital;
- Tubo de Pitot TPL – 06 – 500 – T;
- Transdutor de Pressão 498,18 Pa;
- Placa de Aquisição de dados;
- Fonte chaveada 12V, 1ª;
- Microcomputador.

3.1.1 Construção dos difusores cônicos

Para obtenção dos resultados desejados, foram construídos 5 difusores cônicos, com a razão de comprimento-diâmetro $L/d = 0,5$. A diferença entre cada difusor, e objeto de análise deste trabalho, está nos seus ângulos de abertura, que variam de 5° até 25° . A Figura 21 mostra uma vista lateral dos difusores com os valores dos ângulos de abertura utilizados.

Figura 21 – Vista lateral dos difusores ensaiados.



Fonte: Autoria própria

Os difusores foram construídos a partir de chapas de aço galvanizado com 0,4 mm de espessura. As demais ferramentas e materiais, tais como furadeira, tesoura de corte, e afins, foram disponibilizadas pelo LABEM.

A construção dos difusores para os ensaios baseou-se no trabalho de Barbosa (2013), o qual utilizou os difusores mostrados na Figura 22.

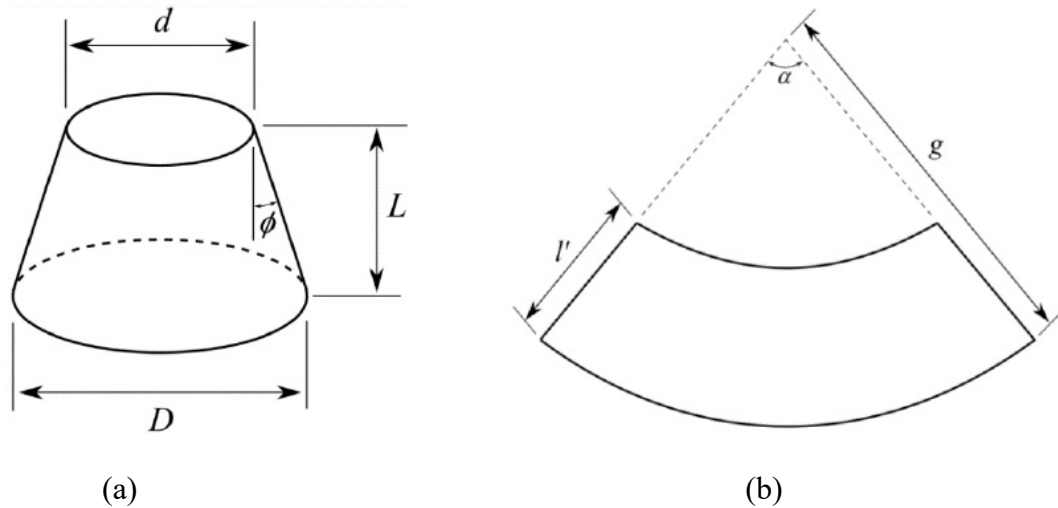
Figura 22 - Difusores cônicos.



Fonte: Barbosa (2013)

A Figura 23 mostra os desenhos em perspectiva (a) e planificado (b) para visualização das dimensões necessárias para a construção dos difusores.

Figura 23 - Modelo do difusor em perspectiva (a) e planificado (b).



Fonte: Adaptado de Tanoue (2018)

Para a obtenção das dimensões desejadas (d , L , e ϕ), são utilizadas, da geometria plana e espacial, as Equações (14), (15) e (16).

$$l' = \sqrt{L^2 + (R - r)^2} \quad (14)$$

$$g = \frac{Rl'}{R - r} \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{D \cdot 180^\circ}{g} \quad (16)$$

onde, para D representa o diâmetro de saída do difusor, R representa o raio de saída, L é o comprimento, d é o diâmetro de entrada, r é o raio de entrada, ϕ é o ângulo de abertura, l' é a geratriz do tronco de cone, g é a geratriz do cone e α é o ângulo de abertura na planificação.

Fixou-se o valor do diâmetro de entrada do difusor em 20 cm, pois o microgerador possui diâmetro de rotor de aproximadamente 19,5 cm. Como a razão entre $L/d = 0,5$, o comprimento de cada difusor foi fixado em 10 cm.

Aplicando as dimensões fixas nas equações da literatura, foram obtidos os valores mostrados na Tabela 1.

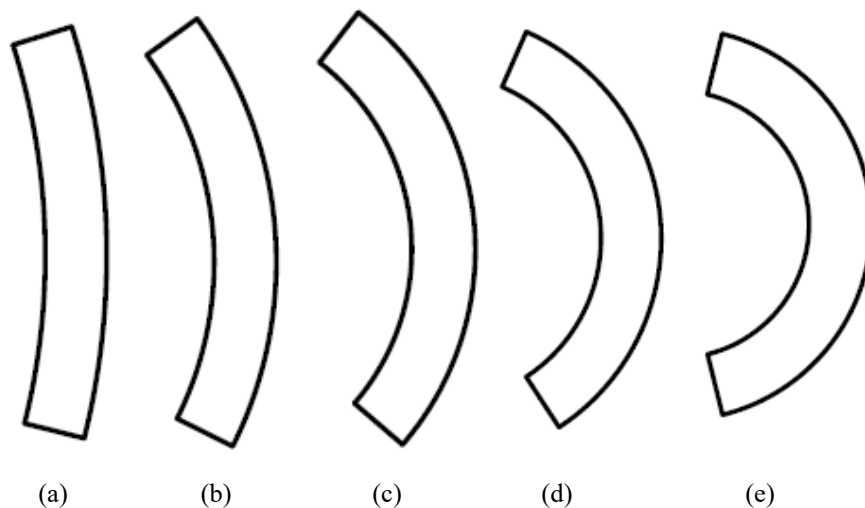
Tabela 1 - Dimensões para construção de modelo plano de difusores cônicos.

ϕ	5°	10°	15 °	20 °	25 °
ϕ (rad)	0,087	0,174	0,262	0,351	0,442
L (cm)	10	10	10	10	10
r (cm)	10	10	10	10	10
D	21,75	23,53	25,36	27,3	29,3
R	10,87	11,76	12,68	13,6	14,7
l' (cm)	10,04	10,15	10,35	10,6	11
g (cm)	124,77	67,74	48,99	39,9	34,7
α (graus)	31,38	62,51	93,17	123	152
$g - l'$	114,74	57,59	38,64	29,24	23,66

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores encontrados na Tabela 1, com auxílio de um software CAD, foram obtidos os moldes dos difusores em suas dimensões reais, conforme mostra o esquema da Figura 24.

Figura 24 – Esquema dos moldes dos difusores em escala reduzida: 5° (a) 10° (b) 15° (c) 20° (d) 25° (e)

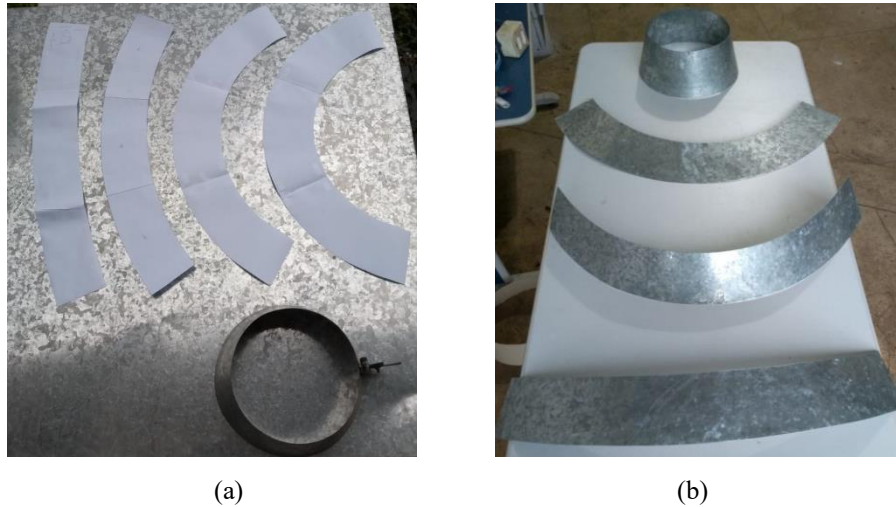


Fonte: Autoria própria

Após determinar as dimensões para os moldes planificados, estes foram impressos em papel A4 e em seguida fixados à chapa de aço galvanizado para o corte. Obtidas as formas em arco das chapas metálicas, estas foram dobradas e fixadas em suas extremidades para a obtenção da forma cônica desejada.

A Figura 25 mostra parte do processo de construção dos difusores.

Figura 25 - Moldes em tamanho real dispostos na chapa de aço galvanizado (a). Planificação dos difusores (b).



Fonte: Autoria própria

Após a obtenção dos moldes planejados dos difusores, cada chapa foi dobrada de modo a se produzir o formato cônico do difusor. As extremidades das chapas foram fixadas com parafusos e porcas, permitindo o acoplamento da peça que sustentaria o difusor e seu suporte na frente do túnel de vento para os ensaios.

A Figura 26 mostra os difusores finalizados.

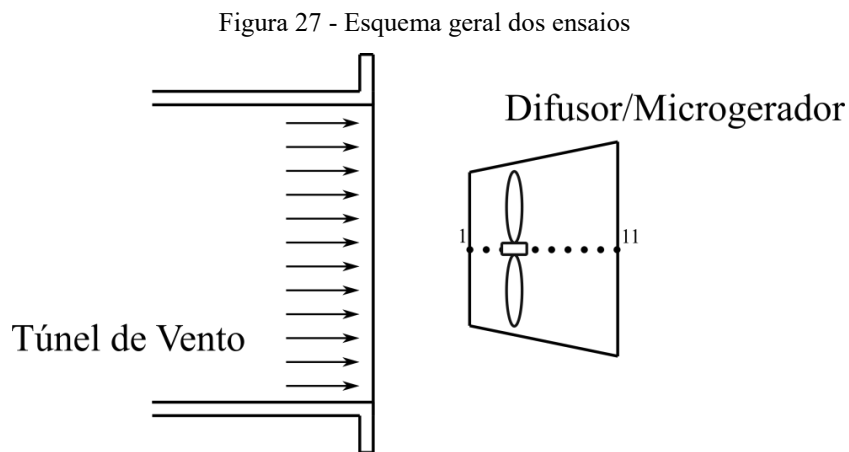
Figura 26 - Difusores montados.



Fonte: Autoria própria

3.2 Procedimento Experimental

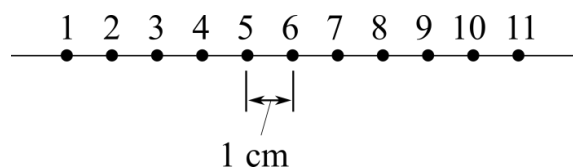
Os experimentos foram conduzidos essencialmente em três etapas: 1) Mapeamento da seção de testes através da leitura de velocidades, imediatamente na saída do difusor por este se tratar de um túnel de seção aberta, por meio do tubo de Pitot; 2) Medição das tensões elétricas internamente aos cinco difusores, desde a montante até a jusante, por meio do microgerador eólico; 3) Medição das velocidades internamente aos cinco difusores, desde a montante até a jusante, por meio do tubo de Pitot. A Figura 27 mostra o esquema geral dos ensaios.



Fonte: Autoria própria.

As leituras de velocidade e tensão elétrica foram realizadas internamente ao difusor, com espaçamentos de 1 cm entre cada ponto. Assim, os pontos 1 e 11 correspondem às leituras realizadas nos planos de entrada e de saída, respectivamente (Figura 28).

Figura 28 - Pontos de leitura de velocidade e tensão



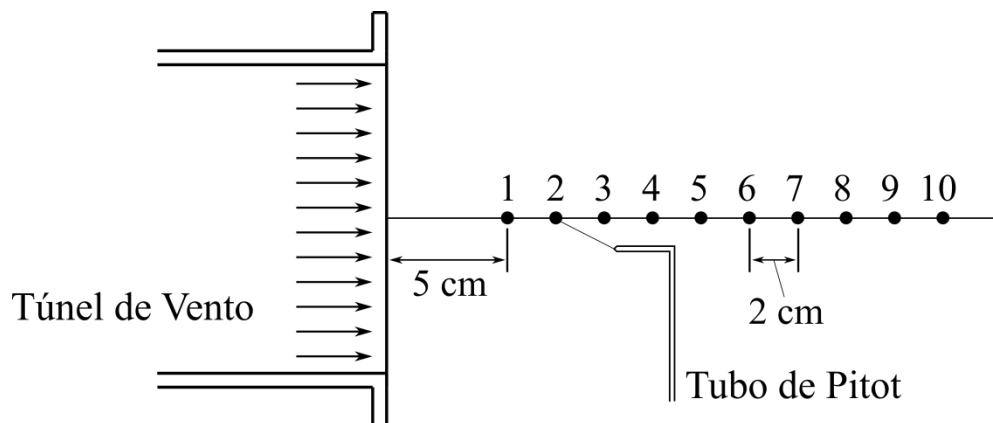
Fonte: Autoria própria.

Tanto para o mapeamento quanto para os pontos internos aos difusores, as velocidades foram obtidas a partir de uma amostra de 5000 valores de velocidade, com auxílio da placa de aquisição. Para todas as medições, o inversor de frequência foi fixado em 30 Hz.

3.2.1 Mapeamento da velocidade na seção de testes

Esta etapa teve como objetivo analisar o comportamento da velocidade na seção de testes sem a presença do difusor ou do microgerador, pois se trata de um túnel de vento aberto com seção de testes não definida. A região mapeada é mostrada na Figura 29, afastada 5cm da saída do túnel até o afastamento de 23cm.

Figura 29 - Esquema de posições do tubo de Pitot para mapeamento de velocidades.



Fonte: Autoria própria

A Figura 30 mostra a execução das leituras de velocidade.

Figura 30 - Tubo de Pitot posicionado na saída do túnel de vento.

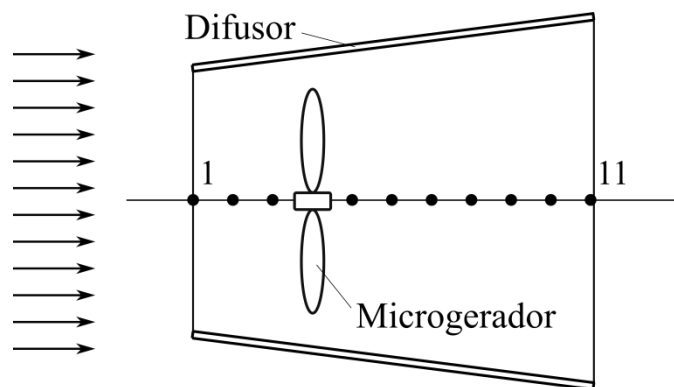


Fonte: Autoria própria

3.2.2 Leitura das tensões elétricas internamente aos difusores

Nesta etapa, o microgerador foi posicionado ao longo dos 11 pontos internos cada um dos 5 (cinco) difusores. Este ensaio foi realizado com o inversor de frequência fixado em 30 Hz, equivalente a uma tensão elétrica média de 0,5 V (microgerador sem difusor). As tensões elétricas foram lidas com o auxílio do multímetro.

Figura 31 - Esquema de posições para mapeamento de velocidades.



Fonte: Autoria própria

A Figura 32 mostra a execução das leituras de tensões com a presença do difusor.

Figura 32- Microgerador eólico com difusor

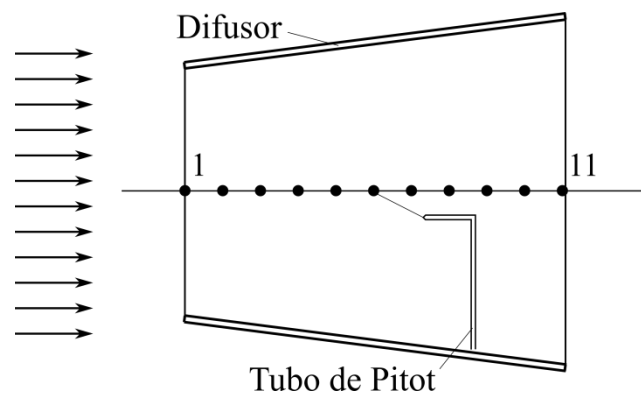


Fonte: Autoria própria

3.2.3 Leitura das velocidades internamente aos difusores

O tubo de Pitot foi posicionado ao longo dos 11 pontos internos para cada um dos 5 (cinco) difusores, sem a presença do microgerador (Figura 33). Este ensaio também foi realizado com o inversor de frequência fixado em 30 Hz, com velocidade média de 1,85 m/s. Barbosa (2013) e Figueiredo (2014) utilizaram velocidades distintas em seus trabalhos e concluíram que as curvas de aumento de velocidade apresentavam comportamento similar, justificando aqui o uso de apenas uma velocidade.

Figura 33 - Esquema de posições para mapeamento de velocidades.



Fonte: Autoria própria

A Figura 34 mostra a execução da leitura de velocidades.

Figura 34- Leitura de velocidade com difusor



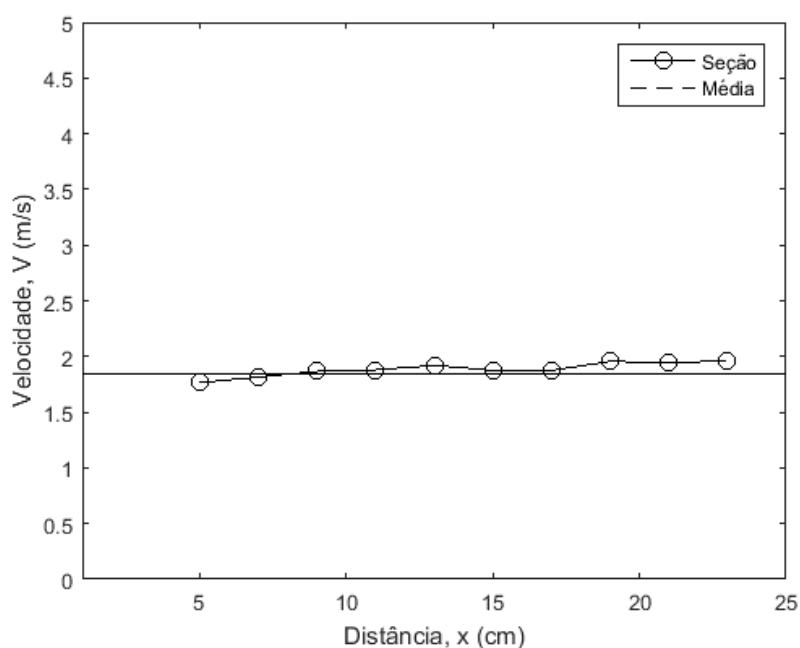
Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Mapeamento da velocidade na seção de testes

A Figura 35 mostra o mapeamento da seção de teste do túnel de vento, para verificar se esta seção apresenta estabilidade quanto às velocidades axiais de modo a reproduzir os resultados de um túnel de vento profissional.

Figura 35 – Mapeamento da região de saída do túnel.



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos neste ensaio indicam a existência de uma moderada variação de velocidades nos pontos ensaiados na direção do escoamento. Este resultado se deve ao fato de que o túnel de vento possui um conjunto de duas chapas de aço que servem para apoiar os canudinhos que tornam o escoamento menos turbulento na seção teste, esta variação ocorre em túneis de vento profissionais.

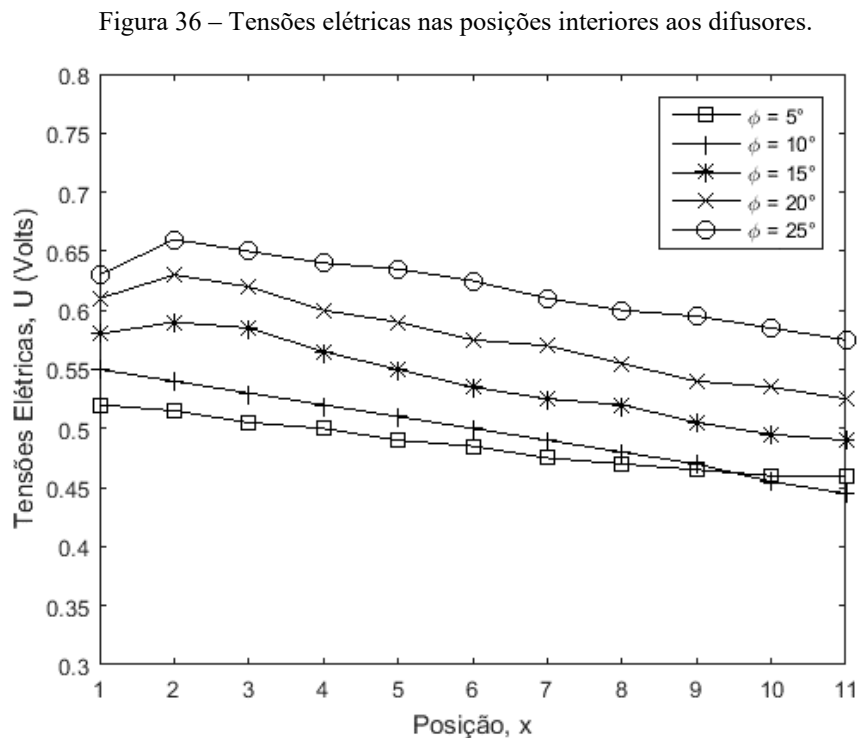
Ao analisar estes resultados, foi definido que os difusores (e microgerador) seriam instalados a uma distância de 5 cm da saída do túnel de vento, onde foi feito o mapeamento, para a realização dos ensaios. Assim, para as leituras de velocidade em cada difusor e para as leituras de tensão elétrica nos microgeradores, foi utilizado como velocidade o valor de referência de 1,85 m/s. Para esta velocidade de referência, foi calculada a tensão elétrica

média de 0,5 V (tensão elétrica de referência). Este valor será útil para medir o aumento de tensão elétrica no microgerador com a presença dos difusores.

Esta configuração de ensaio é utilizada em alguns trabalhos, tal como em Barbosa (2013) e Mendes (2015), devido à dificuldade tanto na disponibilidade quanto na construção de túneis de vento de grandes seções de teste.

4.2 Leitura das tensões elétricas internamente aos difusores

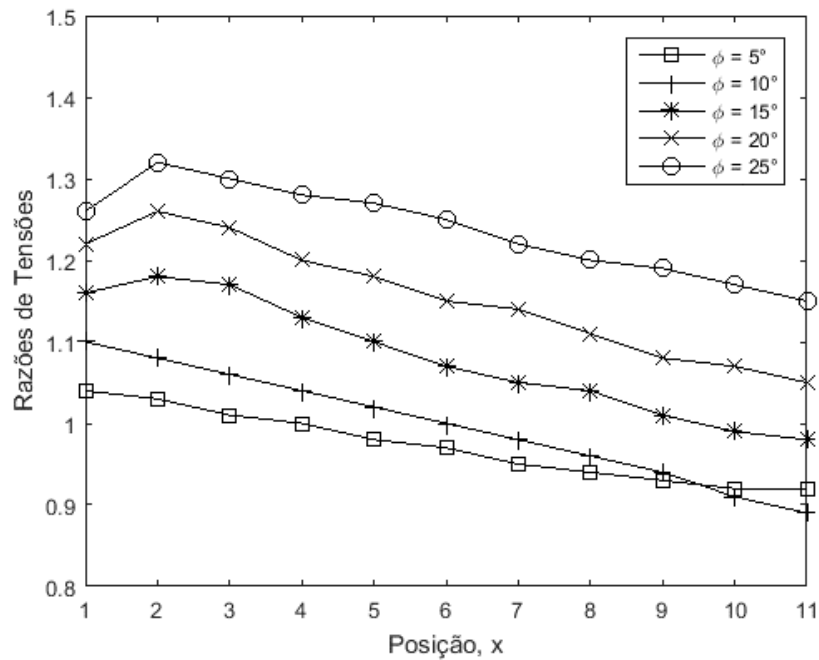
Esta etapa se constitui uma das mais importantes do presente trabalho, pois exibe o comportamento das tensões elétricas no microgerador por meio do uso dos difusores cônicos. A Figura 36 exibe os valores das tensões elétricas medidas em cada um dos 11 pontos internamente para cada difusor e seus ângulos de abertura (5° , 10° , 15° , 20° e 25°). O ponto 1 representa o plano de entrada do difusor, enquanto que o ponto 11 representa o seu plano de saída.



Fonte: Autoria própria.

A partir destes valores de tensão, aplicando a relação definida na Equação 13, foram calculadas as razões de tensões. A Figura 37 mostra as razões de tensões para cada um dos difusores, tendo como base, a tensão elétrica de referência do microgerador, $U_0 = 0,50$ V, sem a presença de difusor.

Figura 37 – Razões de tensões nas posições internas aos difusores.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostram que para os difusores com relação $L/d = 0,5$, o aumento do ângulo de abertura (ϕ) promove uma maior extração da energia cinética contida no vento. Por se tratar de um microgerador construído a partir de um motor de corrente contínua, os valores de tensões elétricas elevadas indicam maiores velocidades de rotação do rotor. Esse aumento de velocidade atesta a melhora significativa da extração de energia por conta do uso dos difusores.

De maneira geral, para todos os difusores, as razões de tensões são maiores na região próxima ao plano de entrada e decrescem de forma suave em direção ao plano de saída de cada difusor. Este comportamento ocorre devido ao aumento de velocidades se concentrar na entrada, onde as linhas de corrente convergem, influenciando na geração de tensões, sendo semelhante à razão de velocidades encontradas no trabalho de Barbosa (2013). Para os difusores de $\phi=5^\circ$ e $\phi=10^\circ$, o ponto de maior razão de tensões ocorre exatamente no plano de

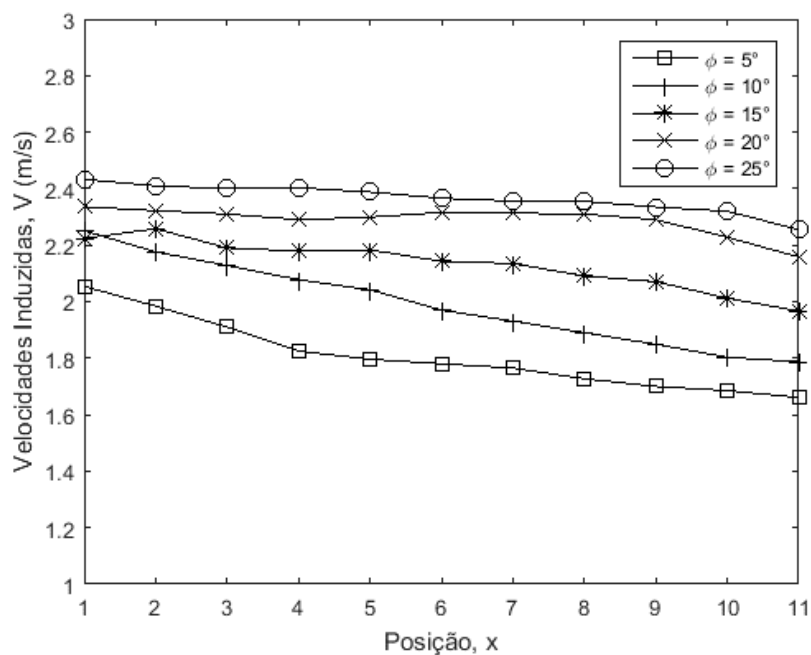
entrada do difusor. Nos demais difusores ($\phi=15^\circ$, $\phi=20^\circ$ e $\phi=25^\circ$), os seu ponto de máximo ocorrem na posição 2.

Dentre os difusores testados, o que apresentou maior aumento de tensões foi o de $\phi=25^\circ$, com aumento de aproximadamente 32%, no ponto 2. Enquanto o que apresentou menor aumento foi o difusor de 5° , com aproximadamente 4% de ganho, no ponto 1. Fato este que pode ser explicado pela geração de menores turbulências na região de saída de difusores com pequenos ângulos de abertura, sendo presentes em maior escala nos difusores com maior abertura. Os difusores de $\phi=5^\circ$, $\phi=10^\circ$ e $\phi=15^\circ$ apresentaram pontos com redução de tensão elétrica, próximos ao plano de saída do difusor. Um dos fatores para este comportamento é a baixa conicidade do difusor, fazendo com que estes funcionem como dutos cilíndricos, ocasionando perda de carga ao longo do escoamento, e conseqüentemente, redução na velocidade do vento.

4.3 Leitura das velocidades internamente aos difusores

Esta etapa é útil para estabelecer uma relação entre os aumentos de velocidades causados pelos difusores com os aumentos das tensões elétricas no microgerador com a presença dos mesmos difusores, ensaiados sob as mesmas velocidades. A Figura 38 exibe os valores das velocidades medidas em cada um dos 11 pontos internamente para cada difusor.

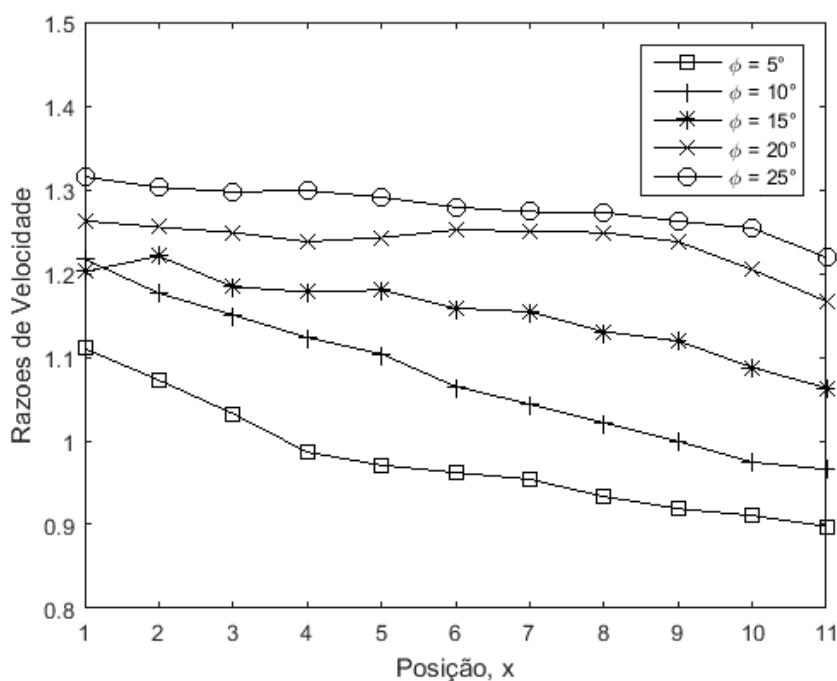
Figura 38 - Velocidades nas posições internas do difusor.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos valores das velocidades, foram calculadas as razões de velocidade para cada ponto por meio da equação (6). Para isto, foi utilizado o valor de 1,85 m/s como velocidade de referência. As distribuições dos fatores de aumento de velocidade (razões de velocidade) no interior de cada difusor são mostradas na Figura 39.

Figura 39 - Razão de velocidades no interior dos difusores.



Fonte: Autoria própria

Os resultados mostram que para os difusores com relação $L/d = 0,5$, o aumento do ângulo de abertura (ϕ) promove um aumento da velocidade do vento que chega ao difusor. Esse aumento de velocidade mostra claramente o efeito do difusor sobre o escoamento do ar, tal como visto em Barbosa (2013).

De maneira muito similar à leitura das tensões elétricas, em todos os difusores, as maiores razões de velocidades se localizam na região próxima ao plano de entrada e decrescem também em direção ao plano de saída de cada difusor. O difusor de $\phi=20^\circ$ foi o único que apresentou comportamento diferente dos demais quanto à distribuição interna de velocidades.

Este comportamento é semelhante à distribuição de velocidades obtidas em Barbosa (2013), mas para o difusor de 5° e $L/d = 2,3$, em que o maior aumento de velocidade ocorreu no plano de entrada do difusor, e diminuía em direção ao plano de saída. No referido trabalho,

os demais difusores apresentaram uma redução na velocidade do vento antes mesmo deste alcançar o difusor.

Para os difusores testados (exceto o de $\phi=15^\circ$), o ponto de maior razão de velocidades ocorre exatamente no plano de entrada do difusor. No difusor de $\phi=15^\circ$, a maior razão de velocidades ocorreu no ponto 2.

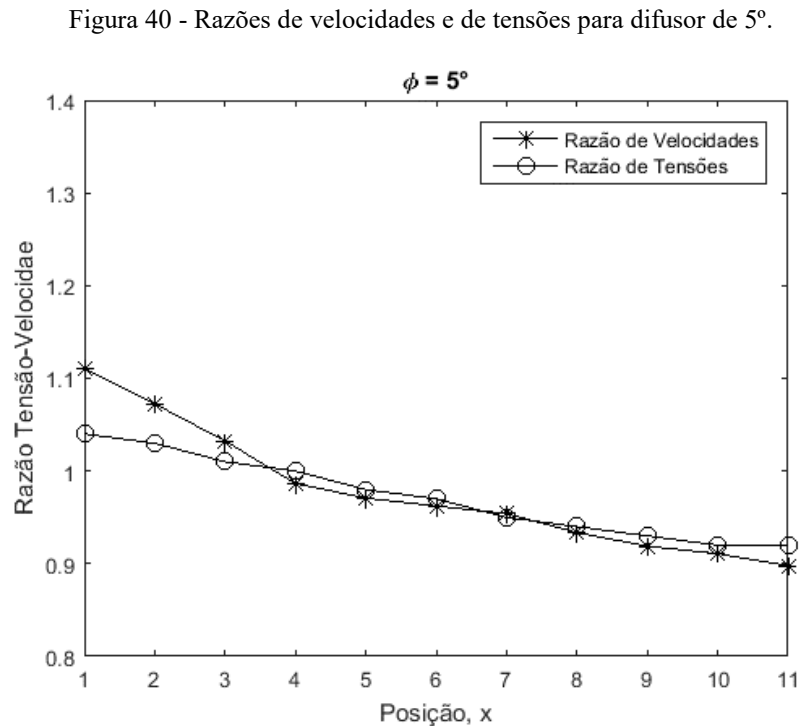
Dentre os difusores testados, o que apresentou maior aumento de velocidades também foi o difusor de $\phi=25^\circ$, com aumento de aproximadamente 32%, enquanto que o que apresentou menor aumento foi o difusor de 5° , com aproximadamente 11% de ganho.

Os difusores de $\phi=5^\circ$ e $\phi=10^\circ$ apresentaram pontos com redução de velocidade, próximos ao plano de saída do difusor, similar ao que ocorreu com as leituras de tensão elétrica.

4.4 Relação entre as razões de tensões e de velocidades

As Figuras 40, 41, 42, 43 e 44 mostram a relação entre a razão de velocidades e a razão de tensões para cada difusor.

A Figura 40 mostra o gráfico de razão-tensão para o difusor de $\phi=5^\circ$:

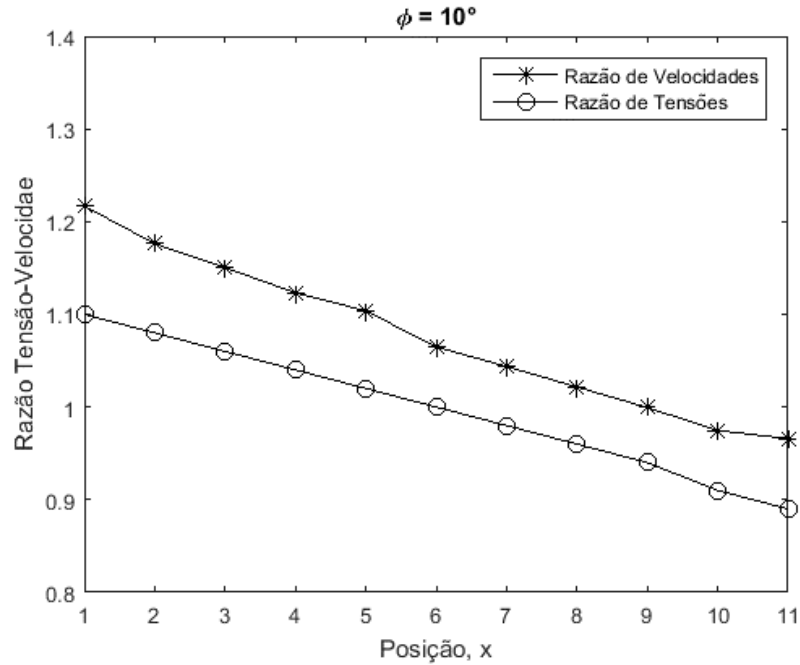


Fonte: Autoria própria

Para o difusor de $\phi=5^\circ$, as curvas de razão de tensão e razão de velocidades foram quase coincidentes, apresentando seu ponto máximo no ponto 1, sendo os ganhos de aproximadamente 11% na velocidade e de 4% na tensão elétrica. Em seguida, estes ganhos decrescem em direção ao plano de saída do difusor. Este difusor, por apresentar ângulo de abertura muito pequeno, mostra pouca eficiência como aumentador de potência, pois age de maneira muito semelhante a um duto, já que seu diâmetro de saída tem valor próximo ao diâmetro de entrada, devido sua baixa conicidade, apresentando assim pouca influência sobre o escoamento do ar. Outro fator a ser considerado é que de acordo com a proposta de Barbosa (2013), a intensidade dos vórtices gerados ocorre pela diferença entre os raios de entrada e de saída do difusor. Como para este caso, os diâmetros são próximos, esta baixa vorticidade induz menos velocidade no vento.

A Figura 40 mostra o gráfico de razão-tensão para o difusor de $\phi=10^\circ$:

Figura 41- Razões de velocidades e de tensões para difusor de 10° .

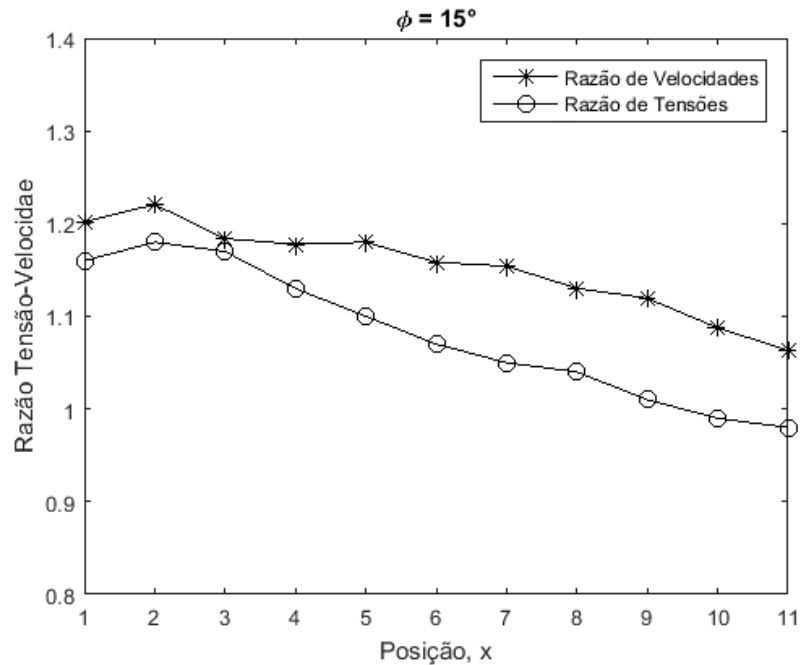


Fonte: Autoria própria

Para o difusor de $\phi=10^\circ$, as curvas de razão de tensão e razão de velocidades para o difusor de 10° apresentam comportamento semelhante, cada uma sendo similar a uma função linear decrescente. Para ambos os fatores de aumento, seus pontos de máximo ocorreram na posição 1, sendo o incremento de aproximadamente 22% na velocidade e de aproximadamente 10% na tensão elétrica. Ainda mostra baixa eficiência para a proporção adotada, mas apresenta melhores resultados em comparação ao difusor de 5° .

A Figura 42 mostra a relação razão tensão para o difusor de $\phi=15^\circ$:

Figura 42 - Razões de velocidades e de tensões para difusor de 15° .

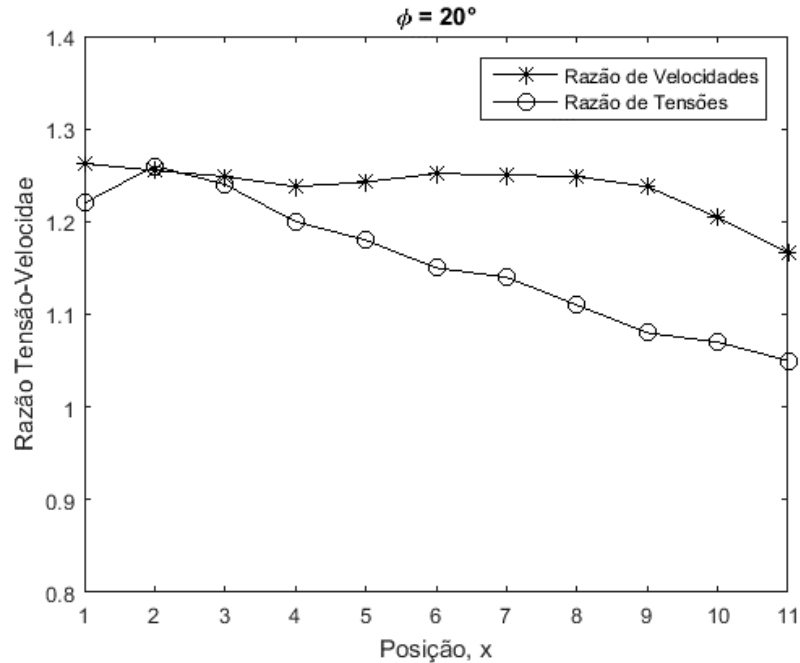


Fonte: Autoria própria.

Para o difusor de $\phi=15^\circ$, as curvas dos fatores de aumento são semelhantes na região mais próxima ao plano de entrada do difusor, mas tendem a se afastar a partir do ponto 3. O ponto de maior ganho tanto para velocidade quanto para tensão elétrica é o ponto 2. Para velocidade, houve um ganho de aproximadamente 22%, enquanto que para a tensão elétrica, o ganho foi de 18%. Similar ao que ocorreu nos difusores anteriores, estes ganhos tornam-se menores à medida que se desloca em direção ao plano de saída do difusor.

A Figura 43 mostra a relação razão tensão para o difusor de $\phi=20^\circ$:

Figura 43 - Razões de velocidades e de tensões para difusor de 20° .

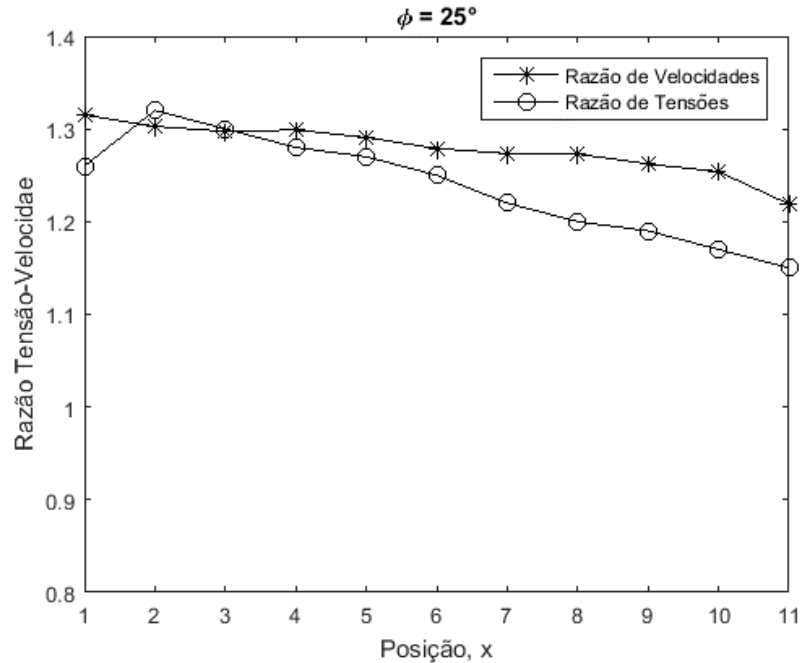


Fonte: Autoria própria

Para o difusor de $\phi=20^\circ$, a distribuição de velocidades foi a que apresentou comportamento menos regular, quando comparado com os demais difusores. O ponto de máxima velocidade ocorreu no ponto 1, enquanto que para o ponto de máxima tensão elétrica ocorreu no ponto 2. A partir do ponto 3, também ocorre um afastamento das curvas de aumento de velocidade e de tensão, cujos valores máximos para seus fatores de aumento foram muito próximos de 26%.

A Figura 44 mostra a relação razão tensão para o difusor de $\phi=25^\circ$:

Figura 44 - Razões de velocidades e de tensões para difusor de 25° .



Fonte: Autoria própria

Para o difusor de $\phi=25^\circ$, os ganhos de velocidade e de tensão elétrica também foram semelhantes, da ordem de aproximadamente 32%. A maior razão de tensões elétricas ocorreu no ponto 2, enquanto que a maior razão de velocidades ocorreu no ponto 1. A partir do ponto 3, ocorre novamente um afastamento entre as curvas de aumento de velocidade e tensões elétricas.

De acordo com os testes propostos, o difusor de $\phi=5^\circ$ foi o que apresentou menor eficiência, enquanto que o difusor de $\phi=25^\circ$ apresenta os maiores ganhos tanto de velocidade quanto de tensão elétrica. Entretanto, não se pode afirmar que difusores com ângulos de abertura superiores a 25° possam garantir aumentos maiores que os obtidos no presente trabalho.

Para os difusores em geral, os aumentos de velocidade são relativamente maiores que os aumentos de tensão elétrica pelo fato de que a presença do microgerador no difusor cria um obstáculo para o escoamento, causando conseqüentemente uma redução na velocidade sobre o conjunto. Ainda assim, é possível perceber relativa similaridade entre os comportamentos tanto das velocidades quanto das tensões.

5 CONCLUSÕES

5.1 Sobre os resultados

Foram construídos cinco (5) difusores cônicos, com diâmetro de entrada e comprimento fixados em 20 cm e 10 cm, respectivamente, mas com ângulos de abertura de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°. Os ensaios foram feitos em um túnel de vento de baixo custo, assim, torna-se necessário realizar os mesmos procedimentos aqui adotados utilizando um túnel de vento profissional, de modo que estes resultados sirvam como parâmetros de referência para validar modelos analíticos e numéricos desenvolvidos pela comunidade científica.

Todos os difusores promoveram aumento tanto de velocidade, 11% a 32%, quanto de tensão, 4% a 32%, e que estes foram proporcionais aos ângulos de abertura dos difusores. Assim, o ângulo de abertura promove uma melhora na eficiência do microgerador até certo valor, tendo esta eficiência reduzida para elevados ângulos de abertura.

Ainda se faz necessário a realização de levantamentos experimentais utilizando diferentes combinações de comprimento e ângulos de abertura em difusores cônicos. O presente trabalho contribui com informações que permitem avaliar e analisar o comportamento de microgeradores por meio do uso de difusores puramente cônicos, já que estes são pouco utilizados em geração eólica.

Como os difusores promovem o aumento da velocidade do vento, estes se tornam indispensáveis para geração de energia em localidades cuja velocidade do vento é baixa, o que à princípio, inviabilizaria a instalação eólica, por conta desta ser tecnicamente inviável. Assim, espera-se que os estudos de DAWT permitam o desenvolvimento de sistemas eólicos mais eficientes.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Utilização de impressoras 3D, para construção de estruturas mais regulares e com geometrias mais eficientes baseadas nos modelos matemáticos existentes;
- Promover os ensaios em um túnel de vento profissional com seção fechada;
- Construção de um posicionador para o tubo de Pitot, objetivando analisar as velocidades ao longo de todo o interior do difusor;

- Utilizar técnicas para a visualização de escoamentos, tal como a injeção de fumaça, para analisar as linhas de corrente ao longo do difusor de modo a avaliar as regiões onde se formam os vórtices;
- Realizar ensaios experimentais com difusores com os ângulos de abertura $\phi=30^\circ$, $\phi=35^\circ$ e $\phi=40^\circ$, mantendo a mesma razão comprimento-diâmetro de entrada;
- Realizar experimentos com difusores cônicos cujas razões entre o comprimento e o diâmetro de entrada (L/d) sejam da ordem 0,2 a 0,4;
- Construir e ensaiar microgeradores com diâmetro de rotor da ordem de 50 cm, com o intuito de estabelecer uma correlação entre o coeficiente de potência da turbina e o fator de aumento de velocidade no difusor;
- Promover ensaios com CFD (Fluidodinâmica Computacional) com difusores $\phi=5^\circ$ a $\phi=40^\circ$ para $L/d=0,5$;
- Utilizar técnicas de visualização de escoamento, como injeção de fumaça e tufo de lã;
- Mapeamento de velocidades nas seções de entrada e de saída na direção radial;
- Propor uma modelagem matemática para $\varepsilon = f(\phi, L, d)$;
- Promover análise dimensional.

REFERÊNCIAS

ABE, K-I., OHYA, Y. **An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92(3-4), 315-330, 2004.

ABE, K. *et al* **Experimental and numerical investigation of flow fields behind a small wind turbine with a flanged diffuser.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics V. 93, pp. 951–970, 2005.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica. Energia eólica.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> acesso em 05 de outubro de 2018.

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.

BRAGANÇA, G. G. F. **O financiamento de energias renováveis alternativas no Brasil.** Fundação Getúlio Vargas, 2017.

CABRAL, C. L. M. FILHO, D. G. F. **Sistema elevatório de água movido a energia eólica para o abastecimento de comunidades ribeirinhas do baixo Tocantins.** Trabalho de conclusão de curso (graduação) – UFPA Campus Universitário de Tucuruí – PA

DUTRA, R. M. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro.** Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2001.

DUTRA, R. M. (Org.). **Energia Eólica: princípios e tecnologia.** Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB, 2008.

EÓLICA: **WIND/SOLAR.** Disponível em: <<http://www.eolica.com.br/>> Acesso em: 05 de Outubro de 2018.

GIPE, Paul. **Wind Works.** Disponível em: <<http://www.wind-works.org/cms/>> Acesso em: Outubro de 2019.

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of wind turbines** / Martin O. L. Hansen. — 2nd ed. 2008.

IGRA, O. **Compact Shrouds for wind turbines**. Energy Conversion. Vol. 16, pp. 149-157, 1977.

IRENA. **International Renewable Agency**. Disponível em: <<http://www.irena.org/>> Acesso em: 29 de setembro de 2018.

KOGAN, A., SEGINER, A. **Final Report on shroud design**. Dept. of Aero.Technion, T.A.E. Rept. No. 32^a, 1963.

KOSASIH, B. TONDELLI, A. **Experimental study of shrouded micro – wind turbine**. School of Mechanical, Materials and Mechatronics Engineering University of Wollongong, Northfields Ave., Wollongong, NSW, Australia. 2012.

MASUKUME, P. M. MAKAKA, G. MUKUMBA, P. **Optimization of the Power Output of a Bare Wind Turbine by the Use of a Plain Conical Diffuser**. Journal Sustainability, 2018.

MENDES, R. C. F. **Estudo do fator de indução axial em turbinas de eixo horizontal**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-230 A/2015, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 62p, 2015.

MOREIRA, L. S. **Proposta e construção e construção de um túnel de vento adaptado para ensaios de microgeradores eólicos**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, Ananindeua - PA, 2018.

OHYA, Y., KARASUDANI, T. **A Shrouded Wind Turbine generating High Output Power with Wind-lens Technology**. 2010.

PURIFICAÇÃO, L. S., FONTE, R. B. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica darrieus para aplicação em edifícios**. UFES. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

PURWANTO, *et al.* **Interior Curved Diffuser for Improved Performance Diffuser-Augmented Wind Turbine (DAWT)**. Proceedings of The Indonesian National Seminar on Renewable Energy. ITS, Surabaya, 2010.

RIO VAZ, D.A.T.D. **Uma Abordagem Matemática Aplicada ao Projeto de Turbinas Hidrocinéticas e Eólicas Com Difusor Utilizando a Teoria de Elemento de Pá**. PRODERNA – Universidade Federal do Pará, 2019.

FIGUEIREDO, S.W.O. **Estudo numérico e experimental de um difusor cônico visando o projeto eficiente de turbinas eólicas de eixo horizontal**. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Universidade Federal do Pará, 2014.

SIAVACH, N. K. *et al.* **An innovative variable shroud for micro Wind turbines**. Renewable Energy 145 1061-1072, 2019.

SILVA, P.A.S.F. *et al.* **A new approach for the design of diffuser-augmented hydro turbines using the blade element momentum**. Energy Conversion and Management 165 801-814, 2018.

SORENSEN, J. N., **General Momentum Theory for Horizontal Axis Wind Turbines**. Research Topics in Wind Energy. Vol 4. Springer. Denmark, 2016.

TANOUE, A. R. **Estudo experimental de um difusor cônico aplicado a um microgerador eólico**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, Ananindeua/PA, 2018.

VAZ, J.R.P. WOOD, D.H. **Aerodynamic optimization of the blades of diffuser-augmented wind turbines**. Energy Conversion Manage; 123:35–45. 2016.

WENZEL, G. M. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Porto Alegre, RS, 2007.

WEF, WOLD ECONOMIC FORUM. **Fostering Effective Energy Transition 2018**. Disponível em: <<http://reports.weforum.org/fostering-effective-energy-transition-2018/foreword/>> Acesso em 29 de setembro de 2018.

APÊNDICE – Tabelas utilizadas para construção dos gráficos

Tabela A1 - Mapeamento das velocidades do jato de ar na saída do túnel de vento.

x (cm)	V(m/s)
5	1,765
7	1,816
9	1,866
11	1,880
13	1,920
15	1,876
17	1,875
19	1,956
21	1,946
23	1,960

Tabela A2 - Tensões elétricas (V) nas posições interiores aos difusores.

Difusor/ Posição	25°	20°	15°	10°	5°
1	0,630	0,610	0,580	0,550	0,520
2	0,660	0,630	0,590	0,540	0,515
3	0,650	0,620	0,585	0,530	0,505
4	0,640	0,600	0,565	0,520	0,500
5	0,635	0,590	0,550	0,510	0,490
6	0,625	0,575	0,535	0,500	0,485
7	0,610	0,570	0,525	0,490	0,475
8	0,600	0,555	0,520	0,480	0,470
9	0,595	0,540	0,505	0,470	0,465
10	0,585	0,535	0,495	0,455	0,460
11	0,575	0,525	0,490	0,445	0,460

Tabela A3 - Razões de tensões elétricas nas posições interiores aos difusores.

Difusor/ Posição	25°	20°	15°	10°	5°
1	1,26	1,22	1,16	1,10	1,04
2	1,32	1,26	1,18	1,08	1,03
3	1,30	1,24	1,17	1,06	1,01
4	1,28	1,20	1,13	1,04	1,00
5	1,27	1,18	1,10	1,02	0,98
6	1,25	1,15	1,07	1,00	0,97
7	1,22	1,14	1,05	0,98	0,95
8	1,20	1,11	1,04	0,96	0,94
9	1,19	1,08	1,01	0,94	0,93
10	1,17	1,07	0,99	0,91	0,92
11	1,15	1,05	0,98	0,89	0,92

Tabela A4 – Velocidades (*m/s*) nas posições interiores aos difusores.

Difusor/ Posição	25°	20°	15°	10°	5°
1	2,433	2,336	2,224	2,251	2,054
2	2,410	2,322	2,258	2,176	1,984
3	2,400	2,310	2,190	2,128	1,910
4	2,403	2,290	2,179	2,078	1,825
5	2,388	2,299	2,183	2,042	1,796
6	2,366	2,316	2,143	1,970	1,780
7	2,356	2,313	2,135	1,931	1,765
8	2,355	2,310	2,091	1,890	1,727
9	2,335	2,290	2,071	1,849	1,700
10	2,320	2,228	2,012	1,803	1,685
11	2,255	2,158	1,967	1,787	1,661

Tabela A5 - Razões de velocidades nas posições interiores aos difusores.

Difusor/ Posição	25°	20°	15°	10°	5°
1	1,32	1,26	1,20	1,22	1,11
2	1,30	1,26	1,22	1,18	1,07
3	1,30	1,23	1,18	1,15	1,03
4	1,30	1,23	1,18	1,12	0,99
5	1,30	1,24	1,18	1,10	0,97
6	1,28	1,25	1,16	1,06	0,96
7	1,27	1,25	1,15	1,04	0,96
8	1,27	1,25	1,13	1,02	0,93
9	1,26	1,24	1,12	1,00	0,92
10	1,25	1,20	1,09	0,97	0,91
11	1,22	1,17	1,06	0,97	0,90