UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

FACULDADE DE ARQUITETURA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

SUZANE MIRITZ

DESIGN DE DIFUSOR AERODINÂMICO PARA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

PORTO ALEGRE

2019

SUZANE MIRITZ

DESIGN DE DIFUSOR AERODINÂMICO PARA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido.

PORTO ALEGRE

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Reitor: RUI VICENTE OPPERMANN
Vice-Reitor: JANE FRAGA TUTIKIAN

ESCOLA DE ENGENHARIA
Diretor: LUIZ CARLOS PINTO DA SILVA FILHO
Vice-Diretora: CARLA SCHWENGBER TEN CATEN

FACULDADE DE ARQUITETURA
Diretora: TÂNIA LUISA KOLTERMANN DA SILVA
Vice-Diretor: FÁBIO GONÇALVES TEIXEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN - PGDESIGN
Coordenador: FÁBIO GONÇALVES TEIXEIRA
Vice-Coordenador: FÁBIO PINTO DA SILVA

MIRITZ; Suzane

Design de difusor aerodinâmico para turbina eólica de eixo vertical de microescala / Suzane Miritz -- Porto Alegre. -- 2019.

149 f.

Orientador: Luís Henrique Alves Cândido.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Design, 2. Difusor Aerodinâmico, 3.Energia Eólica,

4. Turbina eólica de microescala, 5. Turbina eólica de eixo vertical. I. Luís Henrique Alves Cândido. II. Título.

Compilação, incluindo seleção de texto e imagem desta dissertação em todos os direitos de reprodução reservados a **Suzane Miritz**.

Nenhuma parte desta dissertação pode ser compilada ou impressa, gravada e fotocopiada, através de qualquer meio mecânico ou eletrônico, sem a devida autorização, por escrito, do autor e detentor dos direitos de reprodução. Pedidos devem ser enviados para o endereço eletrônico: suzane.miritz@gmail.com

Suzane Miritz

DESIGN DE DIFUSOR AERODINÂMICO PARA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

Esta Dissertação foi analisada e julgada adequada à obtenção do Título de Mestre em Design, sendo aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PgDesign - UFRGS).

Porto Alegre, 12 de julho de 2019.

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido**

PgDesign – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Gustavo Javier Zani Núñez

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Examinador Externo

---

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

PgDesign – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Examinador Interno

---

Profa. Dra. Mariana Pohlmann de Oliveira

PgDesign – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos professores, colegas e amigos do LdSM, em especial ao colega de orientação Fernando Ximenes, pelo apoio, suporte e amizade durante a execução desta pesquisa, que a amizade perdure sempre.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação (Pg-Design), principalmente ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido, pelo tempo e atenção dispensados; à banca, por ter aceito o convite, Prof. Dr. Gustavo Javier Zani Núñez, Prof. Dra. Mariana Pohlmann de Oliveira, e Prof. Dr. Régio Pierre da Silva; e à Capes pelo apoio financeiro durante este período, pois, este trabalho foi realizado com a ajuda da bolsa-auxílio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Aos queridos amigos da Maquetaria e Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura da UFRGS, o seu Osmario pelo suporte, amizade e incontáveis cafezinhos que alegravam os meus dias, e o Roberto pelo suporte, amizade e por todas as vezes que ele ficava de olho nas minhas impressões tridimensionais enquanto eu escrevia.

Agradeço imensamente à minha família, em especial à minha mãe, Edina e ao meu pai, Luiz, pelo amor e apoio incansável, sem os quais este trabalho e esta experiência não teria sido possível. Obrigada por compartilharem cada sentimento comigo. Eu amo vocês!

Ao Álvaro, meu companheiro e cúmplice nessa jornada, obrigada pelo amor, pela parceria, e por me inspirar e incentivar a alçar voos cada vez maiores. Agradeço também, por compartilhar comigo uma família maravilhosa, que vibra e torce por cada conquista minha.

Por fim, agradeço a todos os amigos, professores e colegas que dividiram comigo o seu conhecimento e amizade, obrigada pelos conselhos e orientações que foram recebidos no convívio diário. Não caberiam todos os nomes aqui, mas todos vocês estão guardados no meu coração. Muito obrigada!

RESUMO

MIRITZ, S. **Design de difusor aerodinâmico para turbina eólica de eixo vertical**. 2019. 149 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós Graduação em Design, Porto Alegre, Brasil, 2019.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de difusores aerodinâmicos para uma turbina eólica de eixo vertical de microescala, com o propósito de alcançar um melhor *start* rotacional em baixas velocidades de vento. O estudo tem como foco a manipulação da geometria dos difusores, avaliando como o seu design impacta no comportamento aerodinâmico e na capacidade de o difusor equacionar as zonas de alta e baixa pressão ao longo de sua estrutura, fator determinante para o efeito aerodinâmico de aceleração do escoamento de ar, resultando em um torque de partida com baixas velocidades de vento. Foram realizadas simulações por fluidodinâmica computacional (CFD) e testes no dispositivo em túnel de vento para avaliar o comportamento dinâmico do difusor na turbina de referência. Foram desenvolvidas dezoito geometrias a partir de uma área construtiva utilizada para o design dos difusores. Dentre os dezoito modelos analisados, os que apresentaram melhores resultados, comparados ao modelo de referência, foram as geometrias 6, 8 e 9. Nesse sentido, os resultados apontam que o design de difusores, aplicado a microturbinas, pode auxiliar na utilização desses microgeradores em ambientes de baixo volume de vento.

Palavras-chave: Design. Difusor aerodinâmico. Energia eólica. Turbina eólica de microescala. Turbina eólica de eixo vertical.

ABSTRACT

MIRITZ, S. **Design of aerodynamic diffuser for vertical axis Wind power turbines**. 2019. 149 f. Master Thesis. Federal University of Rio Grande do Sul-UFRGS, School of Engineering, Faculty of Architecture, Graduate Program in Design, Porto Alegre, Brazil, 2019.

The objective of the present study was to develop aerodynamic diffusers for a micro-scale vertical-axis wind turbine to achieve a good *starting torque* at lower wind speeds. The main focus was on the manipulation of the diffuser geometry, analyzing how its design had an impact on the aerodynamic behavior, especially on the capacity of the diffuser to equate the high and low pressure zones along its structure, which is a determining factor for the aerodynamic effect of the airflow acceleration that results in a starting torque at low wind speeds. C*omputational fluid dynamics (CFD) simulations were performed* on *diffusers* as well as experimental tests in the wind tunnel to evaluate the dynamic behavior of the diffuser in the wind turbine. Eighteen geometries were developed from a standardized design area used for the design of diffusers. Of these, geometries 6, 8 and 9 presented better performance compared to those of the reference model. In view of this, the results suggest that the design of the diffusers applied to the micro-turbines may enable their use in *low wind* speed *environment.*

Keywords: Design. Aerodynamic diffuser. Wind power. Micro scale wind turbine. Vertical axis wind turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Top 10 de capacidade eólica acumulada 2018. 23
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira em [GW]. 23
Figura 3 - Evolução da potência e do tamanho dos aerogeradores. 25
Figura 4 - Componentes das turbinas eólicas. 26
Figura 5 - Turbinas do tipo VAWTs. 27
Figura 6 - Tipos de turbina de arrasto. 28
Figura 7 - Representação esquemática dos tipos de difusores mais conhecidos. ...32
Figura 8 - Vista superior do funcionamento aerodinâmico de uma turbina de eixo vertical potencializada por difusor. 33
Figura 9 - Funcionamento aerodinâmico de um difusor flangeado em uma turbina de eixo vertical. 34
Figura 10 - Aplicação de um difusor flangeado em uma turbina de eixo vertical.....35
Figura 11 - Túnel de vento dos irmãos Wright. 38
Figura 12 - Seções típicas de um túnel de vento de circuito aberto tipo aspirador...40
Figura 13 - Área de trabalho do *software* Flow Design. 42
Figura 14 - Classificação da pesquisa. 44
Figura 15 - Diagrama da metodologia projetual. 45
Figura 16 - Relação entre objetivos da pesquisa e métodos de trabalho. 46
Figura 17 - Etapas para alcançar os objetivos da pesquisa. 49
Figura 18 - Difusor de tipo plano com forma Venturi concebido por Watanabe *et al*. (2016). 52
Figura 19 - Difusor de tipo curvo com forma Venturi. 53
Figura 20 - Diagrama do processo de desenvolvimento da pesquisa. 55
Figura 21 - Variáveis selecionadas. 57
Figura 22 - Perfil geométrico do difusor Modelo 1. 58
Figura 23 - Parâmetros de configuração da área de construção da geometria. 60
Figura 24 - Geometrias de difusores desenvolvidas para esta pesquisa. 61
Figura 25 - Tipologia geral das geometrias desenvolvidas. 62
Figura 26 - Modelagem tridimensional de uma geometria de difusor. 63
Figura 27 - Esquema visual da configuração 2D da seção de testes do túnel de vento virtual no *software* Flow Design, vista superior. 64

Figura 28 - Simulação 2D no plano de pressão em torno do difusor Modelo 1. 65
Figura 29 - Gráfico de resultados das simulações nas alternativas geradas.....66
Figura 30 - Geometrias selecionadas.....67
Figura 31 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 2. 68
Figura 32 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 3. 69
Figura 33 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 6. 70
Figura 34 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 8. 71
Figura 35 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 9. 72
Figura 36 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 10. 73
Figura 37 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 12. 74
Figura 38 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 19. 75
Figura 39 - Turbinas eólicas. 78
Figura 40 - Detalhes técnicos adicionais para prototipação dos difusores. 79
Figura 41 - Configurações utilizadas no *software* CLONEGEN 3D. 80
Figura 42 - Impressão tridimensional do rotor de três pás da turbina eólica. 81
Figura 43 - Dispositivo WT. 82
Figura 44 - Dispositivo WT e os suportes dos acessórios para o experimento. 83
Figura 45 - Configuração para ensaio no dispositivo WT. 84
Figura 46 - Configuração para ensaio no túnel de vento. 86
Figura 47 - Anemômetro digital e tacômetro utilizado nos experimentos. 88
Figura 48 - Configuração do dispositivo WT para os ensaios com os difusores.....89
Figura 49 - Turbina e difusor posicionados no dispositivo WT. 90
Figura 50 - Túnel de vento do LdSM-UFRGS.....95
Figura 51 - Configuração da seção de testes do túnel de vento.....96
Figura 52 - Turbina eólica e difusor posicionados na seção de testes do túnel de vento. 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de tamanho de turbinas eólicas. 29
Tabela 2 - Parâmetros e valores das configurações técnicas da turbina com difusor de tipo plano.....52
Tabela 3 - Parâmetros e valores das configurações técnicas da turbina com difusor de tipo curvo.....53
Tabela 4 - Valores de configuração para um difusor de tipo plano com forma Venturi de referência. 59
Tabela 5 - Comparativos de pressão em Pascal (Pa).....76
Tabela 6 - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 1. 76
Tabela 7 - Valores do torque de partida das turbinas no dispositivo WT. 85
Tabela 8 - Valores do torque de partida das turbinas no túnel de vento. 87
Tabela 9 - Valores do *start* rotacional quando o tubo direcionador estava em 0°. 91
Tabela 10 - Valores do *start* rotacional quando o tubo direcionador estava em 5°. ..91
Tabela 11 - Valores do *start* rotacional quando o tubo direcionador estava em -5°. .92
Tabela 12 - Variação percentual do *start* rotacional dos difusores. 92
Tabela 13 - Resultados e variação percentual das RPM nos difusores. 93
Tabela 14 - Valores do *start* rotacional. 98
Tabela 15 - Variação percentual do *start* rotacional dos difusores. 98
Tabela 16 - Resultados e variação percentual das RPM nos difusores. 99

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	C*omputer-aided design*
CFD	*Computational Fluid Dynamics* (fluidodinâmica computacional)
DAWT	*Diffuser Augmented Wind Turbine*
FFF	*Fused filament fabrication* (fabricação por filamento fundido)
GWEC	*Global Wind Energy Council*
HAWT	*Horizontal-axis wind turbine* (turbina eólica de eixo horizontal)
KW	Quilowatt
LES	*Smagorinsky Large Eddy Simulation*
MW	Megawatt
RPM	Rotações por minuto
STL	*Standard Triangle Language*
SWT	*Small Wind Turbines*
VAWT	*Vertical-axis wind turbine* (turbina eólica de eixo vertical)
TWh	Terawatt-hora
Wh	Watt-hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA 15
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA 16
1.3 HIPÓTESE DA PESQUISA 16
1.4 OBJETIVOS 16
1.4.1 Objetivo geral 16
1.4.2 Objetivos específicos 17
1.5 JUSTIFICATIVA 17
1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA 19

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 21
2.1 ENERGIA EÓLICA 21
2.2 TURBINAS EÓLICAS 25
2.2.1 Turbinas eólicas de pequena escala 30
2.2.2 Turbinas eólicas potencializadas por difusor 31
2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) 35
2.4 TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO 37
2.4.1 Túnel de vento 37
2.4.2 Túnel de vento virtual 40

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 43
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA 43
3.2 ETAPAS DA PESQUISA 44

4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA 51
4.1 ESTUDOS DE REFERÊNCIA 51
4.1.1 Aplicação de difusores em aerogeradores de eixo vertical 51
4.1.2 Método de pesquisa 54
4.2 RESTRIÇÕES DE PROJETO 55
4.3 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO 56
4.4 ESCALA DE PROJETO 58

4.5 GEOMETRIA DE REFERÊNCIA 58
4.6 ÁREA CONSTRUTIVA 59
4.7 GEOMETRIZAÇÃO 61
4.8 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL 62
4.9 SIMULAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO VIRTUAL 63
4.10 RESULTADOS E ANÁLISES DAS SIMULAÇÕES 67
4.11 TURBINA EÓLICA DE MICROESCALA 77
4.12 PROTOTIPAGEM 3D 79
4.13 DISPOSITIVO WT 81
4.14 DEFINIÇÃO DO ROTOR 83
4.15 ENSAIOS NO DISPOSITIVO WT 87
4.15.1 Configuração do ensaio no dispositivo WT 88
4.15.2 Resultados no dispositivo WT 90
4.15.3 Discussão dos resultados 93
4.16 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO 94
4.16.1 Configuração do ensaio em túnel de vento 94
4.16.2 Resultados no túnel de vento 97
4.16.3 Discussão dos resultados 99

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 101
5.1 DIFUSORES FINAIS SELECIONADOS 103
5.2 PRODUÇÃO ACADÊMICA E CIENTÍFICA COMPLEMENTAR 103
5.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA 104
5.4 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 104

REFERÊNCIAS 106

APÊNDICE A 113
APÊNDICE B 116
APÊNDICE C 119
APÊNDICE D 137
APÊNDICE E 141
APÊNDICE F 150

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial pelo uso de energia elétrica aumenta a cada dia, isso acontece por consequência do crescimento populacional, da evolução da tecnologia e de outros fatores derivados da globalização (DIAS, 2017). A qualidade de vida de uma sociedade está diretamente ligada ao seu consumo de energia, isso porque a humanidade criou uma crescente necessidade por energia, o que ocasiona uma dependência energética cada vez maior para proporcionar a produção de bens de serviços e o bem-estar doméstico e social (GOLDEMBERG, 2010). Diante desse cenário, foi de extrema necessidade encontrar alternativas para a produção de energia, uma vez que a base da matriz energética mundial se dá, sobretudo, na utilização de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão, nuclear e gás. Essas fontes se tornaram fundamentais para suprir a progressiva demanda energética mundial, mas se mostraram insustentáveis pelo ponto de vista econômico, uma vez que são recursos finitos, e, do ponto de vista ambiental, devido aos impactos que ocasionam (SACHS, 2007).

Nesse âmbito, há algum tempo, a tendência mundial pela adoção da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem sido bastante evidente, tanto por questões econômicas quanto por questões políticas e ambientais (NASCIMENTO e SILVA, 2016; DIAS, 2017). A importância sobre o investimento em fontes alternativas é cada vez mais discutida, a sua relevância se dá pelo fato de fornecerem energia de forma limpa, sem emissões de poluentes para a atmosfera. Isso ocorre através de recursos naturais sistematicamente repostos pela própria natureza, ou seja, que não se extinguem (LIMA, 2016). São consideradas como fontes de energia renovável: a biomassa, energia que é obtida pela transformação de produtos de origem animal e vegetal; o sol, que fornece energia solar; o vento, que proporciona energia eólica; a água, que gera energia hídrica obtida através das ondas e das marés; e a geotérmica, energia que é captada a partir do calor que provém do interior da terra (SILVA, 2012).

Por meio do desenvolvimento tecnológico é que se tornou possível aproveitar essas energias, tanto como combustíveis alternativos como na produção de calor e de eletricidade. O Brasil possui um grande diferencial em relação a outros países em termos de fontes alternativas, e isso se dá pelo fato de o país possuir uma ampla biodiversidade, que proporciona a geração de energia por meios distintos (PACHECO,

2006). Nesse cenário, o vento, por ser uma fonte de energia limpa, inesgotável, com baixíssimo impacto de implantação, além de não emitir CO2 em sua operação (ABEEólica, 2017), é considerado como a mais avançada das “novas” tecnologias de energia renovável (IEA, 2013).

O Brasil possui alguns dos melhores ventos do mundo, sua qualidade, assim como o seu fator de capacidade, coloca o país em posição de destaque no cenário mundial de geração de energia eólica (ABEEólica, 2019). O fator de capacidade médio do Brasil em 2018 foi de 42%, enquanto o fator de capacidade médio mundial está em 25% (ABEEólica, 2019). No *Global Wind Statistic 2017*, documento anual em que estão expostos os dados mundiais de energia, elaborado pelo *Global Wind Energy Council* (GWEC), está relatado que o Brasil ocupa o oitavo lugar no *ranking* mundial referente à capacidade instalada de produção de energia eólica; em 2012 o Brasil ocupava a décima quinta posição (NASCIMENTO e SILVA, 2016; ABEEólica, 2019).

Além dos projetos de grande escala para a geração de energia por meio dos ventos, a microgeração de energia vem se tornando uma realidade no Brasil, e isso foi motivado por vários fatores, tais como o baixo impacto ambiental, a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga e a diversificação da matriz energética (ANEL, 2016). Esse segmento, todavia, ainda se encontra em estado de aperfeiçoamento, em que os desafios implicam o desenvolvimento de sistemas que possam produzir uma maior potência aerodinâmica, mesmo em áreas onde a velocidade do vento é baixa e suscetível a turbulências (KANNAN *et al*., 2013). Segundo Kishore *et al*., (2014), em ventos de baixa velocidade, o número de Reynolds[1] é drasticamente reduzido, impactando nas propriedades aerodinâmicas das pás, principalmente na razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto, reduzindo, dessa forma, o desempenho de uma turbina eólica de pequena escala.

Um dos campos mais promissores ao se tratar de microgeração no campo de energia eólica é o desenvolvimento de sistemas que produzam maior potência, e isso se dá com o uso de um difusor (CHEN *et al*., 2011). O difusor aumenta a potência de uma turbina eólica, acelerando a velocidade do vento que se aproxima da turbina (KANNAN *et al*., 2013). A geração de energia em turbinas eólicas é diretamente

[1] O Número de Reynolds é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos, ele relaciona as forças de inércia com as forças viscosas. Quando as forças de inércia são muito maiores do que as forças viscosas, o escoamento passa a ser turbulento (número de Reynolds alto).

proporcional ao vento disponível onde ela está exposta, portanto, se for possível aumentar a velocidade do vento explorando a natureza dinâmica do fluido em torno de uma estrutura, a sua potência de saída poderá ser aumentada substancialmente (KANNAN *et al*., 2013).

Nesse sentido, o design vem ao encontro da complexidade projetual deste tema. O design é uma ideia, um projeto ou um plano para a solução de um problema, e, por meio dele, considerando a sua multidisciplinaridade, é possível apresentar esta ideia com o auxílio de ferramentas que são utilizadas para expor visualmente a solução do problema em questão (LÖBACH, 2001). O Design e a Tecnologia são considerados direcionadores estratégicos na estruturação de um caminho inovador e sustentável (XIMENES, 2018), e, por esse motivo, são fatores fundamentais na elaboração de soluções projetuais.

Sendo assim, diante do exposto anteriormente, o presente estudo busca estabelecer um difusor aerodinâmico para uma turbina eólica de microescala. Um dos objetivos é melhorar a eficiência aerodinâmica – menor torque de partida e mais rotações por minuto (RPM) – das turbinas eólicas de eixo vertical de microescala, principalmente daquelas que operam em áreas onde a velocidade do vento é baixa e suscetível a turbulências. O estudo concentrar-se-á na geometria dos difusores, analisando como seu design impacta no comportamento aerodinâmico dos difusores. Busca-se, também, disponibilizar essas informações técnico-científicas no sentido de auxiliar a área de design no projeto de turbinas eólicas de eixo vertical de microescala, uma vez que os estudos realizados nessa área ainda são muito escassos.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A proposta deste trabalho é desenvolver um difusor aerodinâmico para uma turbina eólica de eixo vertical, de microescala, visando atingir uma melhor eficiência e desempenho aerodiâmico em seu *start inicial,* ou seja, menor torque de partida, que é definido como o momento de atrito que necessita ser superado para que a turbina eólica inicie a girar.

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados como principal referência os estudos efetuados por Watanabe *et al.* (2016) sobre a aplicação de difusor em turbinas eólicas de eixo vertical, denominados *Application of a Diffuser Structure to Vertical-Axis Wind Turbines*.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

É por meio das turbinas eólicas que é realizada a captação da energia dos ventos, e, por intermédio do uso de difusores aerodinâmicos, é possível melhorar a produção de energia através do aumento da velocidade de escoamento de ar em uma turbina e, por consequência, o aumento da potência produzida. A aerodinâmica é uma área importante no design de turbinas eólicas, uma vez que a busca por novas formas que aumentam a eficiência das turbinas é um desafio assíduo na inovação desses produtos. Nesse contexto, o problema de pesquisa desta dissertação pode ser apresentado pelo seguinte enunciado:

Como o projeto geométrico de um difusor pode aprimorar a eficiência aerodinâmica de uma turbina eólica de eixo vertical de microescala, visando melhorar o desempenho da turbina em seu torque de partida?

1.3 HIPÓTESE DA PESQUISA

Desenvolvimento e aprimoramento de difusores aerodinâmicos, visando ao estudo de sua geometria, visto que ela pode influenciar para que seja necessário o menor escoamento de ar para que a turbina tenha seu torque de partida. Sugere-se que esta redução dar-se-á devido a uma maior captação e aceleração do vento, aumentando o escoamento de entrada e saída de ar.

1.4 OBJETIVOS

Nesta seção, estará exposto o objetivo geral desta pesquisa, assim como serão citados os seus objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral estabelecer uma geometria de difusor aerodinâmico para aplicação em turbinas eólicas de eixo vertical de microescala.

1.4.2 Objetivos específicos

a) Levantar critérios projetuais;
b) Analisar comportamento aerodinâmico;
c) Construir modelos físicos para ensaios experimentais;
d) Analisar e validar os resultados obtidos.

1.5 JUSTIFICATIVA

Devido ao esgotamento de combustíveis fósseis e às preocupações ambientais sobre o aquecimento global, o desenvolvimento e a aplicação de energias limpas e renováveis tornaram-se uma questão importante nos últimos anos. Com o intuito de abordar a atual crise energética, vários meios alternativos de energia estão sendo avaliados (ACKERMANN; SÖDER, 2002).

A energia eólica, entre todas as fontes de energia renováveis, é cada vez mais dominante e competitiva com relação às fontes convencionais de energia. Devido aos avanços tecnológicos, a energia eólica constituiu-se em uma das fontes de energia que mais cresce no mundo e simboliza uma alternativa viável, uma vez que o recurso é infinito (FRANKOVOC; VRSALOVIC, 2001).

Por décadas, a indústria de energia eólica concentrou-se na geração de energia a partir de grandes turbinas eólicas localizadas em locais expostos onde as velocidades médias do vento eram constantes. No entanto, nos últimos anos um número crescente de fabricantes passou a investir na produção de pequenas turbinas eólicas, pois percebeu que a adaptabilidade de pequenos sistemas de turbinas eólicas permite sua instalação em possíveis locais residenciais, urbanos, fora da rede ou remotos, enquanto grandes sistemas de turbinas eólicas são utilizados quase inteiramente em parques eólicos (SMALL SCALE WIND ENERGY, 2008).

A utilização de turbinas eólicas de pequena escala constitui uma interessante alternativa como fonte de energia limpa e renovável, produzindo energia de forma descentralizada e de baixo custo. Por apresentarem características únicas por serem especificadamente adaptadas ao seu ambiente, podem lidar com rajadas de vento e turbulências que são vivenciadas em um ambiente urbano, além de possuírem baixa emissão de ruído e uma integração visual e estética com o meio em que se encontra (WONG, 2016).

As turbinas eólicas de pequena escala possuem um desempenho aerodinâmico e condições operacionais distintas das turbinas eólicas de grande escala. Esses fatores viabilizam o desenvolvimento de conhecimento e soluções projetuais em energia eólica voltada para a pequena e microescala.

Segundo Kannan *et al*. (2013), um dos conceitos considerados mais promissores no campo de energia eólica é o desenvolvimento de sistemas de aumento de energia. Isso é possível pelo uso de um difusor na turbina, um sistema de aumento de energia conhecido como *Diffuser Augmented Wind Turbine – DAWT*. Vários estilos de difusores foram aplicados em turbinas eólicas de eixos horizontais (OHYA; KARASUDANI, 2010), e tecnologia similar deve ser também efetiva para turbinas eólicas de eixo vertical.

Na literatura é possível encontrar alguns estudos sobre design de difusores para aerogeradores de eixo vertical, Takahashi *et al.* (2006) estudaram o desempenho de uma turbina eólica de eixo vertical Darrieus com um difusor flangeado. No estudo, os autores compararam o desempenho do rotor nu, sem difusor acoplado, com dois diferentes difusores flangeados. Roa *et al.* (2010) realizaram uma investigação numérica e experimental para uma turbina de água de fluxo cruzado com e sem difusor. Eles utilizaram um rotor Darrieus para aplicação em marés com dois distintos perfis de aerofólio para o difusor. Além desses estudos, Watanabe *et al.* (2016) averiguaram os efeitos do uso de um difusor em um aerogerador de eixo vertical. O propósito foi encontrar os melhores parâmetros de configuração em relação ao aumento de potência das turbinas. Os autores testaram três modelos de difusores distintos, e ambos demonstraram um aumento de potência.

Kosasih e Tondelli (2012) acreditam que a capacidade do difusor de reduzir a pressão de saída é o motivo para um maior escoamento de ar passante pela turbina, e a intensidade desse efeito depende da geometria do difusor. Esse efeito tem relação direta na aceleração do escoamento de ar, uma vez que o aumento de aceleração impacta totalmente, no momento do torque de partida da turbina, a menor velocidade de vento necessária para a turbina começar a rotacionar. Essa característica não tem sido abordada nos estudos de difusores para aerogeradores de eixo vertical consultados para esta pesquisa. No âmbito da aplicação de difusores para aerogeradores de eixo horizontal, foi possível encontrar os estudos realizados por Ximenes (2018), membro do grupo de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em

Design da UFRGS. Com base nessas informações, é possível justificar que a pesquisa de novas geometrias aplicadas a difusores dessa natureza poderá trazer novos conhecimentos e avanços para esse tipo de tecnologia.

A inovação tecnológica é a grande ferramenta para o crescimento econômico, para os ganhos de eficiência e de competitividade no mundo. A produção acadêmica em Design traz um campo de produção de conhecimento científico, tecnológico, industrial e social que colabora para o fortalecimento do potencial inovador do Brasil. O aumento do número de patentes válidas é um desses fortalecimentos, pois é considerado um importante indicador para mensurar a tríade estratégica que une ensino, pesquisa e extenção.

Nesse sentido, como contribuição e justificativa, busca-se, por meio deste trabalho, continuar colaborando com a pesquisa com o viés voltado à geração de energia eólica que vem sendo desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Design pelo Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS (LdSM), como os trabalhos desenvolvidos por Oliveira (2017) e Ximenes (2018). A contribuição para a realização desta pesquisa é o conhecimento, por meio da atuação e integração projetual com saberes e áreas distintas, como design e engenharia. A aproximação entre essas áreas contribui para o melhor desempenho da pesquisa e do projeto, uma vez que traz novas perspectivas que otimizam o processo, com potencial para a geração da inovação.

1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA

Nesta seção será apresentada a estrutura desta dissertação, que foi organizada em cinco capítulos, que serão apresentados de maneira resumida a seguir.

No primeiro capítulo, foi apresentada a introdução, a delimitação do tema, a hipótese da pesquisa, os objetivos, o geral e os específicos, a justificativa e a estrutura da pesquisa.

No capítulo dois, encontra-se a fundamentação teórica, em que se teoriza sobre a energia eólica e seus aspectos técnicos, turbinas eólicas, seus tipos e classificações, turbinas eólicas de pequena escala, turbinas eólicas potencializadas pelo o uso de um difusor, fluidodinâmica computacional (CFD) e sobre tecnologias e ferramentas de simulação, com ênfase para túnel de vento virtual e físico.

No capítulo três, está exposto o desenho metodológico deste estudo; nele, está descrita a metodologia empregada, especificando a caracterização e as etapas da pesquisa.

No capítulo quatro, dá-se o desenvolvimento da pesquisa, que está dividida em três momentos. O primeiro momento é composto pelos estudos de referência para a pesquisa e todos conhecimentos científicos e técnicos pertinentes para o projeto dos difusores. No segundo momento, são geradas as geometrias dos difusores e as simulações no túnel de vento virtual. No terceiro momento, acontecem os ensaios no dispositivo WT e túnel de vento.

No quinto capítulo, apresentam-se as considerações finais sobre os resultados da pesquisa, contribuições e recomendações para futuras pesquisas.

Por fim, são expostas as bibliográfias utilizadas para a realização desta pesquisa e também os apêndices elaborados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a base teórica para a fundamentação desta pesquisa. É efetuada a busca de dados, informações, teorias e conhecimento científico sobre os assuntos pertinentes ao trabalho. Por meio da fundamentação teórica, buscou-se interpretar e compreender os conhecimentos necessários para embasar o estudo que foi realizado.

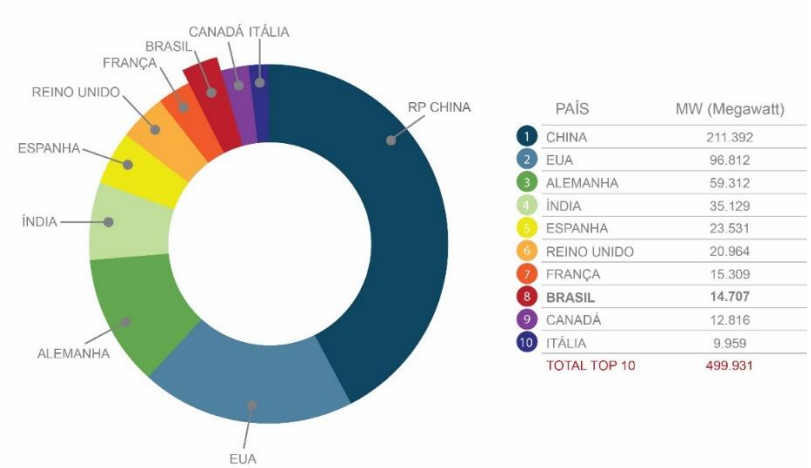
2.1 ENERGIA EÓLICA

Um dos temas de maior importância na atualidade é a questão energética (BIANCHI, 2019). A procura por novas fontes de energia, assim como os impactos causados pelas formas tradicionais de geração elétrica, tem instigado a procura por fontes alternativas de energia (FERREIRA, 2008). Nesse contexto, a energia eólica surge como uma das mais promissoras fontes de energia, isso porque, em termos percentuais, ela é a grande responsável pela difusão na geração de energia por fontes renováveis no mundo (NETO; LIMA, 2016). Essa energia é proveniente da radiação solar, uma vez que o vento é o ar em movimento provocado pelo aquecimento desigual da terra (CUSTÓDIO, 2013). A origem do vento está diretamente relacionada com as diferenças de temperatura em distintas regiões do globo. As regiões próximas ao equador são mais aquecidas pelo sol do que todas as demais zonas do planeta. O ar quente, sendo mais leve (menos denso) do que o ar frio, sobe por meio da atmosfera até a uma altitude de aproximadamente 10km, espalhando-se em seguida para os polos Norte e Sul. O deslocamento do ar a partir de regiões próximas ao equador (ar mais quente) cria zona de baixa pressão, por consequência disso, essas regiões são preenchidas por ar mais frio, originário dos polos em que existem regiões de altas pressões, devido ao arrefecimento do ar. E é essa movimentação de massa de ar que dá origem ao vento (CARNEIRO, 2013). A energia eólica é denominada como a energia cinética do ar em movimento, e o vento, seu aproveitamento, acontece por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação (ANNEL, 2013); essa extração da energia cinética do vento é efetuada por máquinas desenhadas para esse fim, intituladas de turbinas eólicas (CUSTÓDIO, 2013).

Foi instalada em 1976, na Dinamarca, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública (ANNEL, 2013). Todavia, a utilização da energia proveniente dos ventos possui aplicações milenares (AZEVEDO *et al*., 2017), os moinhos de vento utilizados para a moagem de grãos e bombeamento de água em atividades agrícolas foram as primeiras aplicações dessa energia, isso em 1700 a.C. (GASCH; TWELE, 2002). O desenvolvimento da navegação, assim como o período das grandes descobertas de novos continentes, se deu, em grande parte, pelo aproveitamento da energia dos ventos (MARTINS *et al*., 2008), que foi vista como uma das primeiras formas energéticas de tração não animal (AZEVEDO *et al*., 2017). Na última década, essa fonte energética tem atraído boa parte dos investimentos em energias renováveis, sendo uma das fontes que mais cresce no mundo (GRENPAECE, 2013).

Quanto às informações disponíveis, sobre a capacidade instalada de geração eólica no mundo, entre 2000 e 2016, a taxa média de crescimento foi de 23,8% ao ano, sendo que o acréscimo de 50,2 GW de potência eólica, em 2016, respondeu por 23% da expansão mundial de todas as fontes renováveis (MME, 2017). Em 2016, a participação da geração eólica na produção total mundial já atingia 3,9%. Considerando os 20 maiores geradores de energia eólica em termos mundiais, a Dinamarca é quem contém a maior proporção de geração proveniente da força mecânica dos ventos em relação à sua geração total (42,5%), seguida de Portugal (22,1%), e Espanha (18%) (MME, 2017). No Brasil, foram gerados 48,4 TWh (Terawatt-hora, que equivale a 10^{12} Wh (Watt-hora) ou $3{,}6\times10^{15}$ joules) de energia eólica ao longo do ano em 2018, representando um crescimento de 14,6% em relação a 2017, uma vez que essa geração de 2018 representou 8,6% de toda geração injetada no Sistema Interligado Nacional no ano (ABEEólica, 2019). O Brasil, no ano de 2017, ultrapassou o Canadá no *Ranking* Mundial de capacidade instalada, elaborado pelo *GWEC – Global Wind Energy Council*, e em 2018 se manteve na 8ª posição, como é possível observar na Figura 1, sendo que, em 2012, estava na 15ª colocação (ABEEólica, 2018).

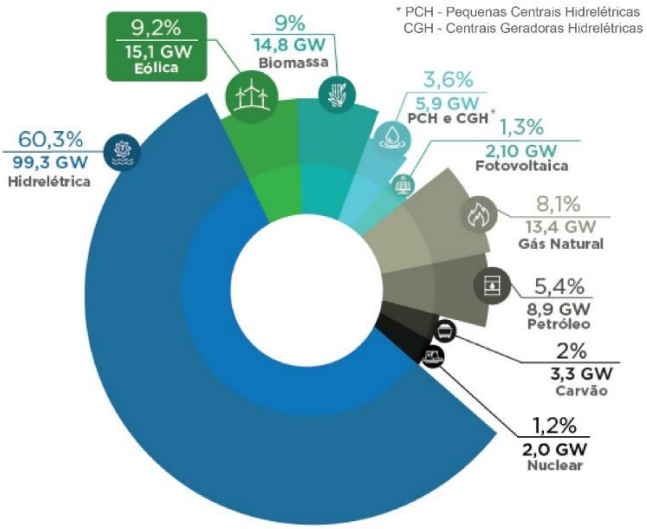
Figura 1 - Top 10 de capacidade eólica acumulada 2018.



Fonte: Adaptado de ABEEólica, 2018.

Da Matriz Elétrica Brasileira, 9,2% dela são referentes à geração de energia eólica (Figura 2). Com esse percentual, é possível abastecer 22 milhões de residências/mês, cerca de 67 milhões de habitantes, ou seja, o suficiente para fornecer energia elétrica residencial a uma população maior que a de todo o Nordeste Brasileiro (ABEEólica, 2019).

Figura 2 - Matriz elétrica brasileira em [GW].



Fonte: ABEEólica, 2019.

As turbinas eólicas, a partir de desenvolvimentos tecnológicos recentes, tais como sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação, têm melhorado o seu desempenho e confiabilidade dos equipamentos, além de reduzir os seus custos (ANNEL, 2013). O uso da energia proveniente dos ventos representa uma alternativa significante na geração de energia

elétrica, principalmente quando se trata de mudanças climáticas. Seu uso reduz o risco gerado pela sazonalidade hidrológica bem como contribui na redução na emissão de gases de efeito estufa. Contribui ainda para a redução da emissão, pelas usinas térmicas, de poluentes atmosféricos, diminuindo a necessidade da construção de grandes reservatórios (BARBOSA FILHO; AZEVEDO, 2013).

Ainda que a energia eólica evidencie um potencial elétrico ainda muito promissor, estudos atuais (BARBOSA FILHO; AZEVEDO, 2013; ANEEL, 2013; GOMES; HENKES, 2015; AZEVEDO *et al*., 2017) apontam impactos negativos que a instalação de grandes parques eólicos pode causar. Os impactos ambientais gerados estão atrelados principalmente ao impacto visual e ao impacto sobre a fauna e flora.

Barbosa Filho e Azevedo (2013) avaliaram os impactos ambientais nos meios biótico, físico e socioeconômico. Impactos sobre o meio biótico: impactos na fauna e na flora local, tanto na fase de construção quanto na permanência do empreendimento ou sua exploração; danos sobre as aves, como colisões com aerogeradores, alteração do sucesso reprodutor e perturbação na migração. Impactos sobre o meio físico: degradação da área afetada devido ao processo de desmatamento, topografia e terraplenagem; introdução de material sedimentar para impermeabilização e compactação do solo; alteração do nível hidrostático do lençol freático; esse conjunto de impactos poderá inferir no controle da erosão, dinâmica hidrostática e disponibilidade de água doce, supressão de habitats e alterações da paisagem vinculadas aos aspectos cênicos e de lazer. Impactos sobre meio socioeconômico: emissão de ruídos, ruído mecânico de engrenagens e geradores, ruído aerodinâmico das pás e ruído de baixa frequência, que é a energia sonora na região abaixo de 200 Hz; impacto visual ocasionado pela altura e diâmetro das turbinas eólicas; corona visual ou ofuscamento; interferências eletromagnéticas, efeito estroboscópio e interferências locais.

Considerando as questões expostas anteriormente, abre-se uma lacuna para a exploração de conceitos alternativos em energia eólica, como a microgeração. As microturbinas eólicas retratam um setor crescente no mercado de energia renovável para diferentes aplicações práticas, pois são facilmente transportáveis, instaláveis, de fácil manutenção, além de que podem ter uma distribuição geográfica extremamente ampla, isso porque não requerem condições climáticas especiais para funcionar de forma eficaz (SIRIGU *et al*., 2016). Assim, diante desses argumentos, as turbinas

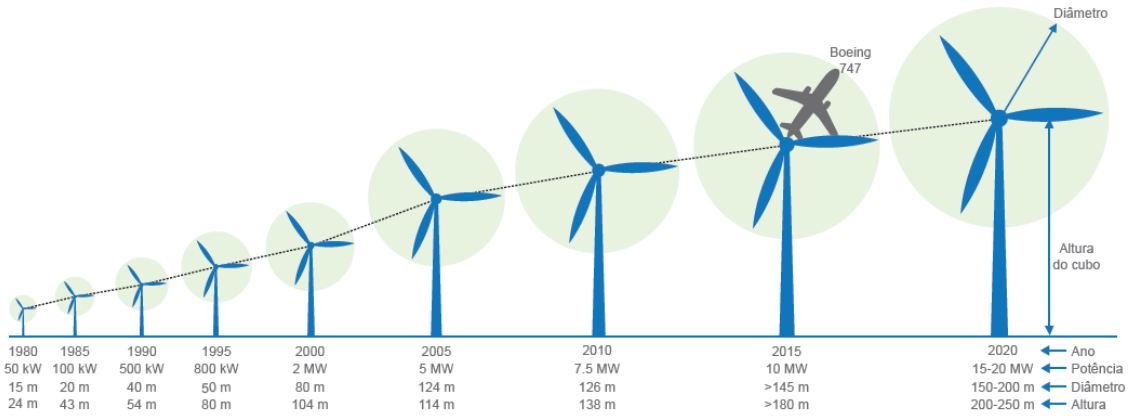
eólicas de pequena escala (micro e miniturbinas eólicas) surgem como uma oportunidade para o desenvolvimento de soluções inovadoras em produção de energia descentralizadas, uma vez que não se enquadram na maior parte dos impactos ambientais citados anteriormente.

2.2 TURBINAS EÓLICAS

A extração da energia cinética do vento acontece por máquinas desenhadas para esse fim (CUSTÓDIO, 2013), denominadas de *turbinas eólicas* ou *aerogeradores*. Essas máquinas têm como função a transformação da energia cinética de translação (vento) em potência mecânica de eixo (torque x rotação), que posteriormente é convertida em energia elétrica (AKHGARI, 2011). A transformação energética se dá com o escoamento do vento por meio das pás do rotor, que, por sua vez, faz funcionar o conjunto de engrenagens de redução e eixos acionadores do gerador elétrico (BNDES, 2013).

A potência e o tamanho dos aerogeradores têm aumentado significativamente com o passar dos anos, isso porque o tamanho das turbinas eólicas é limitado pela evolução tecnológica da sua fabricação e pela disponibilidade de infraestrutura para a sua montagem e o seu transporte (CUSTÓDIO, 2013). Na Figura 3 é possível observar a evolução da potência e do tamanho dos aerogeradores comerciais, sendo possível verificar que a potência das turbinas aumentou de 50 kW em 1980 para 7,5 MW em 2010, assim como o diâmetro do rotor, que aumentou de 15m em 1980 para 126m em 2010.

Figura 3 - Evolução da potência e do tamanho dos aerogeradores.



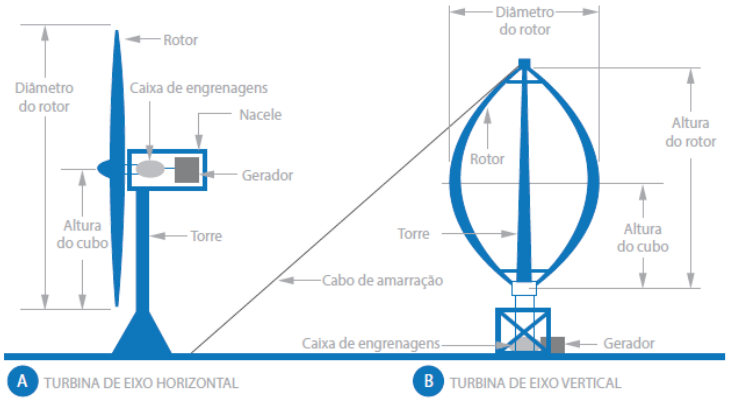
Fonte: Adaptado de Wong (2016).

Esse progresso das turbinas eólicas passou por uma série de desafios em termos de tecnologia, que podem ser agrupados em quatro áreas: design, instalação, integração de novas tecnologias e aumento de tamanho. Essas quatro áreas podem ser descritas como uma cadeia contínua de melhorias incrementais com base na experiência e na pesquisa, por esse motivo, tanto a tecnologia quanto o design dos aerogeradores estão em constante evolução. Os avanços obtidos com o constante aprimoramento das máquinas permitiram o desenvolvimento de materiais mais leves, novas formas construtivas e aprendizagem tecnológica, contribuindo para turbinas com melhor desempenho, mais potência instalada, menores emissões de ruídos e competitividade de custo relativo (SAHIN, 2004).

As turbinas eólicas podem ser classificadas da seguinte maneira: (i) com base na orientação do eixo de rotação (vertical ou horizontal), (ii) com base no componente de forças aerodinâmicas (sustentação ou arrasto) que impulsiona a turbina eólica, e (iii) com base na capacidade de geração de energia (micro, pequena, média ou grande) (KISHORE *et al.*, 2014).

Referente à orientação do eixo de rotação, há as turbinas eólicas de eixo vertical (VAWTs), cujo rotor gira perpendicularmente ao solo, e turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWTs), em que o rotor gira paralelo ao solo (KISHORE *et al*., 2014). Na Figura 4 é possível observar como são compostas as turbinas eólicas de eixo horizontal e as turbinas eólicas de eixo vertical. As turbinas eólicas de eixo horizontal são constituídas basicamente por rotor, nacele, cubo, torre e gerador, e as turbinas eólicas de eixo vertical, por rotor, cubo superior, cubo inferior, cabo de amarração, torre, gerador e caixa de engrenagens.

Figura 4 - Componentes das turbinas eólicas.



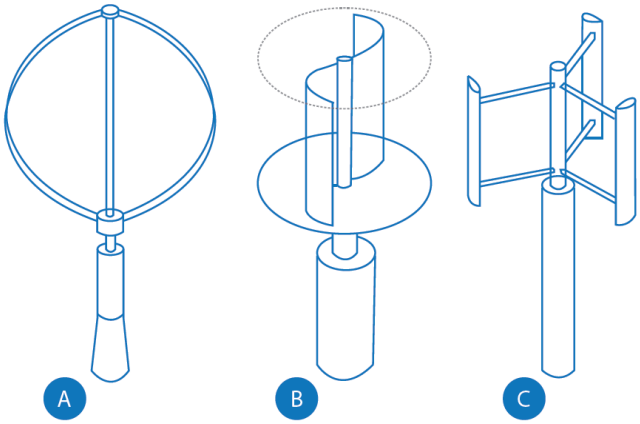
(A) Turbina de eixo horizontal (B) Turbina de eixo vertical.

Fonte: Adaptado de Ferreira (2008).

As turbinas de eixo horizontal são as mais difundidas no mercado, possuem como característica principal a precisão de um sistema de controle para posicionar o rotor na direção em que o vento predomina. Comparadas às VAWTs, elas extraem com maior eficiência a energia do vento (VERDUM, 2013). Rotores de uma turbina de eixo horizontal são classificados conforme sua orientação em relação ao vento (*downwind* ou *upwind*), número de pás, sistema de controle (*pitch* ou *stall*) e a forma com que se alinham à direção do vento (*yaw* ativo ou passivo) (CUSTÓDIO, 2013).

As turbinas de eixo vertical podem ser utilizadas em locais em que a direção do vento é altamente variável. Outro fator interessante desse tipo de turbina é o fato de que os geradores e as caixas de engrenagem podem ser colocados próximos ao solo, resultando em uma menor carga na torre, além de facilitar a manutenção (AKHGARI, 2011). Quanto ao seu design, as turbinas de eixo vertical possuem inúmeros projetos distintos, suas formas clássicas são do tipo Savonius, Darrieus e Giromill, também conhecida como H-Darrieus (PAULO, 2013), conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Turbinas do tipo VAWTs.

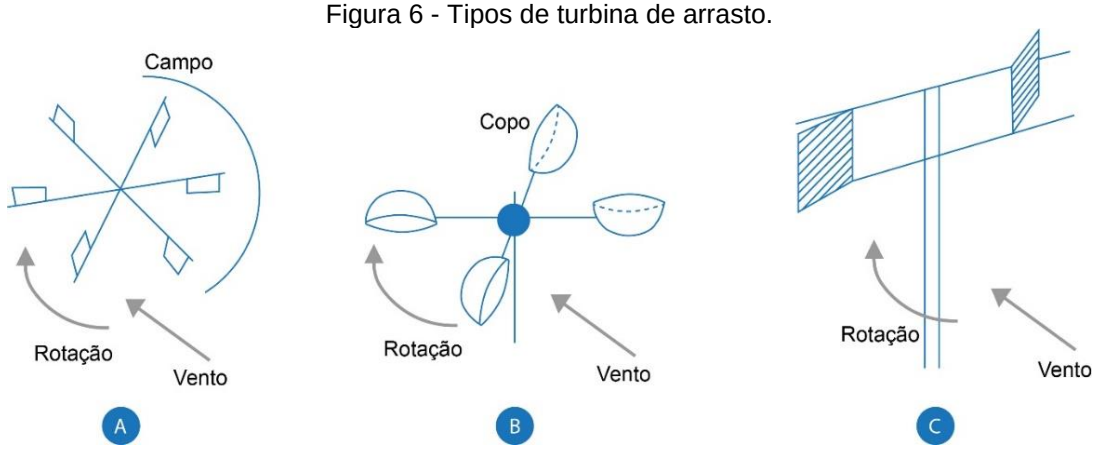


(A) Savonius, (B) Darrieus e (C) Giromill/H-Darrieus.

Fonte: Adaptado de Gasch e Twele (2002).

Quanto aos componentes de forças aerodinâmicas que impulsionam a turbina, são dois: arrasto (na direção do vento) e sustenção (perpendicular à direção do vento). As turbinas de arrasto são aquelas em que o vento empurra as pás, fazendo com que o rotor gire. Três exemplos de turbinas que utilizam essa força são a plana, tipo cálice e panemone (MARQUES, 2004; GASCH; TWELE, 2002; CUSTÓDIO, 2013), representados na Figura 6.

Figura 6 - Tipos de turbina de arrasto.



(A) Turbina plana, (B) Turbina tipo cálice e (C) Turbina panemone.

Fonte: Adaptado de Custódio (2013).

Nesse tipo de turbina, a velocidade das pás não pode ser maior que a velocidade do vento, o que acaba limitando a sua eficiência (CUSTÓDIO, 2013). Turbinas movidas pela força de arrasto possuem baixa velocidade de rotação e alto torque, por esse motivo, são utilizadas para moer grãos e bombear água (JASEN e SMULDERS, 1977; MARQUES, 2004; GASCH; TWELE, 2002).

As turbinas de sustentação utilizam aerofólios como pás, similares às asas dos aviões, cuja força resultante da interação do vento com o rotor não possui apenas a componente de arrasto na mesma direção da velocidade relativa, mas também um componente perpendicular à velocidade relativa, chamado de força de sustentação (MARQUES, 2004; GASCH; TWELE, 2002; CUSTÓDIO, 2013). Turbinas que utilizam a força de sustentação possuem alta velocidade e baixo torque, o que as torna adequadas para a geração de eletricidade (JASEN; SMULDERS, 1977; MARQUES, 2004; GASCH; TWELE, 2002).

No que se refere à capacidade de geração de energia, existem inúmeros tipos de turbinas eólicas no mercado com design e dimensões distintas e sua classificação se dá segundo a sua forma construtiva e mais especificadamente a potência que produz e o diâmetro do rotor (CORREIA, 2014). O tamanho de um aerogerador depende acima de tudo da potência que se deseja atingir. Dessa forma, uma das características mais relevantes para ser considerada nas turbinas eólicas é o diâmetro do rotor, ou, mais especificadamente, a área varrida por ele (XIMENES, 2018). Para Gipe (2016), não existe um padrão sobre o que constitui uma pequena ou grande turbina, pois as classes de tamanho usadas na energia eólica são um tanto quanto arbitrárias. Sendo assim, o autor propõe a classificação de tamanho de aerogeradores

em seis grupos, como detalhado na Tabela 1; essa classificação se aplica a turbinas de eixo horizontal e vertical.

Tabela 1 - Classes de tamanho de turbinas eólicas.

CLASSES DE TURBINA EÓLICA			
CLASSIFICAÇÃO	DIÂMETRO DO ROTOR	ÁREA NOMINAL VARRIDA	CLASSIFICAÇÃO DE POTÊNCIA PADRÃO
	m	m²	kW
Micro	0,5 - 1,25	0,2 - 1	0,4 - 0,25
Mini	1,25 - 3	1 - 7	0,25 - 1,4
Doméstica	3 - 10	7 - 80	1,4 - 16
Pequeno Porte	10 - 20	80 - 300	10 - 100
Médio Porte	20 - 50	300 - 2.000	100 - 1.000
Grande Porte	50 - 100	2.000 - 8.000	1.000 - 3.000
Super Grande Porte	100 - 150	8.000 - 18.000	2.000 - 10.000

Fonte: Adaptado de Gipe (2016).

Para Kishore *et al.* (2014), a tecnologia e o design das turbinas eólicas estão bastante difundidos e estão sendo cada vez mais aprimorados (turbinas de médio e grande porte). No entanto, estabelece-se uma lacuna ao se tratar de turbinas eólicas de pequena escala, como as mini e microturbinas, uma vez que elas apresentam um desempenho aerodinâmico e condições operacionais distintas das demais. Com isso, é possível perceber a importância da pesquisa sobre turbinas eólicas de pequena escala para que, assim, elas possam ser cada vez mais otimizadas.

Esta pesquisa abrange as turbinas eólicas de eixo vertical, uma vez que, na literatura, os estudos são majoritariamente sobre as turbinas eólicas de eixo horizontal, por ser o tipo mais comum de turbina no mercado e por apresentarem um fator de capacidade superior as de eixo vertical, extraindo mais energia do vento. Ao se tratar de geração de energia de pequena escala, as turbinas de eixo vertical se destacam por operarem com velocidades de vento mais baixas e possuírem o requisito de serem menores que as turbinas de eixo horizontal, tornando possível, assim, que elas sejam dispostas mais próximas umas das outras na sua aplicação (QUEREJAZU; CROSS, 2012).

2.2.1 Turbinas eólicas de pequena escala

Turbinas eólicas de pequena escala possuem menos capacidade de geração de energia do que as grandes turbinas comerciais encontradas nos parques eólicos. Entretanto, os princípios de operação são os mesmos que as turbinas de grande escala, o ar passa pelas pás da turbina gerando uma força aerodinâmica, fazendo com que as pás girem. Um gerador converte a energia mecânica das pás rotativas em eletricidade. A distinção maior é o fato de que as turbinas eólicas de pequena escala operam mais próximas ao solo e em velocidades de vento mais baixas, mas sua redução de custos e maior versatilidade permitem que a energia eólica seja utilizada em um conjunto mais amplo de aplicações (QUEREJAZU; CROSS, 2012).

Tecnicamente, existem diversas definições de turbinas eólicas de pequena escala, um importante organismo de padronização internacional, o IEC – *International Electrotechnical Commission*, define SWTs (*Small Wind Turbines*) na norma IEC 61400-2 como tendo uma área de rotor inferior a 200 m², equivalente a uma potência nominal de aproximadamente 50 kW. Mesmo com esse padrão, muitos países estabelecem sua própria definição para turbinas eólicas de pequena escala. A discrepância do limite superior da capacidade de potência varia entre 15 kW e 100 kW para os cinco maiores países com produção de energia eólica de pequena escala, Canadá, China, Alemanha, Reino Unido e EUA (SMALL WIND WORLD REPORT, 2017).

A ANNEL (2016), com base nas Resoluções normativas ANNEL nº 482/2012 (ANNEL, 2012) e ANNEL nº 687/2015 (ANNEL, 2015), determina o conceito de micro e minigeração de energia, para efeitos de diferenciação, a partir de fontes renováveis, como para a energia solar e eólica: microgeração para sistemas com potência igual ou até 75 quilowatts (kW) e minigeração para sistemas com potência superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica, e 5 MW para as demais fontes.

Kishore *et al.* (2014) afirmam que não há uma nomenclatura fixa definida na literatura para categorizar as turbinas eólicas com base no seu tamanho, e que, na falta de qualquer definição credível, a faixa para a capacidade nominal de energia de turbinas eólicas de pequena escala varia de poucos watts a algumas centenas de quilowatts. Definiram, então, a seguinte nomenclatura com base no tamanho do rotor da turbina eólica: i) turbina eólica em microescala, diâmetro do rotor menor ou igual a

10 centímetros (cm); ii) turbina eólica de pequena escala, diâmetro do rotor maior que 10cm e menor que 100cm; iii) turbina eólica de média escala, maior que 1 metro (m) e menor que 5 m; iv) turbina eólica de grande escala, diâmetro do rotor maior que 5 m.

Para esta pesquisa, com o objetivo de padronizar uma classificação, será utilizado o termo turbina eólica em microescala (KISHORE *et al.*, 2014) para turbinas eólicas com diâmetro de rotor menor ou igual a 10cm, pois a turbina eólica de testes utilizada neste estudo se enquadra nessa classificação adotada. Do ponto de vista tecnológico, um dos desafios da microgeração de energia é o fato de os aerogeradores estarem dispostos em um local com ventos descontínuos e com baixa velocidade. Nesse sentido, o uso de um difusor acoplado à turbina eólica de eixo vertical poderá otimizar a eficiência da turbina.

Sendo assim, a pesquisa de novos conceitos e ideias que aprimorem a eficácia dessas turbinas acaba por se transformar em uma oportunidade projetual para a área do Design com um viés sustentável, em relação à produção de conhecimento projetual e científico (XIMENES, 2018).

2.2.2 Turbinas eólicas potencializadas por difusor

A energia do vento é bem conhecida por ser proporcional à potência cúbica da velocidade do vento que se aproxima da turbina eólica. Isso significa que mesmo um pequeno aumento na velocidade gera um grande aumento na produção de energia (ABE *et al.*, 2005).

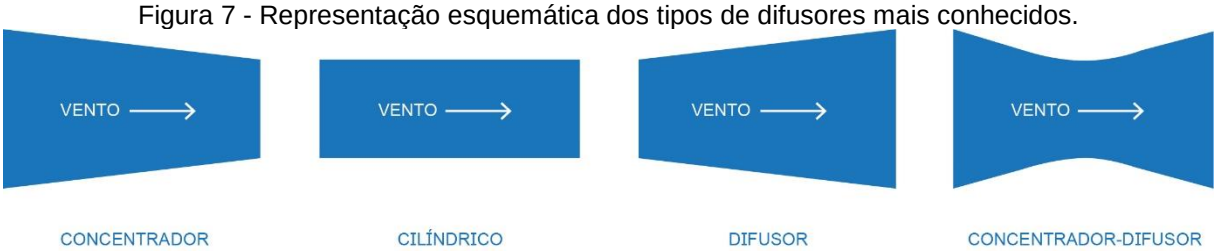
Um dos principais objetivos no que tange ao desenvolvimento de turbinas eólicas é aumentar a potência da turbina. Existem dois parâmetros que afetam o valor da potência, a área varrida das pás e a velocidade do vento. Logo, a potência de saída pode ser expandida aumentando um desses dois parâmetros. Um dos métodos para aumentar a velocidade efetiva do vento, segundo Akhgari (2011), é utilizar um difusor ou duto ao redor do rotor. A denominação para esse conceito é conhecida como turbina eólica potencializada por difusor, do original em inglês, DAWT (*diffuser-augmented wind turbine*), considerada uma das concepções mais promissoras no campo da energia eólica (KANNAN *et al.*, 2013).

O difusor atua acelerando a velocidade do vento que se aproxima da turbina eólica, controlando, dessa forma, a expansão do escoamento de ar, em uma relação

convergente (entrada) e divergente (saída). A taxa de fluxo de massa de ar que passa através da turbina aumenta por consequência da pressão subatmosférica significativa no plano de saída do difusor, devido à expansão controlada do fluxo de massas de ar (FOREMAN *et al*., 1978; ABE *et al*., 2005; OHYA *et al*., 2008, 2010).

A tipologia dos difusores é dividida geralmente em quatro tipos: concentrador, cilíndrico, difusor e concentrador-difusor. A Figura 7 apresenta um esquema com os tipos mais conhecidos de difusores.

Figura 7 - Representação esquemática dos tipos de difusores mais conhecidos.

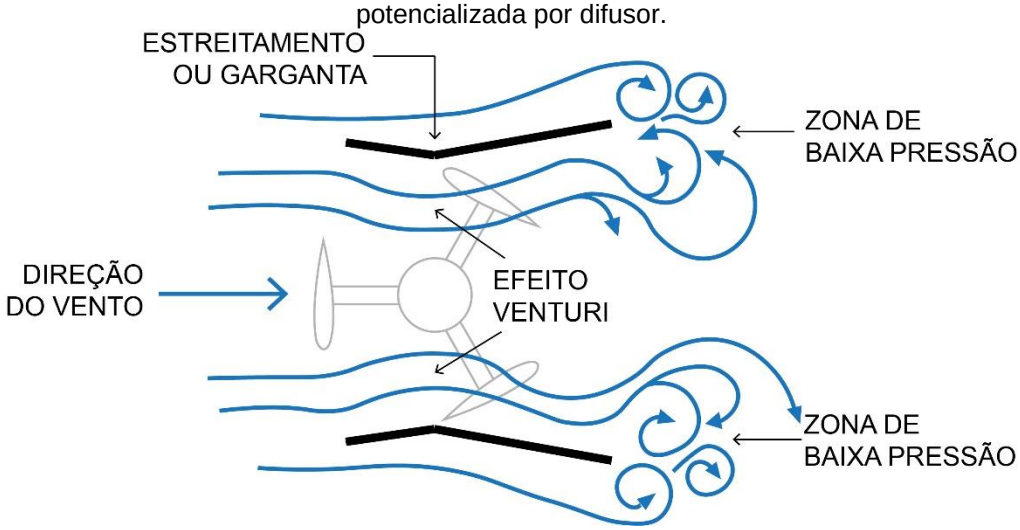


Fonte: Adaptado de Ohya *et al.* (2008).

O funcionamento aerodinâmico de uma turbina potencializada por difusor está associado ao Efeito Venturi ou efeito túnel. Esse efeito ocorre quando um fluido em movimento constante dentro de um duto uniforme afunila-se momentaneamente ao encontrar uma zona de estreitamento, também chamada de garganta, diminuindo sua pressão, resultando em um aumento da velocidade do fluido após atravessar esse estreitamento. O Efeito Venturi é explicado pela dinâmica dos fluidos pela Equação de Bernoulli, ou Princípio de Bernoulli. Essa equação foi apresentada na obra *Hydrodynamica* (1738) pelo matemático suíco Daniel Bernoulli, em que ele explica que um aumento na velocidade de um fluido ocorre simultaneamente com uma diminuição da pressão ou uma diminuição da energia potencial do fluido (BRUNETTI, 2008). Foi inspirado na equação de Bernoulli, que o físico italiano Giovanni Battista Venturi criou o tubo de Venturi. Em suma, o efeito Venturi está relacionado ao príncipio de Bernoulli, ao princípio de continuidade de massa e ao teorema da conservação de energia.

A Figura 8 mostra a vista superior do funcionamento aerodinâmico de uma turbina de eixo vertical potencializada por difusor.

Figura 8 - Vista superior do funcionamento aerodinâmico de uma turbina de eixo vertical potencializada por difusor.



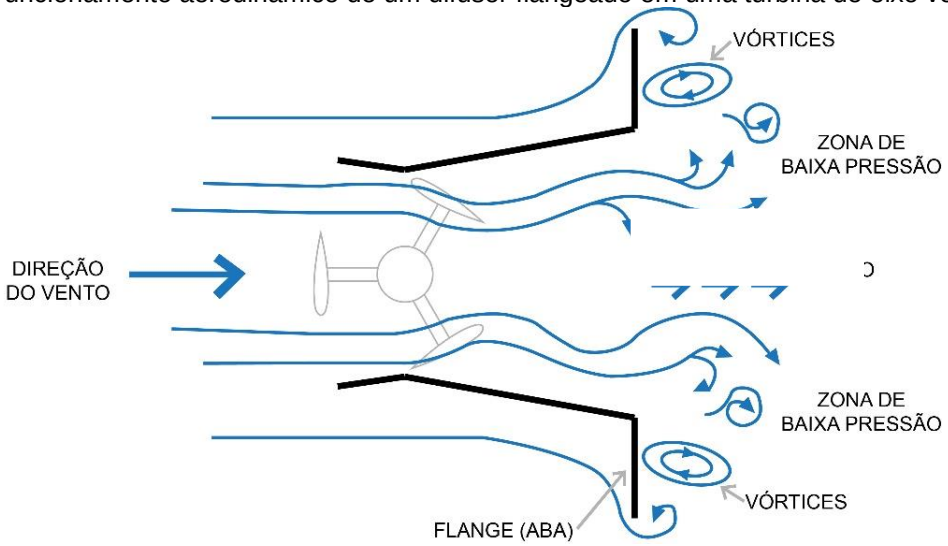
Fonte: Adaptado de Ohya *et al.* (2008).

É possível encontrar, na literatura, diversos estudos sobre design de difusores para as turbinas de eixo horizontal. Uma das primeiras investigações para turbinas eólicas potencializadas por difusores foi realizada por Igra (1977), em que ele utilizou um aerofólio NACA 4412 como difusor em torno de uma turbina de eixo horizontal verificando melhoria de potência por um fator de dois. Posteriormente, Igra (1981) testou diferentes aerofólios NACA para o perfil do difusor. Estudos mais recentes realizados na Universidade de Kyushu no Japão (INOUE *et al*., 2002; OHYA *et al*., 2002, 2004; ABE e OHYA, 2004, 2008; ABE *et al*., 2005) procuraram investigar o uso de difusores flangeados (*flanged diffusers*). Nessas pesquisas, descobriram que a adição de um flange, ou aba, na borda de saída do difusor da turbina eólica aumentava significativamente a potência, o torque e a velocidade de rotação da turbina. Abe *et al*. (2005) acreditam que a inclusão de um flange no plano de saída do difusor ocasiona uma grande separação do escoamento de ar no plano de saída do difusor, aumentando o efeito de redução da pressão atmosférica na periferia de saída. Essa baixa pressão produzida acaba resultando em um efeito aerodinâmico de sucção, trazendo mais escoamento de ar pelo difusor. Em virtude desse efeito, o escoamento de ar que entra no difusor pode ser eficazmente concentrado e acelerado em comparação com um difusor sem adição de flange.

Vários estilos de difusores foram aplicados em turbinas eólicas de eixos horizontais (OHYA; KARASUDANI, 2010), e supostamente a tecnologia similar deve ser também efetiva para turbinas eólicas de eixos verticais.

Embora a maioria das pesquisas e desenvolvimentos de difusores tenha sido realizada para as turbinas de eixo horizontal, existem alguns trabalhos, ainda poucos, focados no design de difusor para as turbinas de eixo vertical. Takahashi *et al.* (2006) estudaram o desempenho de uma turbina eólica de eixo vertical Darrieus com um difusor flangeado. No estudo, os autores compararam o desempenho do rotor isolado, sem difusor acoplado, com dois diferentes difusores flangeados. A Figura 9 mostra o funcionamento aerodinâmico de um difusor flangeado em uma turbina de eixo vertical.

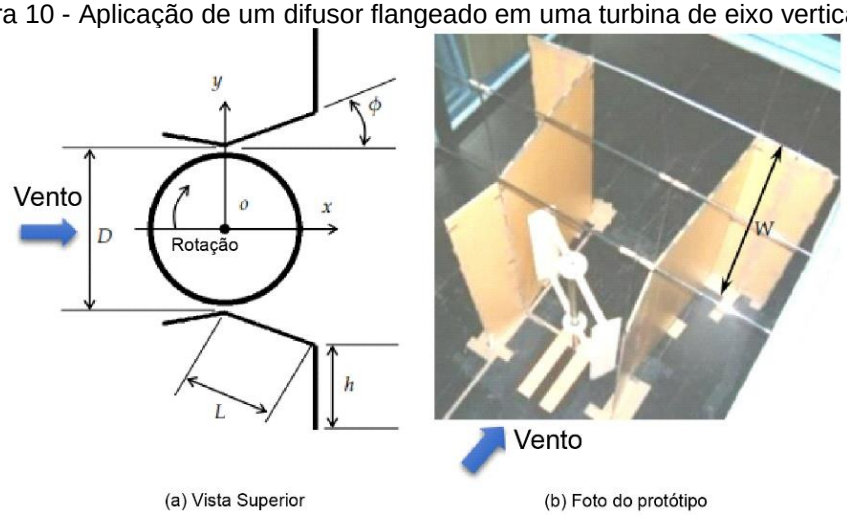
Figura 9 - Funcionamento aerodinâmico de um difusor flangeado em uma turbina de eixo vertical.



Fonte: Adaptado de Abe e Ohya (2004).

Roa *et al.* (2010) realizaram uma investigação numérica e experimental para uma turbina de água de fluxo cruzado com e sem difusor. Eles utilizaram um rotor Darrieus para aplicação em marés com dois distintos perfis de aerofólio para o difusor. Além desses estudos, Watanabe *et al.* (2016) averiguaram os efeitos do uso de um difusor em uma turbina de eixo vertical. O propósito foi encontrar os melhores parâmetros de configuração em relação ao aumento de potência das turbinas. Os autores testaram três modelos de difusores distintos, e todos demonstraram um aumento de potência. Verificaram, ainda, que uma turbina com perfis do tipo NACA0024 era mais adequada para a incorporação de um difusor para gerar maior potência de saída. A Figura 10 mostra os estudos realizados por Watanabe *et al.* (2016).

Figura 10 - Aplicação de um difusor flangeado em uma turbina de eixo vertical.



Fonte: Watanabe *et al.* (2016).

É de suma importância destacar que, na turbina eólica convencional, tanto nas turbinas de eixo horizontal quanto nas de eixo vertical, o escoamento de ar é reduzido e alargado, ocasionando uma perda na eficiência da turbina. Tratando-se de turbinas éolicas de microescala, em que as turbinas funcionam com situações de ventos de baixa velocidade e turbulentos, os difusores devem ser especificadamente estudados e projetados para trabalharem de maneira efetiva. Portanto, explorar a aplicação de difusores em turbinas de microescala de eixo vertical, de modo que venha se projetar novas soluções que possam produzir uma maior potência ou otimização de funcionamento nesse viés, torna-se bastante atraente no ponto de vista científico.

2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Para Versteeg e Malalasekera (2007), a dinâmica de fluidos computacional (CFD) é definida como a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluido, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio de simulação baseada em computador. É considerada uma técnica muito poderosa e abrange uma ampla gama de áreas de aplicação industrial e não industrial.

Fluxos e fenômenos relacionados podem ser descritos por equações diferenciais parciais, ou integro-diferenciais, que, exceto em casos especiais, não podem ser resolvidas analiticamente. Para se obter uma solução numericamente aproximada, é necessário utilizar um método de discretização que aproxima as

equações diferenciadas por um sistema de equações algébricas, que pode, então, ser resolvido em um computador (FERZIGER; PERIC, 2002).

A fluidodinâmica Computacional, original do inglês, *Computational Fluid Dynamics*, CFD, é uma ferramenta que integra as disciplinas de mecânica dos fluidos com a matemática e a ciência da computação. A mecânica dos fluidos estuda os fluidos em movimento, como eles se comportam durante o escoamento e respondem a influências como reações químicas e transferência de calor. Através da matemática, é possível representar, por meio de equações de Navier-Stokes, as características físicas dos fluidos em movimento, normalmente na forma diferencial; denominadas de equações governantes, que permitem determinar os campos de velocidade e de pressão em um escoamento. Já a ciência da computação atua na resolução dessas equações por meio de simulações numéricas através de linguagens computacionais de alto nível, efetuando a conversão das equações diferenciais em algébricas (TU *et al.*, 2008).

De 1960 em diante, a indústria aeroespacial integrou técnicas de CFD ao design, à pesquisa e ao desenvolvimento e à fabricação de aeronaves. Desde então, com a maior disponibilidade de computadores de alto desempenho, a CFD teve um gradativo aumento de interesse, tornando-se um componente vital no design de produtos e processos industriais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Existem várias soluções comerciais (*softwares*) em CFD, aptas a simular uma ampla gama de problemas de escoamentos de fluidos e transferência de calor. Para Versteeg e Malalasekera (2007), os *softwares* de CFD possuem três grandes elementos: (i) Pré-processamento, (ii) Solver e (iii) Pós-processamento.

A fase de Pré-processamento consiste na introdução de todos os parâmetros do problema, ela abrange as seguintes ações: (i) modelação da geometria, (ii) geração da malha, (iii) seleção dos fenômenos (físicos e químicos) a serem modelados, (iv) definição das propriedades do fluido, e (v) especificações das condições de simulação.

O Solver é o elemento responsáel pelo processamento das informações fornecidas durante as etapas de Pré-processamento. Por meio dele que se dá a aplicação das técnicas numéricas da solução e aplicação dos algoritmos para resolução dos problemas simulados. O Solver executa as seguintes ações: (i) integração das equações governates do fluxo de fluido sobre todo o volume de

controle do domínio, (ii) discretização, que é a conversão das equações integrais em sistema de equações algébricas, e (iii) solução das equações algébricas de forma iterativa (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O Pós-processamento é a parte visual e gráfica do processo CFD, em que ocorre a visualização dos resultados obtidos na fase anterior, possibilitando: (i) visualização da geometria de domínio e da malha, (ii) gráficos de vetores, (iii) linhas, contornos e sombreados, (iv) gráficos de superfície 2D e 3D, e (v) visualização de linhas de fluxo e trajetórias de partículas.

São muitas as vantagens da fluidodinâmica computacional sobre abordagens baseadas em experimentos para projetos de sistemas de fluidos: (i) redução de prazos e custos de novos projetos, (ii) possibilidade de estudar sistemas em que experimentos controlados são difíceis de realizar, (iii) capacidade de estudar sistemas sob condições perigosas e além de seus limites normais de desempenho, e (iv) nível de detalhes ilimitado de resultados (TU *et al.,* 2008).

Designers se beneficiam dessa ferramenta para poder realizar simulações e testes com o intuito de validar as alternativas desenvolvidas, antes mesmo da etapa de prototipagem, uma economia de tempo e de custos. Para profissionais de áreas como o Design, existem disponíveis, no mercado, alternativas de *softwares* CFD *easy-to-use*, cujo objetivo é expandir o uso da tecnologia. Uma dessas alternativas é o *software Autodesk Flow Design*, um *software* comercial oferecido pela *Autodesk*, cujo layout é semelhante aos demais *softwares* oferecidos pela empresa, tornando-o intuitivo e agradável para a realização das simulações. Ele será abordado de maneira mais detalhada na seção 2.4.2.

2.4 TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Aqui serão abordadas as tecnologias e ferramentas utilizadas para a realização de simulações efetuadas ao decorrer deste estudo.

2.4.1 Túnel de vento

Os túneis de vento são equipamentos que proporcionam um estudo aerodinâmico para verificar a eficiênca ou resistência de uma parte, ou até mesmo de

um todo, sem a necessidade de movimentação dos objetos, somente o vento percorre a seção de testes (OKAMOTO *et al.,* 2011).

O primeiro túnel de vento que se tem notícia, acionado por uma máquina a vapor, foi fabricado na Inglaterra em 1871, para a "*Aeronautical Society of Great Britain*", por um dos fundadores dessa associação, Frank H. Wenham (GORECKI, 1988).

Anos depois, mais especificadamente em 1901, os irmãos Wright em conjunto com demais pesquisadores começaram a construção de protótipos de aeronaves, que, naquela época, não eram motorizadas, mas contavam com algum tipo de propulsão, que as proporcionava alçar voo de forma autonoma. Os irmãos Wright, devido à necessidade de poder assegurar com melhor confiabilidade os resultados dos seus estudos, construíram então um túnel de vento, mostrado na Figura 11, para realizar testes em seus projetos de perfis aerodinâmicos de asas (NASA, 2002).

Figura 11 - Túnel de vento dos irmãos Wright.

Fonte: NASA, 2002.

A aplicação de túneis de vento em laboratórios de projeto para ensaios de sistemas aerodinâmicos é um recurso muito adequado para pesquisas e testes dos protótipos de aerogeradores. Sabe-se que ensaiar protótipos nas condições de vento ao ar livre não é muito eficiente, uma vez que os resultados dependeriam das condições climáticas e da velocidade do vento, que não é constante e acaba por dificultar o monitoramento e coleta de informações para determinar a eficiência do protótipo em estudo (OKAMOTO *et al.,* 2011).

Os túneis de vento possuem algumas configurações básicas, que podem ser classificadas quanto à velocidade do escoamento de ar na seção de testes e sua forma construtiva.

A velocidade do escoamento de ar é influenciada pelo tipo de circuito do túnel e também pelo tamanho do objeto a ensaiar. A classificação dos túneis em relação à velocidade do vento se dá por (i) túnel de vento de baixa velocidade, (ii) túnel de vento transônico, (iii) túnel de vento supersônico, e (iv) túnel de vento hipersônico:

(i) túnel de vento de baixa velocidade: também conhecido como subsônico, é normalmente instalado em laboratórios educacionais pelo fato de ter baixo custo, em termos técnicos, sua velocidade não ultrapassa 135m/s com um número de Mach até 0,4 (BARLOW *et al.*, 1999).

(ii) túnel de vento transônico: utilizado principalmente em pesquisas aeronâuticas pelo fato de ter uma velocidade compatível com a do voo das aeronaves; a velocidade do ar pode alcançar até 340m/s com número de Mach até 1 (BARLOW *et al.*, 1999).

(iii) túnel de vento supersônico: por utilizar bocais convergentes em sua forma construtiva, o consumo de energia é alto devido às velocidades que podem ser atingidas; a velocidade do vento varia em uma faixa de 340m/s até 1700m/s com número de Mach de 1 até 5 (BARLOW *et al.*, 1999).

(iv) túnel de vento hipersônico: possui bocais divergentes e pode atingir velocidades muito altas, acima de 1700m/s com número de Mach de 5 até 15 (BARLOW *et al.*, 1999).

Quanto à forma construtiva, os túneis de vento possuem dois tipos básicos de classificação – (i) circuito fechado e (ii) circuito aberto:

(i) circuito fechado: possui um custo operacional mais baixo, porte geralmente médio ou grande, pois o ar circula de forma ciclíca dentro do túnel permanecendo confinado economizando energia, fazendo com que seja possível aplicar testes com maiores variações de pressão (BARLOW *et al.,* 1999).

(ii) circuito aberto: ocupam menos espaço e geralmente têm custos de fabricação menores. Possuem as extremidades abertas, por onde entra e sai o escoamento de ar. Um ponto negativo é que, para atingir uma determinada velocidade, requer mais energia para a operação (BARLOW *et al.*, 1999).

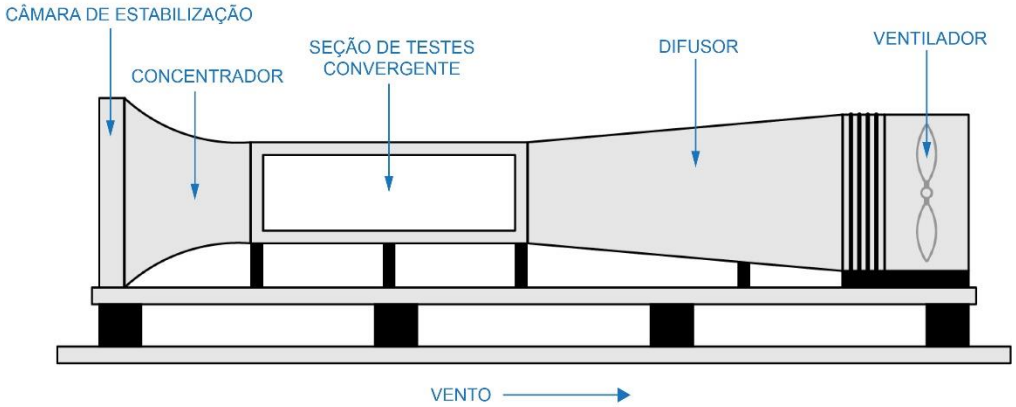
Os túneis de vento de circuito aberto, segundo Barlow *et al.* (1999), são ainda subdivididos em duas categorias – (i) túnel aspirador (*suckdown*) e (ii) túnel ventilador:

(i) túnel aspirador (*suckdown*): ventilador axial ou centrífugo é instalado após a seção de testes. O ar entra com bastante turbulência, porém, existem dispositivos para a retificação do escoamento e diminuição da turbulência.

(ii) túnel ventilador: ventilador é instalado antes da seção de testes. Apresenta turbulência, mas menos do que no túnel aspirador.

O túnel de vento é dividido em diversas partes e cada uma delas tem um propósito específico no escoamento do ar, exercendo um efeito sobre a qualidade do vento (BARLOW *et al*., 1991). Na Figura 12 é possível visualizar as seções típicas de um túnel de vento de circuito aberto tipo aspirador.

Figura 12 - Seções típicas de um túnel de vento de circuito aberto tipo aspirador.



Fonte: Adaptado de Barlow *et al.* (1999).

Para esta pesquisa, o túnel de vento utilizado foi o que está localizado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) do Departamento de Materiais (DEMET) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EE – UFRGS). Esse túnel é um subsônico do tipo aspirador (*suckdown*) de circuito aberto. Os ensaios em túnel de vento serão primordiais para este estudo, pois é por meio deles que se dará a validação dos resultados desta pesquisa.

2.4.2 Túnel de vento virtual

Maneiras mais eficientes, rápidas e econômicas para a avaliação de soluções projetuais são cada vez mais requisitadas por projetistas, designers e engenheiros, uma vez que os ciclos de inovação estão gradativamente mais rápidos, aumentando

a demanda de novas soluções projetuais em todas as áreas. Ao encontro disso estão os *sofwares* de simulação que se baseiam na Fluidodinâmica Computacional (CFD), que estão dispostos no mercado para auxiliar a demanda desses profissionais.

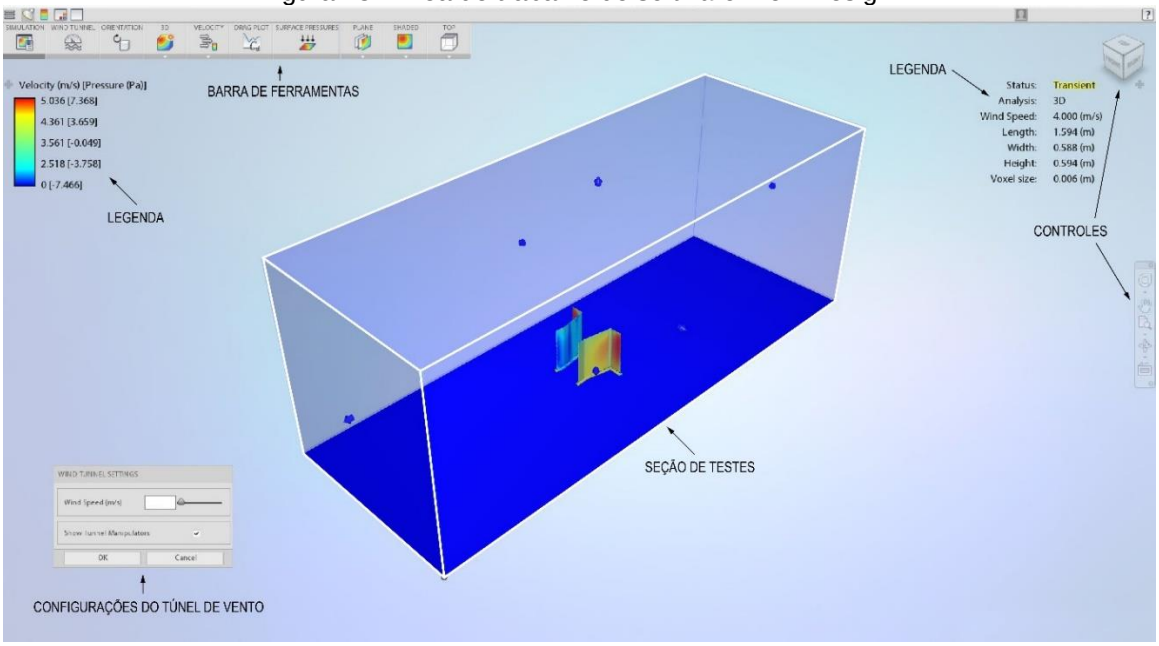
No entanto, *softwares* CFD são complexos, e seus usuários precisam ter habilidades e conhecimentos em várias áreas para saber manusear, compreender e ler os resultados obtidos em uma simulação (FERZIGER; PERIC, 2002).

Percebendo essa dificuldade de multidisciplinaridade que é necessária para operar um *software* CFD e com o objetivo de simplificar algumas rotinas CFD e expandir o uso para outras áreas, empresas começaram a desenvolver soluções CFD *easy-to-use*, com uma interface intuitiva e com configurações pré-definidas.

A Autodesk foi uma das empresas que disponibilizou uma solução comercial *easy-to-use* para simulações CFD. Ela é uma empresa renomada de *software* de design, engenharia e conteúdo digital e desenvolveu o *software Autodesk Flow Design*®. Esse *software* simula um túnel de vento virtual no qual é possível visualizar o escoamento de ar em torno de edifícios, veículos e outros objetos. Possui suporte para diversos tipos de arquivos CAD, reduzindo o trabalho de preparação de geometria específica, permitindo, assim, obter resultados projetuais de maneira rápida ao poder explorar diferentes condições de simulação (AUTODESK, 2018).

Com base na tecnologia CFD da aquisição *Blue Ridge Numerics*, a simulação de fluxo de forma fácil da Autodesk foi mostrada pela primeira vez na Autodesk Labs com o nome de *Project Falcon*, em setembro de 2012. Ele executa um solver de fluxo transiente incompressível por meio do método dos volumes finitos. A resolução da turbulência se dá usando um modelo *Smagorinsky* na simulação de grandes escalas *(Smagorinsky Large Eddy Simulation – LES)* (AUTODESK, 2018). As suas etapas de pré-processamento, solver e pós-processamento acontecem automaticamente por configurações pré-definidas pelo *software*, permitindo entregar resultados de forma muito rápida, possibilitando a exploração de mudanças de condições sem a necessidade da criação de novos modelos e armazenamento de grandes quantidades de dados. Na Figura 13 é possível visualizar a área de trabalho do *software Flow Design*.

Figura 13 - Área de trabalho do *software* Flow Design.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tendo em vista a qualidade do resultado que o *software Flow Design* pode entregar, de maneira rápida e eficiente, ele será adotado nesta pesquisa como solução CFD para realizar as simulações computacionais das soluções desenhadas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse capítulo é apresentado o conjunto de procedimentos metodológicos a serem adotados na execução desta pesquisa, com o intuito de atingir os objetivos definidos na seção 1.4.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Para Prodanov e Freitas (2009), os critérios de classificação para uma pesquisa científica são baseados do ponto de vista de quatro viéses, em relação à sua natureza, de seus objetivos, dos procedimentos técnicos e da forma de abordagem do problema.

Do ponto de vista da sua natureza, este estudo pode ser classificado como uma pesquisa básica, pois tem como objetivo gerar conhecimentos projetuais novos e úteis sobre design para projetos de turbinas eólicas de eixo vertical de pequena escala, sem ter uma aplicação prática imediata prevista.

Quanto ao ponto de vista de seus objetivos, o trabalho possui um objetivo explicativo, pois busca correlacionar ideias para identificar e compreender as causas e os efeitos de determinado fenômeno, além de aprofundar o conhecimento da realidade trazendo o conhecimento projetual científico sobre o tema desta pesquisa. Outro fator importante dentro dessa natureza de pesquisa é o método que será utilizado, que no caso desta pesquisa será o método experimental, que possibilita a manipulação e o controle de variáveis, com o intuito de identificar a causa da variável dependente em estudo.

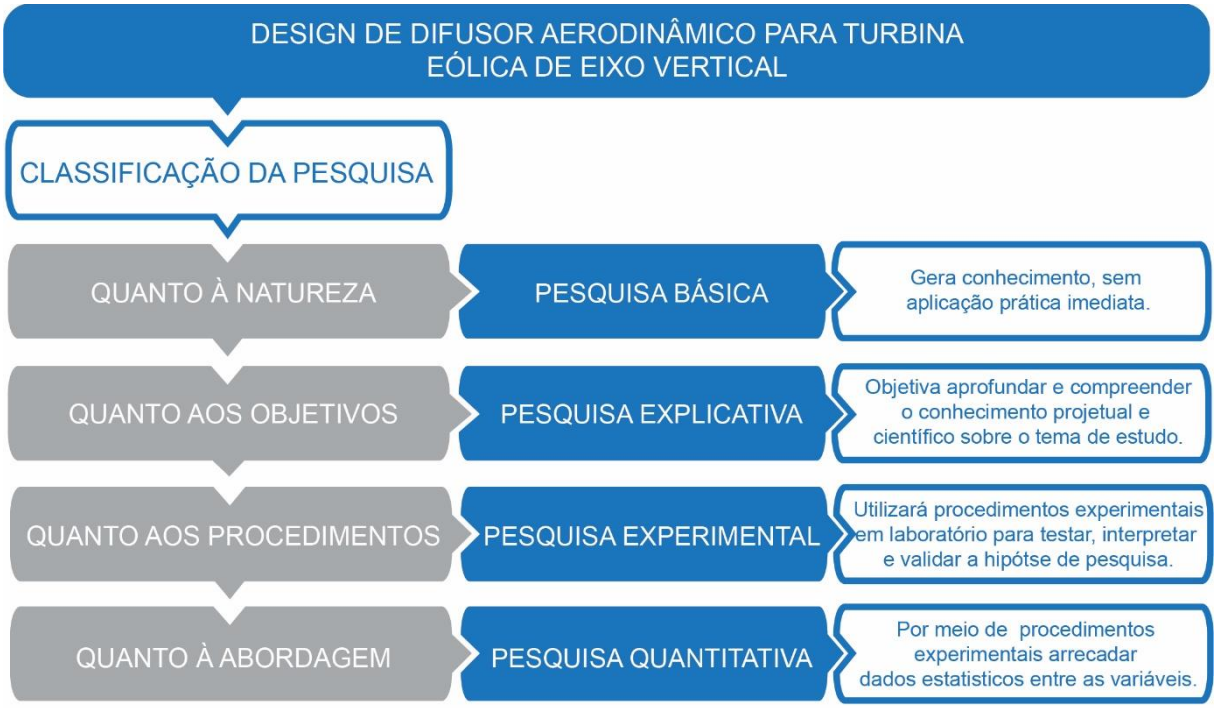
Sob o ponto de vista dos procedimentos técnicos, isto é, a maneira pela qual obtêm-se os dados necessários para a elaboração da pesquisa, o planejamento da pesquisa em uma dimensão mais ampla, esta se delineia como uma pesquisa experimental, uma vez que existirão variáveis relacionadas com o fenômeno estudado para testar e validar, em um ambiente controlado em laboratório. Sendo assim, por meio dela será possível identificar a relação entre as variáveis, buscando saber como uma influência a outra.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, esta pesquisa tem caráter quantitativo, pois visa, por meio de procedimentos experimentais, arrecadar

dados estatísticos ocasionados por um fenômeno e responder à hipótese de pesquisa deste trabalho pela análise das relações entre as variáveis que serão testadas.

Na Figura 14 está exposto um desenho esquemático da classificação desta pesquisa conforme descrito nos parágrafos anteriores.

Figura 14 - Classificação da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Prodanov e Freitas (2009).

Para a coleta e análise dos dados obtidos nesta pesquisa serão utilizadas técnicas padronizadas, buscando, assim, deixar o método reproduzível para futuros estudos. Dentre os procedimentos que serão realizados, destacam-se o uso do dispositivo WT, que será descrito na seção 4.13, o uso de simulação por fluidodinâmica computacional (CFD) e testes no túnel de vento.

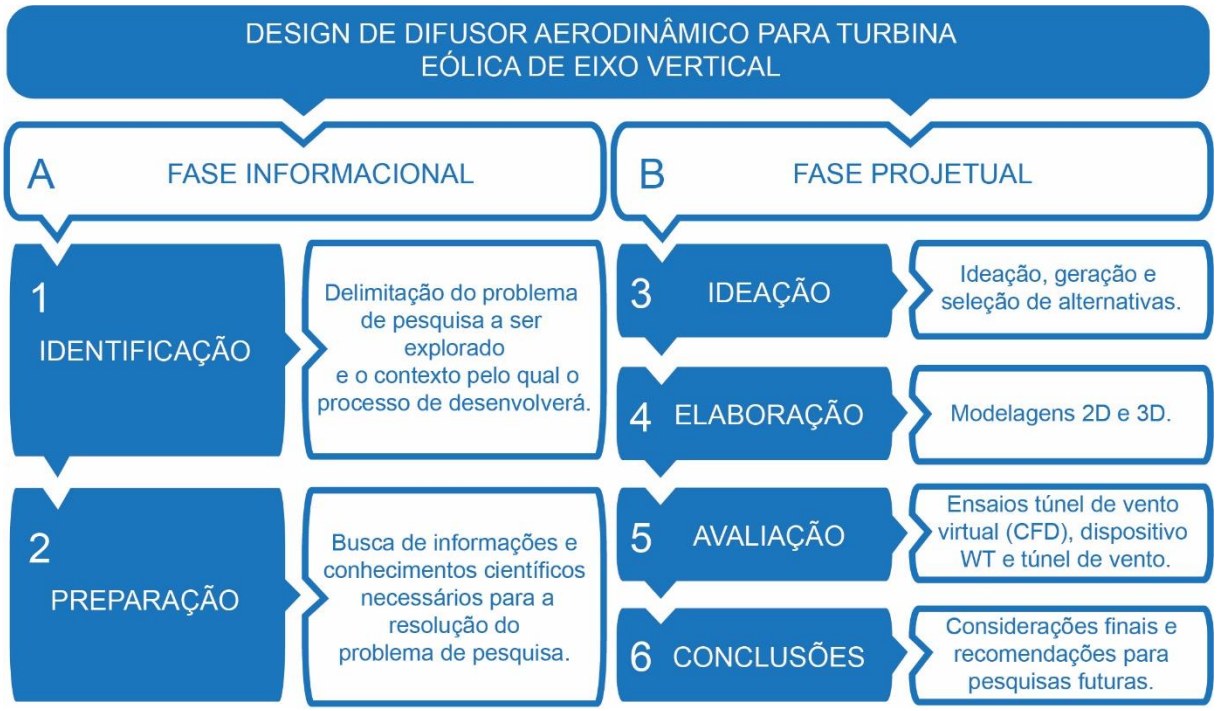
3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Para esta pesquisa, propôs-se dividir a sua estrutura em duas fases, a informacional e a projetual. A primeira fase voltada ao estudo, à exploração e à compreensão da temática do assunto abordado, assim como problemas e objetivos da pesquisa. A segunda fase é direcionada às etapas projetuais, com foco na

execução e aplicação dos conhecimentos adquiridos na solução dos problemas estabelecidos para esta pesquisa (XIMENES, 2018).

As duas fases são compostas por seis diferentes etapas (Identificação, Preparação, Elaboração, Avaliação e Conclusão). Por meio das seis etapas metodológicas apresentadas, caracterizam-se os procedimentos que serão adotados para atingir os objetivos que a pesquisa se propõe. A Figura 15 apresenta um diagrama da metodologia básica da pesquisa.

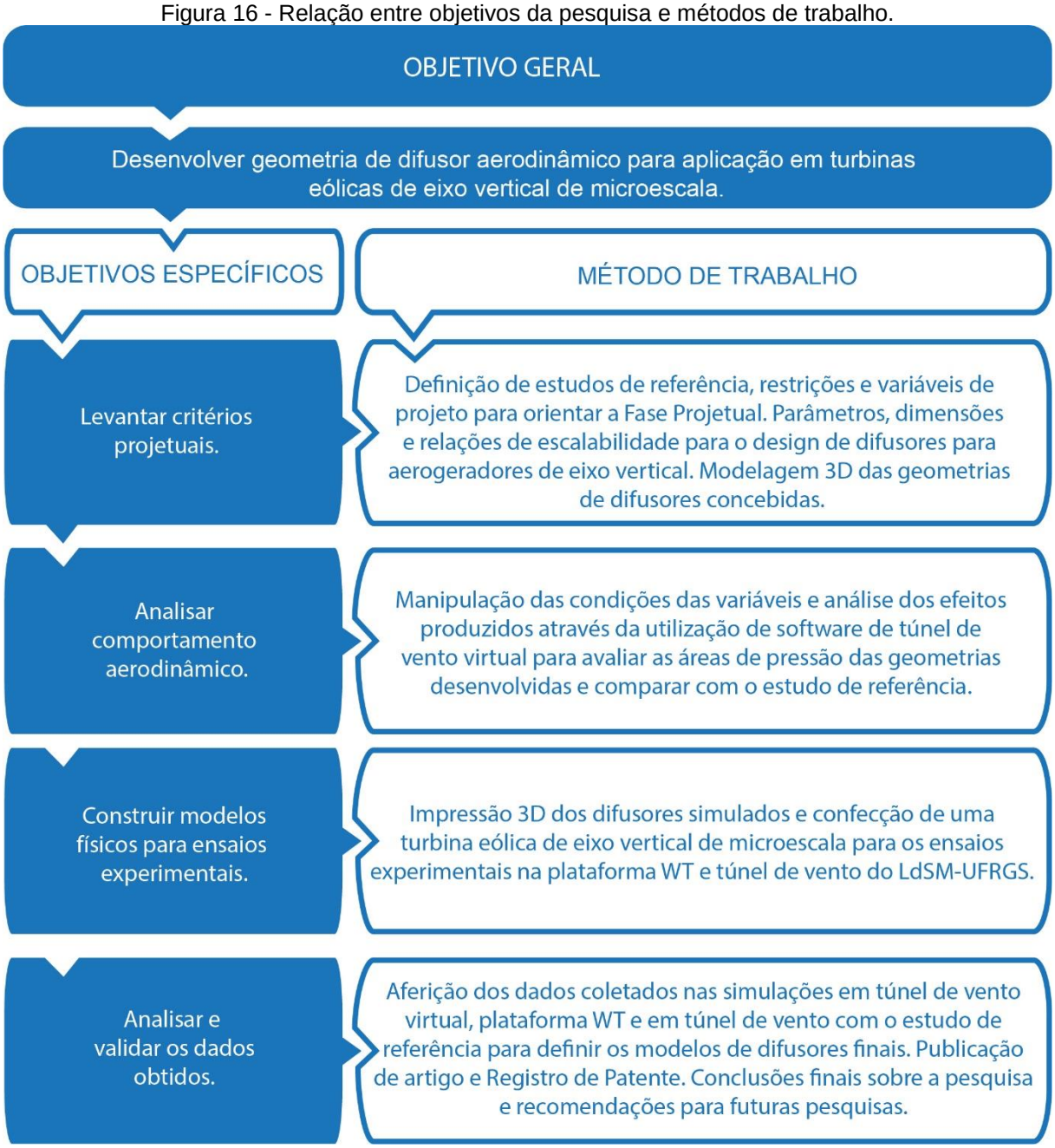
Figura 15 - Diagrama da metodologia projetual.



Fonte: Adaptado de Ximenes (2018).

Lakatos e Marconi (2001) relacionam diretamente os objetivos definidos para a pesquisa com os procedimentos metodológicos a serem adotados. Partindo dessa premissa, elaborou-se um esquema relacionando os objetivos da pesquisa com seus correspondentes métodos de trabalho. A Figura 16 mostra a relação entre os objetivos da pesquisa e os métodos de trabalho.

Figura 16 - Relação entre objetivos da pesquisa e métodos de trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Para atingir o primeiro objetivo específico, procurou-se estabelecer parâmetros para o design das geometrias dos difusores para aerogeradores verticais. Definiram-se, para isso, estudos que serviram de referência para guiar a execução desse e dos demais objetivos específicos.

Foram estabelecidos os estudos de Watanabe *et al*. (2016), sobre a aplicação de difusores em turbinas eólicas de eixo vertical, como referencial conceitual e teórico para o design de novos difusores. Utilizaram-se também os estudos de Ximenes (2018), para balizar a metodologia a ser seguida para o desenvolvimento dos

difusores. Os estudos de Ximenes (2018) fazem parte de uma sequência de pesquisas desenvolvidas pelo Professor Dr. Luis Henrique Alves Cândido, docente e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS (PgDesign) e do Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS (LdSM-UFRGS). Também foram estabelecidas as restrições e variáveis do objeto de estudo consideradas e avaliadas para esta pesquisa.

Partindo disso, baseado nos parâmetros e nas dimensões do difusor de Tipo Plano encontrados nas pesquisa de Watanabe *et al*. (2016), e na escala de projeto definida para este estudo, propôs-se uma área construtiva padronizada para o design da geometria para difusores aerodinâmicos para turbinas eólicas de eixo vertical. Essa área construtiva permitiu desenvolver as geometrias que foram testadas e avaliadas nas simulações CFD em túnel de vento virtual, nos ensaios do dispositivo WT e em túnel de vento. As geometrias foram concebidas em perfis bidimensionais (2D) e modeladas tridimensionalmente (3D) em *software* comercial CAD SolidWorks para a etapa de simulação por CFD.

Para realizar o segundo objetivo específico, as geometrias de difusores concebidas foram simuladas no *software freeware*[2] CFD de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design. As simulações em túnel de vento virtual são a primeira etapa de avaliação das variáveis estabelecidas. O *software* Flow Design é um simulador de túnel de vento otimizado para avaliação rápida do escoamento de ar em fases iniciais de projeto. O objetivo das simulações realizadas foi investigar as diferentes zonas de baixa pressão que são produzidas pela geometria do difusor, assim como verificar a intensidade dos vórtices produzidos no seu plano de saída. As geometrias que tiveram um resultado igual ou superior ao modelo de referência de Watanabe *et al.* (2016) foram selecionadas para as etapas seguintes, a prototipação e os ensaios no dispositivo WT e em túnel de vento.

Para alcançar o terceiro objetivo específico, os difusores selecionados anteriormente foram prototipados em impressora 3D para os ensaios no dispositivo WT e em túnel de vento. Além disso, prototipou-se uma turbina eólica de eixo vertical

---

[2] ***Freeware*** ou *software* gratuito é qualquer programa de computador cuja utilização não implica o pagamento de licenças de uso ou *royalties*. Todavia, isso não significa que necessariamente um programa freeware tem código aberto, pois mesmo grátis, os criadores podem restringir alterações e a redistribuição do programa alterado. Ele também se difere do *shareware*, em que o uso é gratuito apenas por um período de testes, por exemplo.

de microescala, seguindo a nomenclatura estabelecida por Kishore *et al.* (2014), em que o diâmetro do rotor é menor ou igual a 10 centímetros, para dar suporte aos difusores nos ensaios experimentais. A turbina eólica prototipada foi reproduzida em escala reduzida do modelo utilizado nos estudo de Watanabe *et al*. (2016). A escala de redução utilizada foi de 1:10. Essa redução foi necessária devido às dimensões do túnel de vento localizado no LdSM-UFRGS, utilizado para esta pesquisa. A sua dimensão reduzida permitiu o acoplamento dos difusores desenvolvidos dentro da seção de testes do túnel de vento. Para a reprodução em escala reduzida da turbina eólica de eixo vertical foi utilizado modelagem tridimensional CAD (*computer-aided design*) e prototipagem por meio de impressão 3D via FFF[3] (*fused filament fabrication* – fabricação por filamento fundido). O equipamento utilizado para a manufatura da turbina encontra-se localizado na Oficina de Modelos, Protótipos e Maquetes da Faculdade de Arquitetura da UFRGS (FA-UFRGS).

Para os ensaios experimentais, utilizou-se o dispositivo desenvolvido para esta pesquisa, o WT e o túnel de vento. O WT tem o propósito semelhante ao túnel de vento, mas é aberto e o ar é inserido por meio de um compressor, de forma pontual, em que é possível observar e estudar o ângulo do escoamento de ar sobre a turbina eólica. O túnel de vento utilizado neste estudo foi o subsônico de circuito aberto do tipo aspirador (*suckdown*) localizado no LdSM-UFRGS. Os ensaios realizados no dispositivo WT e no túnel de vento têm por finalidade mostrar o comportamento dinâmico da turbina eólica com um disusor acoplado. Esses ensaios experimentais permitiram identificar quais geometrias aceleram mais o escoamento de ar e, consequentemente, melhoram o *start* rotacional, torque de partida, da turbina eólica de eixo vertical de microescala. A Figura 17 ilustra as etapas descritas anteriormente.

[3] Também conhecido por FDM (*Fused Deposition Modeling*), ou Modelagem por Depósito de Material Fundido, em português, sigla patenteada pela empresa Stratasys. FFF é a sigla "*open-source*" para máquinas de mesmo princípio e significa *Fused Filament Fabrication*, ou em português, Fabricação por Filamento Fundido.

Figura 17 - Etapas para alcançar os objetivos da pesquisa.

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Variáveis de projeto, segundo Lakatos e Marconi (2001), são aspectos, propriedades, características individuais ou fatores, observáveis ou mensuráveis de um fenômeno. Nesta pesquisa, a geometria do difusor é a variável independente e as zonas de vórtices de baixa pressão produzidas no plano de saída do difusor são a variável dependente. A análise estatística e a coleta de dados foram realizadas em duas etapas.

Na primeira etapa, ocorreu, na simulação computacional, a análise e coleta de dados. O *software* CFD de túnel de vento virtual Flow Design disponibiliza informações de simulação por planos de pressão e tensão, e os dados foram coletados a partir

deles. O *software* apresenta na tela de simulação um gráfico de cores com as variações de pressão, do maior valor de pressão (alta pressão), apresentado na cor vermelha, ao menor valor de pressão (baixa pressão), exibido na cor azul escuro. As informações que são informadas nesse gráfico foram quantificadas e comparadas de forma visual com as áreas de alta e baixa pressão mostradas pelo *software* por meio das cores. Foi considerada, como um índice da probabilidade da geometria do difusor produzir vórtices que aceleram o escoamento de ar pela turbina, a instensidade da zona de baixa pressão no plano de saída do difusor. Os dados analisados foram comparados com o difusor de referência de Watanabe *et al.* (2016).

A segunda etapa se deu com os ensaios experimentais com o dispositivo WT e com o túnel de vento, em que, em ambos os casos, os dados foram quantificados através da velocidade de vento necessária para o *start* rotacional, torque de partida, da turbina, assim como pelas rotações por minuto (RPM) averiguadas nos experimentos. Os equipamentos utilizados para a coleta dos dados foram um anemômetro digital, para mensurar a velocidade do vento, e um tacômetro digital, para quantificar as rotações por minuto.

A verificação das variáveis nos ensaios do dispositivo WT e no túnel de vento do LdSM-UFRGS se deu de forma indireta, por meio das análises comparativas das rotações por minuto produzidas e da velocidade de vento necessária para o *start* rotacional, torque de partida. Os dados coletados nessa segunda etapa foram indicativos indiretos que a geometria do difusor produziu zonas de vórtices de baixa pressão, que potencializaram o efeito aerodinâmico de aspiração, ocasionando que o escoamento de ar acelerasse mais na sua passagem pelo difusor.

Os dados adquiridos nas simulações em túnel de vento virtual, no dispositivo WT e no túnel de vento, foram triangulados com os dados apresentados pela geometria de difusor referência. Por meio dessa triangulação, foi possível atingir o quarto objetivo desta pesquisa, que é analisar, comparar e validar os resultados obtidos, selecionando as alternativas de difusores que apresentaram o melhor desempenho comparados ao modelo referência. Com essa etapa concluída, foi possível chegar às conclusões e recomendações para futuras pesquisas sobre o tema.

4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Este capítulo é aquele em que acontece a transição da Fase Informacional para a Fase Projetual da pesquisa, que está dividida em quatro momentos. O capítulo 4 abrangerá três desses momentos, a etapa de Ideação (3), Elaboração (4) e Avaliação (5), ficando a última etapa, Conclusão (6), para o próximo capítulo.

Primeiramente será exposta a problematização do estudo, na qual são traçadas as metas gerais do projeto e apresentados todos os conhecimentos técnicos e científicos pertinentes e necessários que guiarão projetualmente a pesquisa.

Com o primeiro momento esclarecido, acontece a primeira parte de validação projetual, pois são realizadas as simulações em túnel de vento virtual, em que as geometrias concebidas serão simuladas e avaliadas para o próximo momento projetual, os ensaios no dispositivo WT e em túnel de vento.

Por fim, as geometrias selecionadas na simulação computacional são prototipadas em impressora 3D para serem submetidas aos ensaios no dispositivo WT e em túnel de vento, viabilizando, assim, que se possa analisar o comportamento dinâmico da turbina eólica de eixo vertical com um difusor acoplado.

4.1 ESTUDOS DE REFERÊNCIA

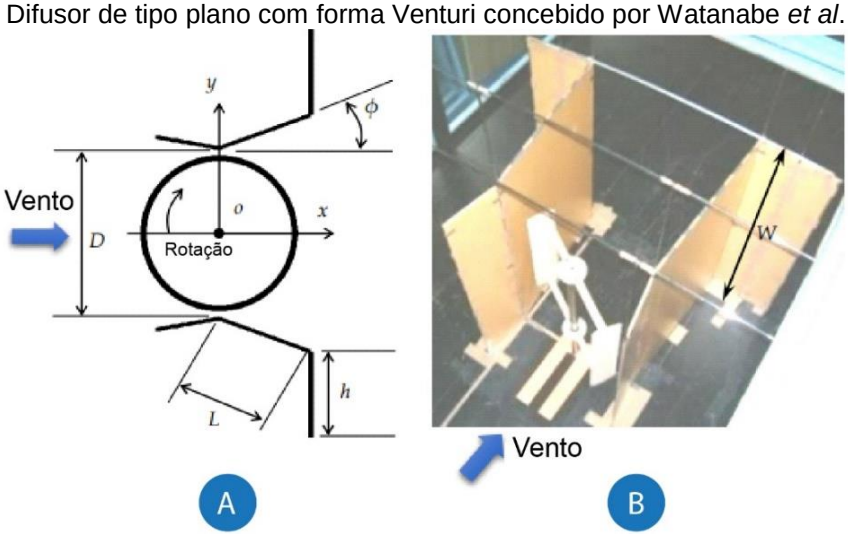
Aqui, são apresentados os dois estudos de referência que são os guias projetuais para esta pesquisa.

4.1.1 Aplicação de difusores em aerogeradores de eixo vertical

Como ponto de partida para esta dissertação, utilizaram-se os estudos realizados por Watanabe *et al*. (2016), sobre a aplicação de difusores em aerogeradores de eixo vertical. Eles investigaram a aplicação de difusores em uma turbina eólica de eixo vertical e examinaram o efeito do difusor no aumento de potência, usando o túnel de vento. O estudo dos pesquisadores partiu de um difusor do tipo plano com forma Venturi e a partir dessa geometria foram variando ângulos, dimensões e a superfície de plana para curva, para tentar encontrar os parâmetros ótimos da geometria do difusor.

Em seus estudos, averiguaram que quanto maior o ângulo semi-aberto (ângulo de saída) do difusor, maior o aumento de potência observado. O estudo também mostrou que o difusor com a superfície curva e flanges mais curtas foi mais eficaz na produção de um maior aumento de potência. A Figura 18 mostra o difusor de tipo plano com forma Venturi utilizado como ponto de partida para a pesquisa de Watanabe *et al*. (2016), assim como as suas configurações técnicas.

Figura 18 - Difusor de tipo plano com forma Venturi concebido por Watanabe *et al*. (2016).



(A) Vista superior e (B) Fotografia.

Fonte: Watanabe *et al*. (2016).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros e valores das configurações técnicas da turbina eólica de eixo vertical com difusor de tipo plano elaborado por Watanabe *et al*. (2016).

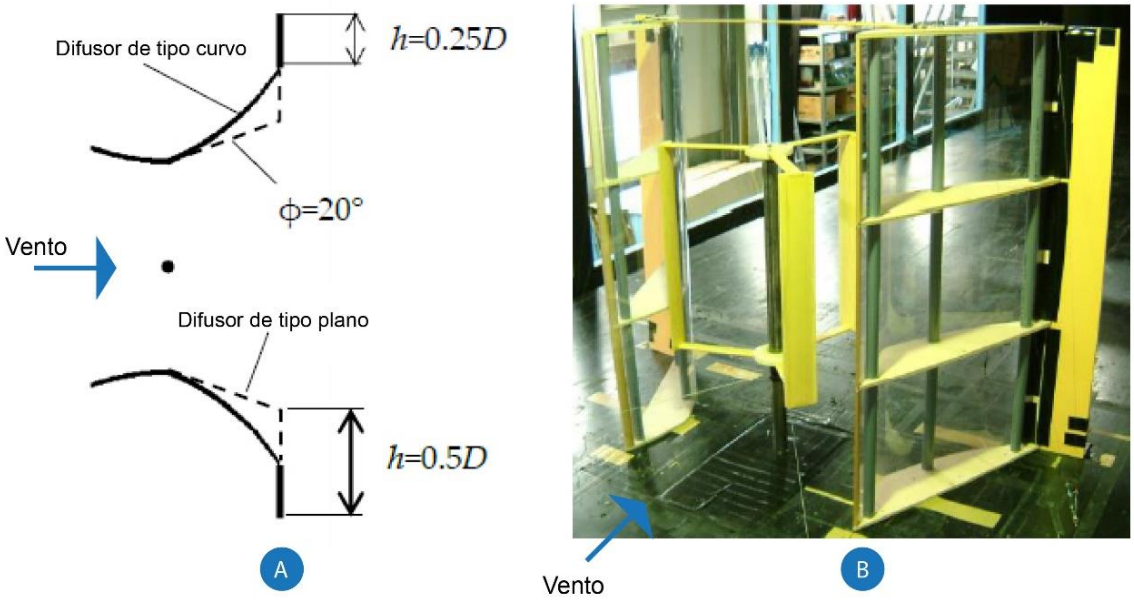
Tabela 2 - Parâmetros e valores das configurações técnicas da turbina com difusor de tipo plano.

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Distância entre os dois lados do difusor na garganta	D	800 mm
Diâmetro do rotor	Dr	700 mm
Altura do difusor	W	1432 mm
Comprimento do difusor	L	912 mm
Largura do flange	h	400 mm
Ângulo semi-aberto do difusor	ϕ	10°
Altura do rotor	Wr	700 mm
Tipo de pá	-	NACA

Fonte: Watanabe *et al*. (2016).

A Figura 19 mostra o difusor de tipo curvo com forma Venturi elaborado por Watanabe *et al*. (2016), assim como as suas configurações técnicas, que são baseadas no difusor de tipo plano.

Figura 19 - Difusor de tipo curvo com forma Venturi.



(A) Vista superior e (B) Fotografia.

Fonte: Watanabe *et al*. (2016).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros e valores das configurações técnicas da turbina eólica de eixo vertical com difusor de tipo curvo elaborado por Watanabe *et al*. (2016).

Tabela 3 - Parâmetros e valores das configurações técnicas da turbina com difusor de tipo curvo.

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Distância entre os dois lados do difusor na garganta	D	800 mm
Diâmetro do rotor	Dr	700 mm
Altura do difusor	W	1432 mm
Comprimento do difusor	L	456 mm
Largura do flange	h	200 mm
Ângulo semi-aberto do difusor	ϕ	20°
Altura do rotor	Wr	700 mm
Tipo de pá	-	NACA

Fonte: Watanabe *et al*. (2016).

A turbina eólica utilizada por Watanabe *et al.* (2016) na sua pesquisa possui duas pás, e nela, testaram dois perfis distintos, o NACA 0018 e o NACA 0024, em que o NACA 0024 destacou-se, gerando maior potência com a inclusão do difusor.

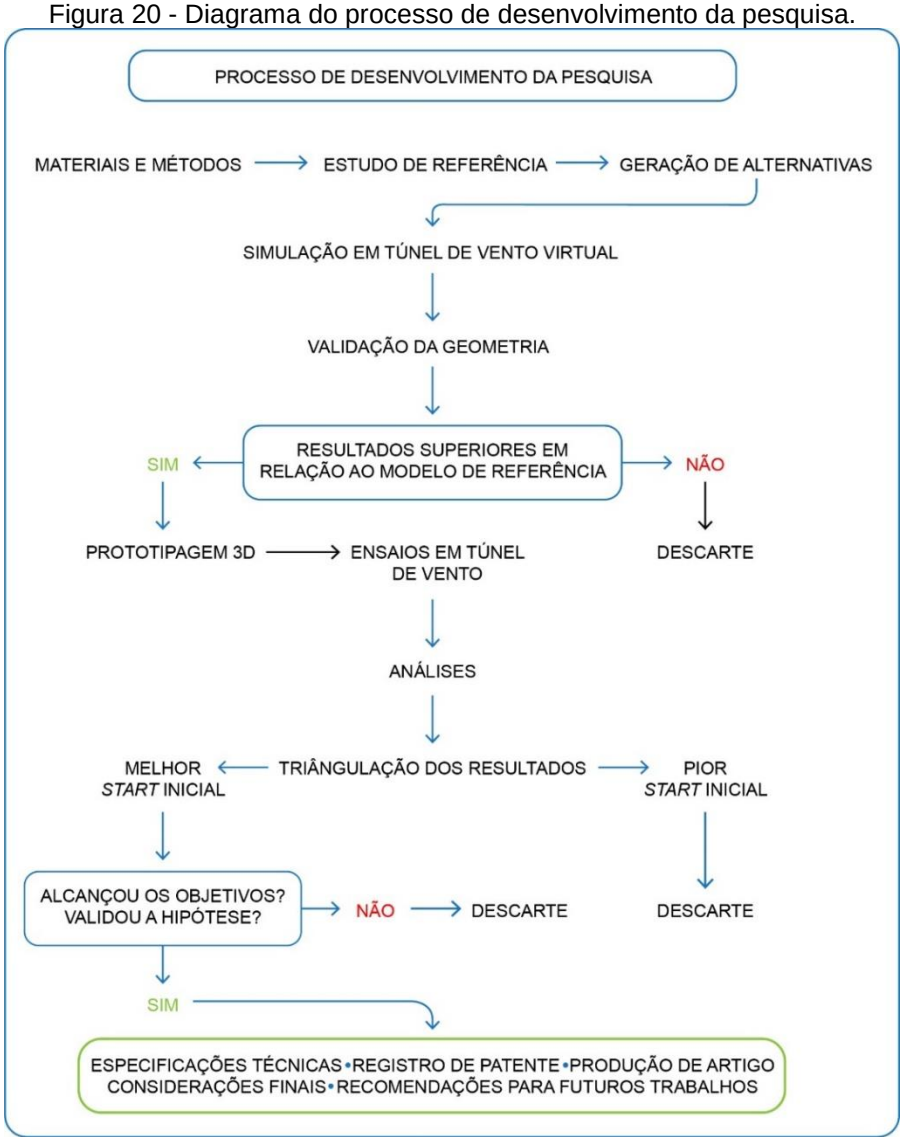
As contribuições deste estudo estão no estabelecimento do conceito de difusor para aerogeradores de eixo vertical, visto que, a partir das configurações e dos parâmetros determinados, consegue-se construir difusores de tipo plano com forma Venturi e difusores de tipo curvo com forma Venturi. O modelo de difusor que guiará conceitualmente o desenvolvimento proposto por este trabalho será o de tipo plano com forma Venturi, uma vez que também foi a partir dele que o modelo de tipo curvo foi concebido. Todavia, o difusor de tipo curvo também será utilizado como referência para esta pesquisa, de forma comparativa, isso porque, segundo os estudos de Watanabe *et al.* (2016), esse tipo de difusor se mostrou com características promissoras.

4.1.2 Método de pesquisa

Outro estudo de referência adotado por esta pesquisa são os propostos por Ximenes (2018) sobre design de difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de pequena escala. Esse trabalho estabeleceu difusores compactos, objetivando alcançar um melhor *start* rotacional (menor torque de partida para rotacionar) em baixas velocidades de vento.

A contribuição desse trabalho para esta pesquisa foi na definição do método para o estudo na fase projetual, uma vez que os objetivos dos trabalhos são semelhantes, alcançar um melhor *start* rotacional, mas, em tipos de turbinas eólicas diferentes. Ximenes (2018) trabalhou com difusores para turbinas eólicas de eixo horizontal e elaborou um método de pesquisa para alcançar o seu objetivo. A Figura 20 mostra por meio de um esquema visual simplificado o método utilizado por Ximenes (2018) na Fase Projetual até a conclusão da pesquisa, que será seguido também para este estudo.

Figura 20 - Diagrama do processo de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Ximenes (2018).

O processo de desenvolvimento da Fase Projetual deste estudo será seguido por essa referência, acrescentando, após a prototipagem, além dos ensaios em túnel de vento, os ensaios no dispositivo WT.

4.2 RESTRIÇÕES DE PROJETO

Para o projeto dos difusores, algumas restrições serão consideradas, elas serão descritas a seguir:

1) Desenvolver as geometrias dentro do conceito de difusor proposto por Watanabe *et al*. (2016), referência conceitual deste estudo.

2) Utilizar o método utilizado por Ximenes (2018) na fase projetual deste estudo, uma vez que já foi validado por ele em sua pesquisa.

3) Considerar as dimensões da seção de testes do túnel de vento do LdSM/UFRGS onde serão realizados os testes aerodinâmicos, para desenvolvimento dos difusores e da turbina eólica de microescala.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO

Esta pesquisa caracteriza-se como sendo uma pesquisa experimental e com o objeto de estudo definido. O próximo passo passa a ser selecionar as variáveis que serão capazes de influenciar o objeto em estudo, assim como as formas de controle e de observação que as variáveis produzem no objeto.

As variáveis, segundo Lakatos e Marconi (2001), são aspectos, propriedades, características individuais ou fatores, observáveis ou mensuráveis de um fenômeno. Prodanov e Freitas (2009) acreditam que variáveis são características observáveis de um fenômeno que possuem correlação entre si. Considerando que esta é uma pesquisa quantitativa, as variáveis deste estudo são mensuráveis e podem ser quantificadas estatisticamente.

As variáveis podem ser classificadas em duas categorias, (i) variável independente e (ii) variável dependente (PRODANOV; FREITAS, 2009):

(i) variável independente – é a que é o fator determinante para que aconteça um determinado resultado, a condição ou causa para que se tenha um efeito ou uma consequência, o estímulo que condiciona uma resposta;

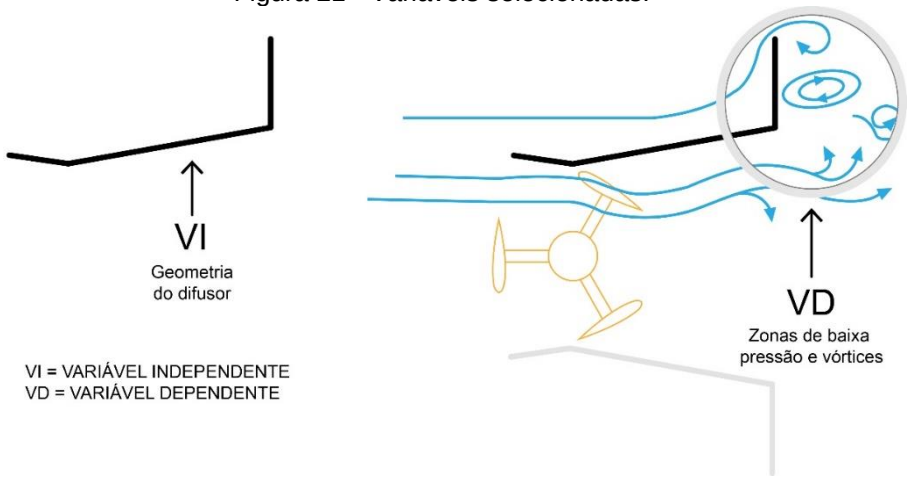
(ii) variável dependente – é o fator ou propriedade que é efeito, resultado, consequência ou resposta de algo que foi estimulado. Não é manipulada, todavia, é o efeito observado como resultado da manipulação da variável independente.

Para esta pesquisa, ficou definido que a variável independente é a geometria do difusor e que as zonas de baixa pressão produzidas por essa geometria no plano de saída do difusor seriam a variável dependente. A variável independente é aquela que é diretamente manipulada, e isso se dará por meio do design das diferentes geometrias.

As zonas de baixa pressão responsáveis pela aceleração do fluxo passante pela turbina eólica são as variáveis dependentes desta pesquisa, pois, segundo

Kosasih e Tondelli (2012), a capacidade da geometria de reduzir a pressão no plano de saída do difusor é determinante para acontecer o efeito aerodinâmico que resulta no aumento do escoamento de ar pela turbina eólica. E a intensidade desse efeito é dependente da geometria do difusor. A Figura 21 mostra um desenho esquemático com as variáveis selecionadas.

Figura 21 - Variáveis selecionadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

O tratamento estatístico da variável dependente será realizado de duas maneiras. A primeira delas é por meio de simulações computacionais, nas quais os dados serão quantificados visualmente e numericamente com as informações de pressão e tensão que são disponibilizadas pelo *software* CFD de túnel de vento virtual Flow Design. A segunda maneira é para os ensaios no dispositivo WT e no túnel de vento, em que os dados serão quantificados de forma indireta, através da análise das rotações por minuto (RPM) observadas nos experimentos e da velocidade de vento necessária para o *start* rotacional, torque de partida da turbina eólica.

Pode-se explicar essa verificação indireta pela seguinte relação: um valor maior de rotações por minuto corresponde a uma maior velocidade do escoamento de ar pela turbina eólica, o que significava uma maior intensidade da zona de baixa pressão e do efeito aspirador na parte posterior do difusor, causando, assim, um aumento no escoamento do ar. Essa aceleração influencia diretamente na redução da velocidade de vento necessária para que a turbina comece a girar.

Quanto ao tratamento estatístico da variável independente, este se dará por meio da manipulação do design da geometria do difusor e simulação computacional CFD.

4.4 ESCALA DE PROJETO

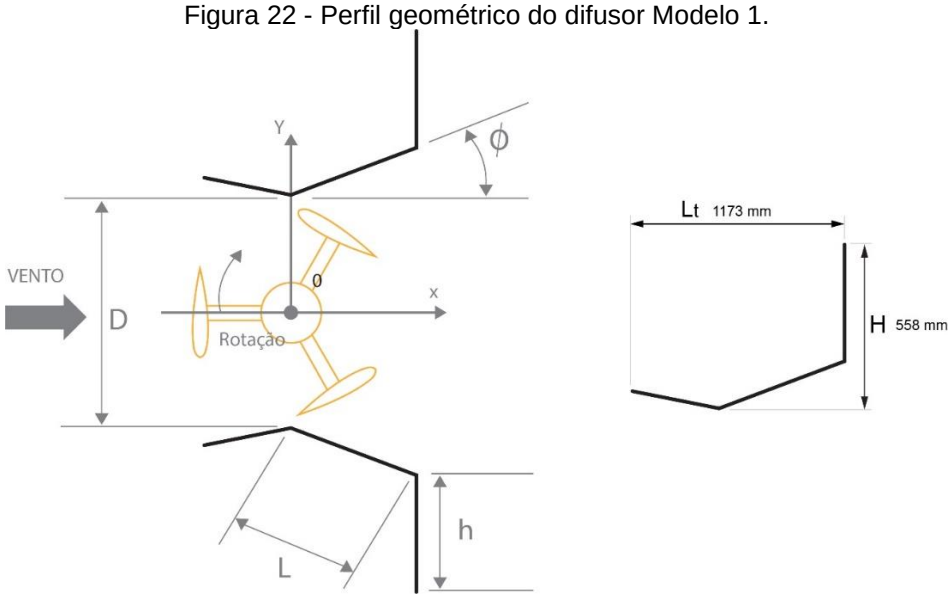
Os difusores e a turbina eólica serão reproduzidos em escala reduzida em relação ao modelo utilizado no estudo de Watanabe *et al.* (2016). Cabe salientar que o modelo de estudo utilizado serviu como referencial geométrico e conceitual, sendo assim, não será realizado nenhum comparativo em razão das diferentes escalas.

Utilizou-se uma escala de redução 1:10. Para essa definição foram considerados dois parâmetros de referência: (i) altura do difusor (W) e (ii) distância D (distância entre os dois lados do difusor na garganta). Esses parâmetros foram selecionados porque a escala calculada deveria levar em consideração as especificações técnicas da seção de testes do túnel de vento do LdSM/UFRGS, um requisito deste projeto, e ambos influenciariam nas dimensões de altura x largura.

4.5 GEOMETRIA DE REFERÊNCIA

O perfil geométrico do difusor de tipo plano com forma Venturi desenvolvido por Watanabe *et al.* (2016) foi selecionado como modelo de referência para esta pesquisa. Essa geometria serviu como guia para as demais alternativas desenvolvidas, denominando-se como difusor Modelo 1. A Figura 22 mostra o perfil geométrico do Modelo 1.

Figura 22 - Perfil geométrico do difusor Modelo 1.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria do difusor Modelo 1 foi projetada e escalonada a partir das dimensões disponíveis no estudo de Watanabe *et al.* (2016). A Tabela 4 mostra as dimensões e os valores escalonados considerados neste estudo.

Tabela 4 - Valores de configuração para um difusor de tipo plano com forma Venturi de referência.

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR ORIGINAL	VALOR EM ESCALA
Distância entre os dois lados do difusor na garganta	D	800 mm	80 mm
Diâmetro do rotor	Dr	700 mm	70 mm
Altura do difusor	W	1432 mm	143,2 mm
Comprimento do difusor	L	912 mm	91,2 mm
Largura do flange	h	400 mm	40 mm
Ângulo semi-aberto do difusor	θ	10°	10°
Altura do rotor	Wr	700 mm	70 mm
Tipo de pá	-	NACA	NACA
Comprimento total do difusor	Lt	1173 mm	117,3 mm
Largura total do difusor	H	558 mm	55,8 mm

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria de referência servirá para a padronização de uma área construtiva normatizada para guiar o design dos perfis geométricos dos difusores. O Modelo 1 foi modelado tridimensionalmente em *software* 3D para servir de referência nas etapas seguintes. O Apêndice A mostra o detalhamento completo da geometria de difusor de referência.

A geometria do difusor de tipo curvo com forma Venturi elaborado por Watanabe *et al.* (2016) também será reproduzido para ser utilizado como referência nesta pesquisa. Nesse caso, apenas os seus resultados servirão como referência, pois ele será reproduzido e passará por todos os ensaios que os demais difusores passarão, túnel de vento virtual, dispositivo WT e túnel de vento. Ele será denominado como Modelo 2.

4.6 ÁREA CONSTRUTIVA

Watanabe *et al.* (2016), em seus estudos, partiram de um modelo de difusor de tipo plano com forma Venturi e a partir desse modelo testaram ângulos, dimensões e superfícies. Desses modelos, tendo como exceção o de tipo curvo, o que apresenta o maior número de informações para reprodução é o de tipo plano com forma Venturi, os demais não apresentam uma área construtiva padronizada o suficiente para garantir a sua reprodutibilidade e escalabilidade. Percebendo-se isso, para esta

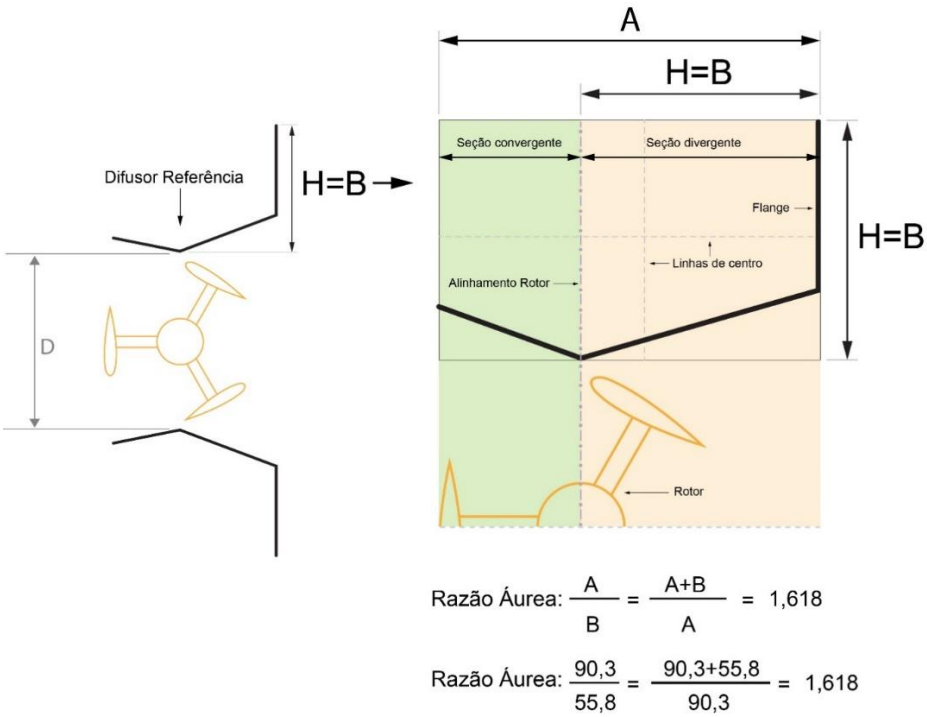
pesquisa, propôs-se uma padronização dessa área construtiva, baseada nos parâmetros e dimensões do difusor de tipo plano com forma Venturi elaborado por Watanabe *et al.* (2016) e na escala de projeto definida para este estudo.

A área construtiva será definida a partir da teoria da Razão Áurea, também chamada de segmento áureo ou proporção áurea, uma constante real algébrica irracional obtida quando se divide uma reta em dois segmentos de forma que o segmento mais longo da reta dividida pelo segmento menor seja igual à reta completa dividida pelo segmento mais longo, e seu valor é constituído por 1,6180, que representa a mais agradável proporção entre duas medidas (BOYER, 1974).

A área de construção é dividida em duas partes, a seção convergente, parte de entrada e concentração do vento, representando 40% do comprimento total do difusor (L_t), e a seção divergente, área de saída e difusão do vento, representando 60% do comprimento total do difusor (L_t). A turbina eólica fica alinhada entre as áreas de entrada e saída do difusor.

A medida inicial para a definição da área construtiva foi baseada na largura do difusor (H). A partir dela, por meio da teoria da Razão Áurea, foi definida a nova medida do comprimento total do difusor. A Figura 23 apresenta o esquema da configuração da área construtiva padrão para o design da geometria dos difusores.

Figura 23 - Parâmetros de configuração da área de construção da geometria.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

O detalhamento completo da área construtiva padronizada encontra-se no apêndice B.

4.7 GEOMETRIZAÇÃO

Com a área contrutiva definida, foi possível proceder para a geometrização das alternativas. As geometrias elaboradas para este estudo serão concebidas dentro dos parâmetros de configuração da área construtiva estabelecidos na Figura 23. É importante ressaltar que o modelo de difusor referência de tipo plano com forma Venturi, assim como o difusor de tipo curvo com forma Venturi, será reproduzido com as suas dimensões originais em escala. Foram geometrizadas 18 alternativas. A Figura 24 apresenta as geometrias concebidas para este estudo.

Figura 24 - Geometrias de difusores desenvolvidas para esta pesquisa.

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Ximenes (2018) elaborou nos seus estudos tipologias formais de geometrias, que são três – (i) geometria de ângulo semiaberto, (ii) geometria cilíndrica e (iii) geometria híbrida:

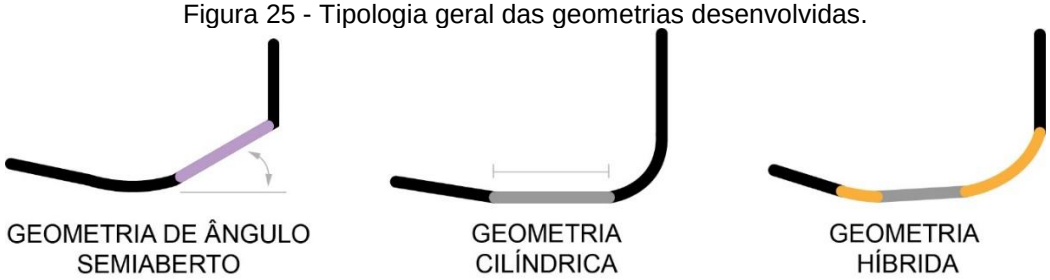
(i) geometria de ângulo semiaberto: são caracterizadas por terem em sua forma um grande ângulo semiaberto de difusão. Encontrada na maior parte dos modelos 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 16, 17, 18, 19 e 20.

(ii) geometria cilíndrica: são caracterizadas por possuírem uma grande seção cilíndrica em sua forma. Encontrada nos modelos 14 e 15.

(iii) geometria híbrida: são caracterizadas por não possuírem um elemento predominte que irá caracterizar a sua geometria, como um ângulo semiaberto ou uma seção cilíndrica. Encontrada no modelo 12.

A Figura 25 mostra as três tipologias formais de geometrias elaboradas por Ximenes (2018).

Figura 25 - Tipologia geral das geometrias desenvolvidas.



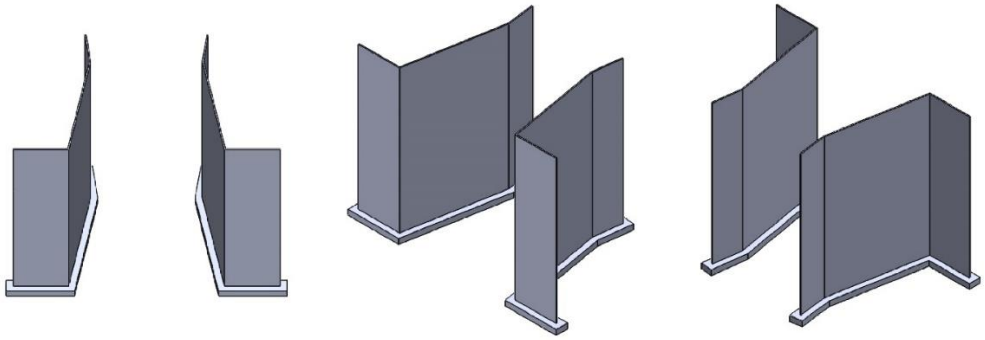
Fonte: Adaptado de Ximenes (2018).

O Apêndice C mostra, detalhadamente, a geometrização das 18 alternativas desenvolvidas para este estudo. Com as geometrias definidas, é possível avançar para a modelagem tridimensional, que é fundamental para as próximas etapas da fase projetual desta pesquisa.

4.8 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

A modelagem tridimensional (3D) da geometria dos difusores é fundamental nesta pesquisa, tanto para a simulação no túnel de vento virtual quanto para a prototipagem em impressora 3D dos modelos para os ensaios no dispositivo WT e túnel de vento. A modelagem se deu no *software* comercial CAD (*computer-aided design*) *SolidWorks* 2016. A Figura 26 mostra o resultado da modelagem tridimensional de uma geometria de difusor.

Figura 26 - Modelagem tridimensional de uma geometria de difusor.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Os difusores foram modelados com espessura de 1mm e foram exportados para o formato de arquivos STL (*Standard Triangle Language).* Esse é um formato padrão de arquivos tridimensionais que é suportado por muitos outros pacotes de *software*. É muito utilizado para prototipagem rápida, impressão 3D e manufatura auxiliada por computador (CAM). O STL é o formato padrão de entrada do *software* de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design que será utilizado para realizar as simulações por CFD nesta pesquisa.

4.9 SIMULAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO VIRTUAL

Nesta seção, acontece a primeira etapa de avaliação das variáveis estabelecidas. O objetivo das simulações em túnel de vento virtual é analisar as diferentes zonas de baixa pressão que são produzidas pela geometria do difusor, assim como verificar a instensidade dos vórtices gerados no seu plano de saída.

Foram realizadas simulações bidimensionais por pressão nos difusores, isso possibilitou que fosse possível visualizar as zonas de alta e baixa pressão, assim como a intensidade da baixa pressão causada pelos vórtices no plano de saída do difusor, fator muito importante para este estudo, uma vez que essa intensidade está ligada à capacidade do difusor aumentar o escoamento de ar passante pela turbina eólica, acelerando o vento. As simulações realizadas no túnel de vento virtual possuíram configurações quanto (i) à Resolução da malha, (ii) à velocidade do vento, (iii) às dimensões da seção de testes e (iv) aos dados para análise:

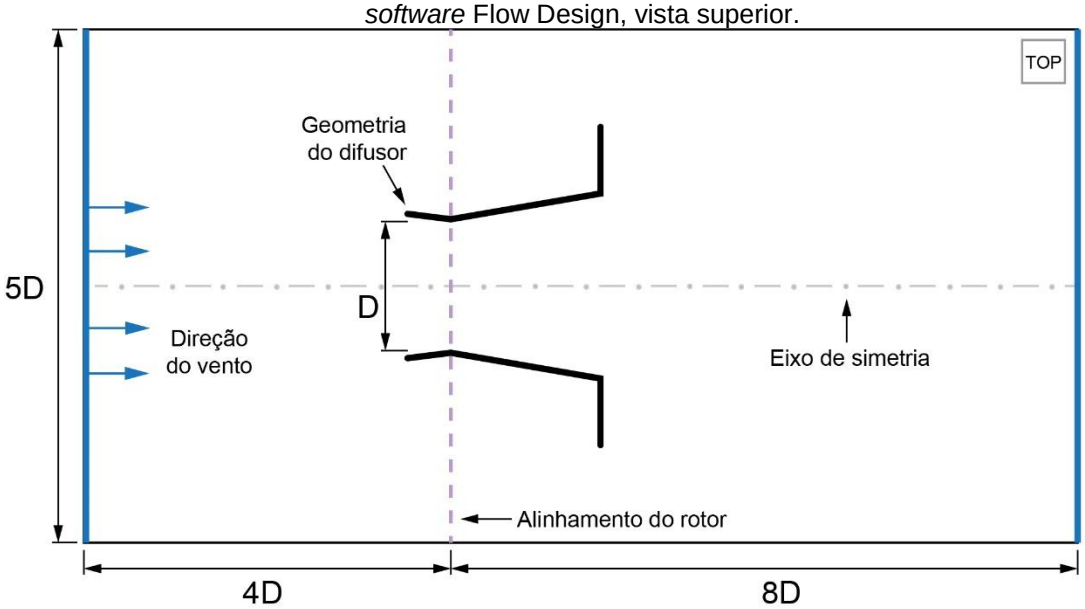
(i) resolução da malha: as simulações realizadas foram para obter dados de Pressão (Pa) com a configuração de tamanho de malha (resolução) máxima que é disponível pelo *software* (400);

(ii) velocidade do vento: a velocidade utilizada para as simulações foi de 4m/s (14,4 km/h);

(iii) dimensões da seção de testes: o comprimento do túnel de vento virtual tem 12 vezes a distância D, distância entre os dois lados do difusor na garganta, em que o comprimento de entrada é referente a 4 vezes D, e o de saída, 8 vezes D. A largura e a altura possuem 5 vezes D. A Figura 27 apresenta um esquema visual da configuração da seção de testes do túnel de vento virtual no *software* Flow Design.

(iv) dados para análise: os dados foram coletados por meio de uma captura de tela (*print screen*) da simulação após cinco minutos do seu início.

Figura 27 - Esquema visual da configuração 2D da seção de testes do túnel de vento virtual no *software* Flow Design, vista superior.

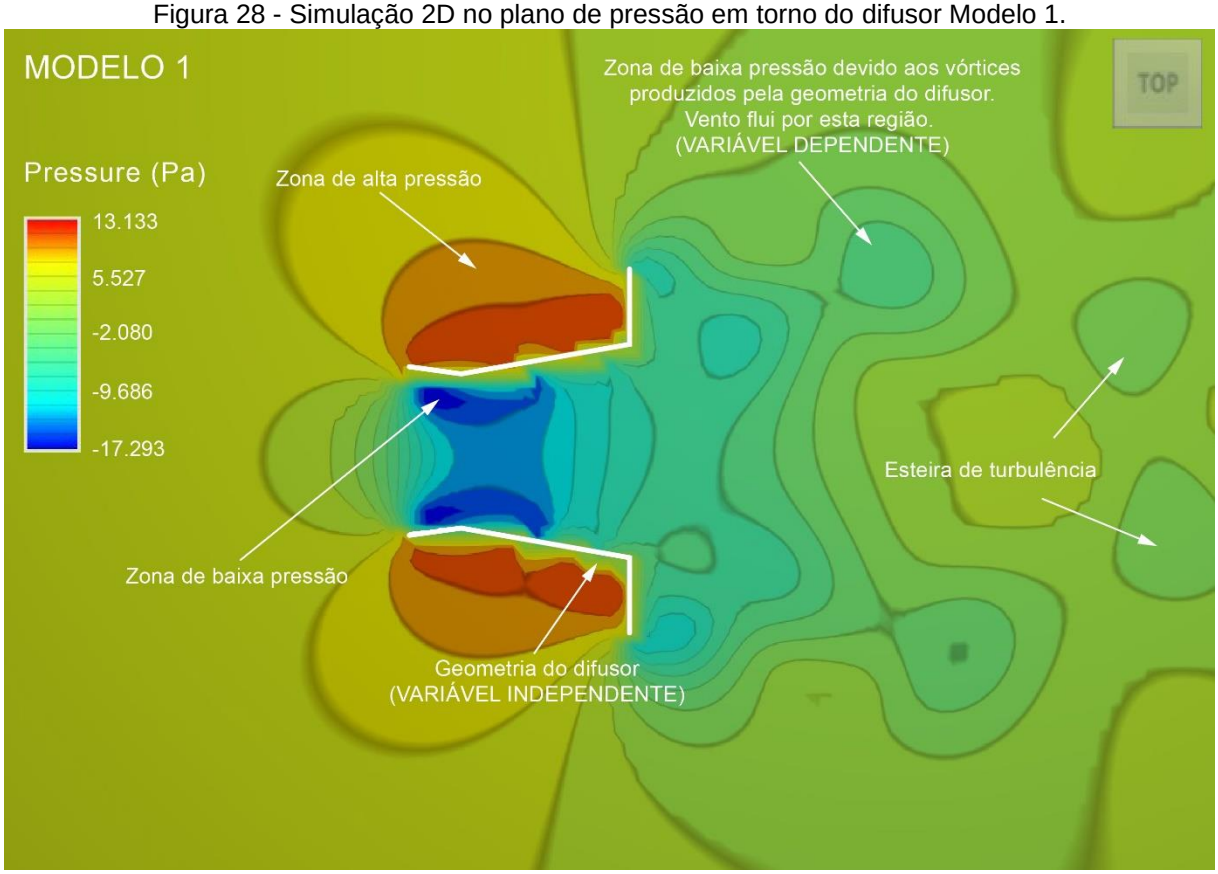


Fonte: Elaborado pela autora (2019).

O difusor de tipo plano com forma Venturi concebido por Watanabe *et al*. (2016), denominado como Modelo 1 neste estudo, foi submetido à simulação no túnel de vento virtual fornecendo dados para que as outras geometrias pudessem ser comparadas. A simulação se deu no plano bidimensional de pressão, pois, assim, a distribuição da pressão ao longo do fluxo ficaria mais clara, sendo possível perceber de forma visual onde o vento invade o modelo (alta pressão) e onde ele acelera (baixa pressão). Para as simulações o plano foi posicionado na parte central do difusor, as configurações com o plano posicionado na base e no topo do difusor pode ser vista no apêndice F. Por meio dessas informações, foi realizada uma seleção das

geometrias elaboradas para esta pesquisa, que atendiam os critérios para as próximas etapas. Os critétios para essa seleção eram apresentar um resultado similar ou superior ao difusor de referência, Modelo 1, na simulação bidimensional de pressão no *software* Flow Design. A Figura 28 apresenta a simulação bidimensional (2D) no plano de pressão realizada no túnel de vento virtual no difusor de referência, Modelo 1, assim como os principais elementos analisados na simulação.

Figura 28 - Simulação 2D no plano de pressão em torno do difusor Modelo 1.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Analisando a simulação realizada no Modelo 1, é possível notar que ele apresentou no plano de saída do difusor uma zona de vórtices de baixa pressão com intensidade de -9.686 Pa, não alcançando o pico máximo de baixa pressão exibido na escala cromática da legenda.

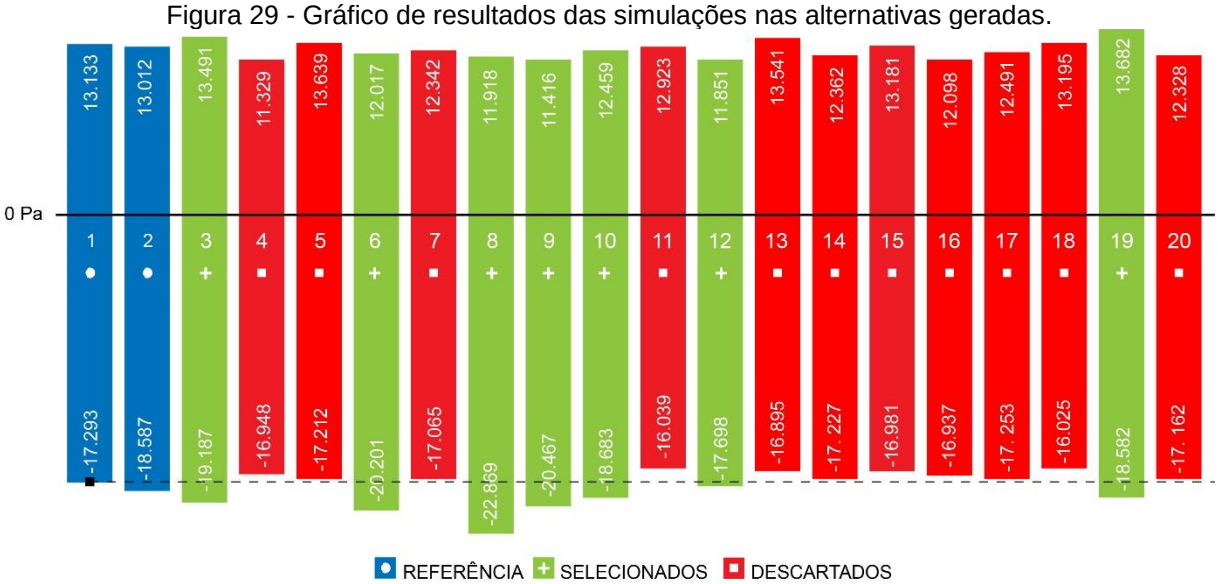
Verificando a parte interna do difusor, no plano de entrada, é possível perceber uma elevada zona de baixa pressão, atingindo o pico máximo de baixa pressão exposto na escala cromática. Essa zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor tem relação indireta com as zonas de vórtices no plano de saída, uma vez que

ela acelera inicialmente o escoamento de ar que é posteriormente multiplicado pela baixa pressão da zona de vórtices.

Observando a parte externa do difusor, no plano de entrada, percebe-se uma zona de alta pressão, ocasionada principalmente pelo flange (aba) na saída do difusor. Ele é responsável pela grande separação do fluxo que produz os vórtices de baixa pressão.

Com os parâmetros de análise do Modelo 1 estabelecidos, simularam-se as 18 alternativas de geometrias concebidas na ideação e o Modelo 2, difusor do tipo plano com forma Venturi também desenvolvido por Watanabe *et al.* (2016). Dos modelos de geometria elaborados para este estudo, sete alcançaram resultado superior ou igual ao modelo de referência, Modelo 1, e onze alternativas apresentaram resultados inferiores aos obtidos pelo modelo referência e foram descartados para as próximas etapas. O Modelo 2 apresentou resultados semelhantes ao Modelo 1 nas simulações no túnel de vento virtual, por esse motivo, também será considerado nas próximas etapas. A Figura 29 mostra um gráfico com os resultados das 18 alternativas que foram submetidas às simulações no túnel de vento virtual do *software* Flow Design e apresenta os resultados de pressão obtidos.

Figura 29 - Gráfico de resultados das simulações nas alternativas geradas.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Foram selecionados os seguintes modelos de difusor:

1) Modelo 3 – Difusor plano de ângulo semiaberto variante 1.

2) Modelo 6 – Difusor curvo de ângulo semiaberto variante 1.

3) Modelo 8 – Difusor curvo de ângulo semiaberto variante 3.

4) Modelo 9 – Difusor curvo de ângulo semiaberto variente 4.

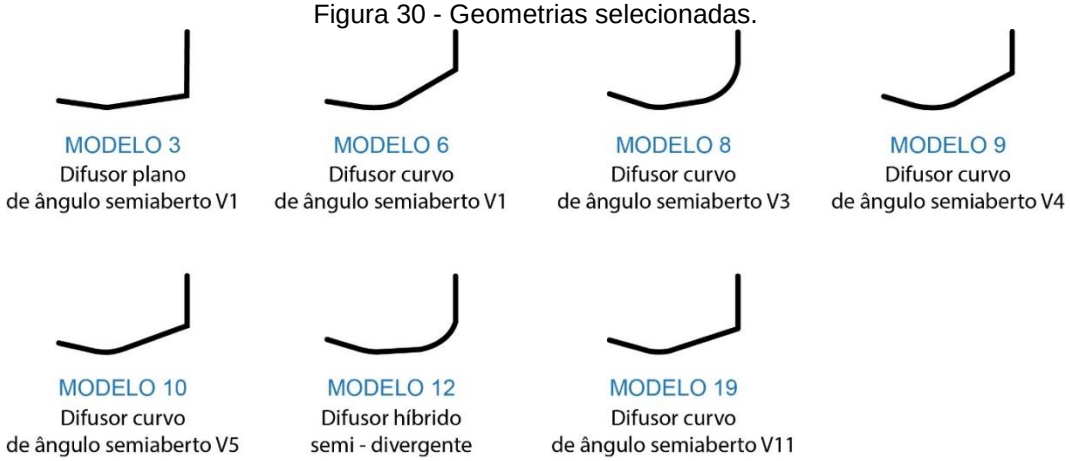
5) Modelo 10 – Difusor curvo de ângulo semiaberto variante 5.

6) Modelo 12 – Difusor híbrido semi- divergente.

7) Modelo 19 – Difusor curvo de ângulo semiaberto variante 11.

A Figura 30 mostra as geometrias selecionadas após a etapa de simulação no *software* de túnel de vento virtual Flow Design.

Figura 30 - Geometrias selecionadas.



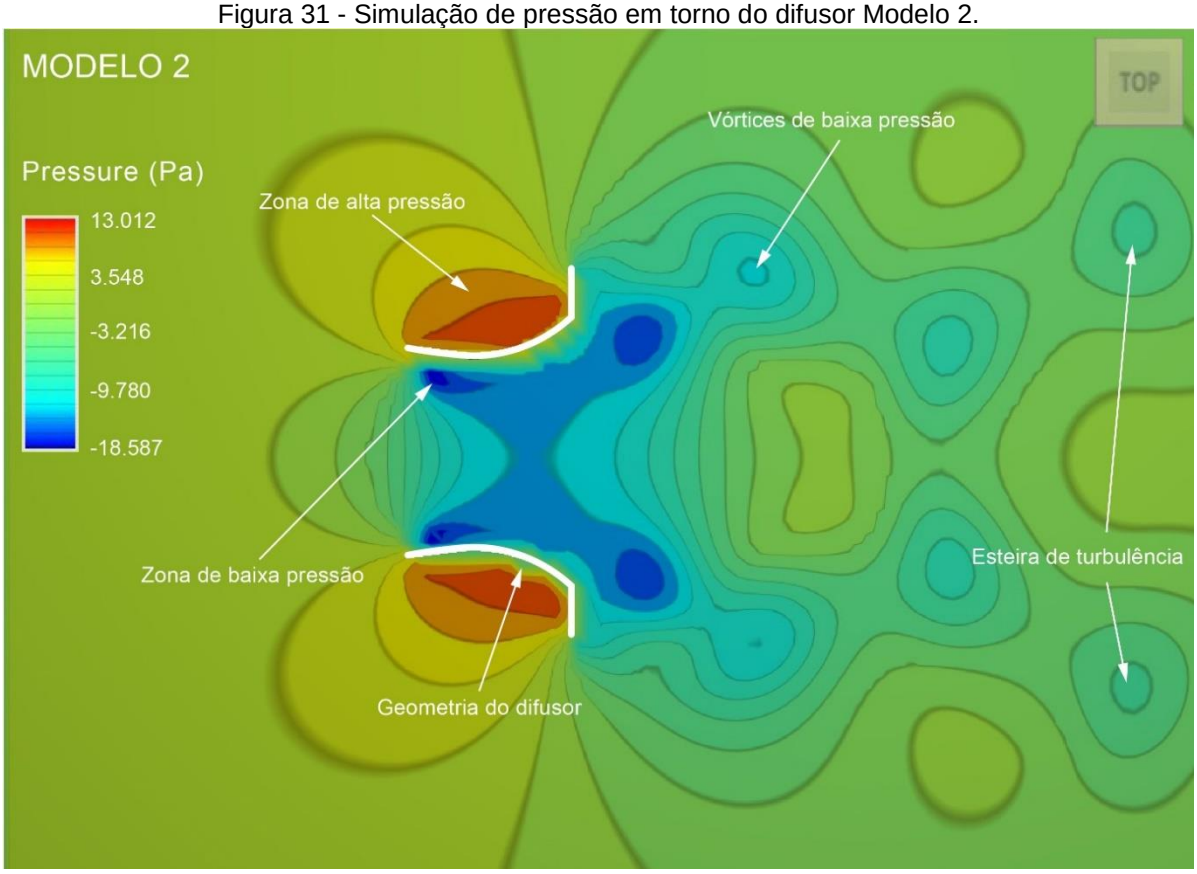
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Na próxima seção, estarão expostos os resultados e as análises das simulações em túnel de vento virtual. Os resultados que serão apresentados foram comparados com os resultados obtidos nas simulações das geometrias do difusor Modelo 1, apresentados nesta seção.

4.10 RESULTADOS E ANÁLISES DAS SIMULAÇÕES

Os resultados de pressão mostrados pelo *software* de simulação de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design estão apresentados nas Figuras 31 a 38, sendo a figura 31 o difusor de tipo curvo de forma Venturi concebido por Watanabe *et al.* (2016), Modelo 2. A simulação do Modelo 1 (figura 28) será utilizada como referência para comparar as 8 geometrias selecionas, e também, o Modelo 2.

Figura 31 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 2.

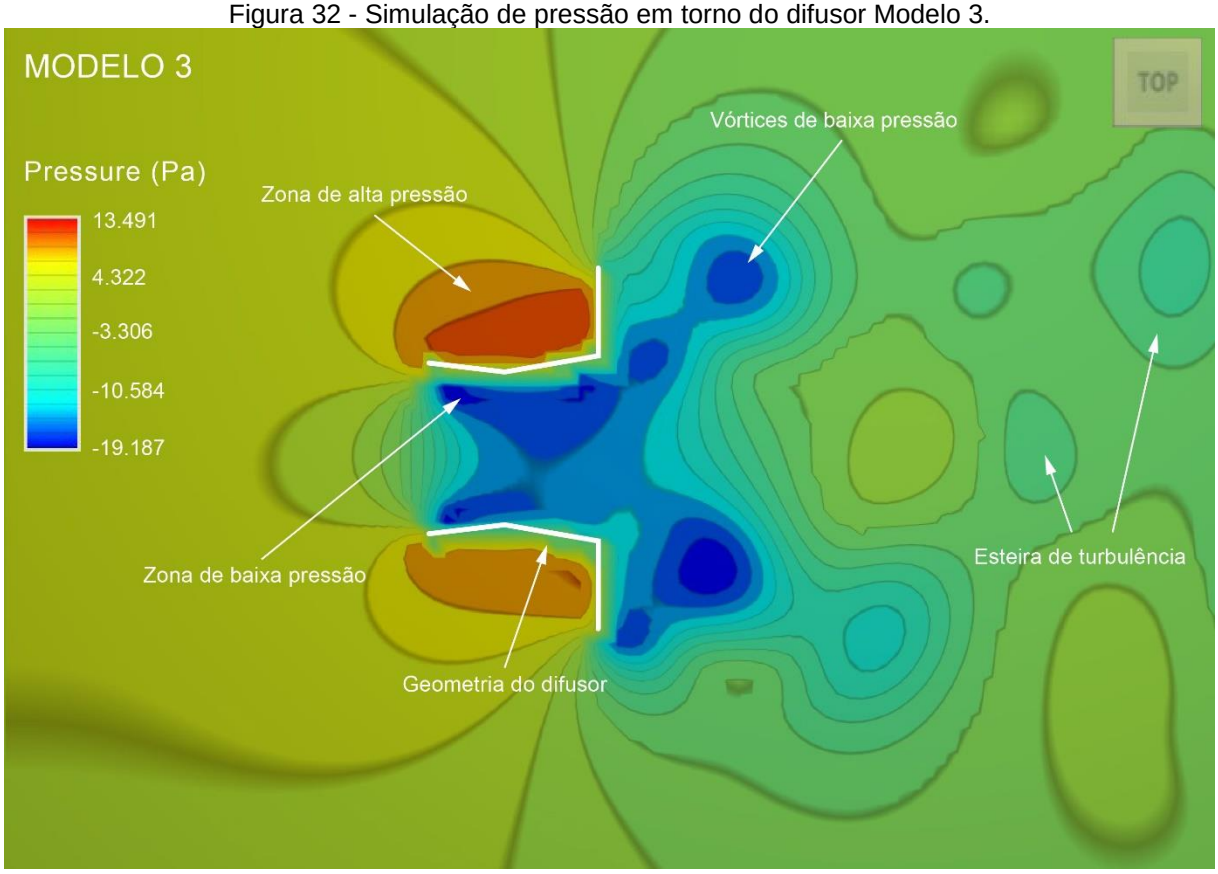


Fonte: Elaborado pela autora (2019).

O Modelo 2 (Figura 31) é um difusor do tipo curvo com forma Venturi, ele também foi concebido por Watanabe *et al.* (2016) e foi simulado para que o modelo de tipo curvo também pudesse ser comparado ao Modelo 1, de tipo plano.

Comparando as escalas cromáticas e os seus respectivos valores, o Modelo 2 apresentou na simulação uma pressão negativa 7,48% maior no valor máximo de baixa pressão. A região de vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor do Modelo 2 teve uma intensidade semelhante ao Modelo 1, apenas 0,97% superior.

Figura 32 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 3.

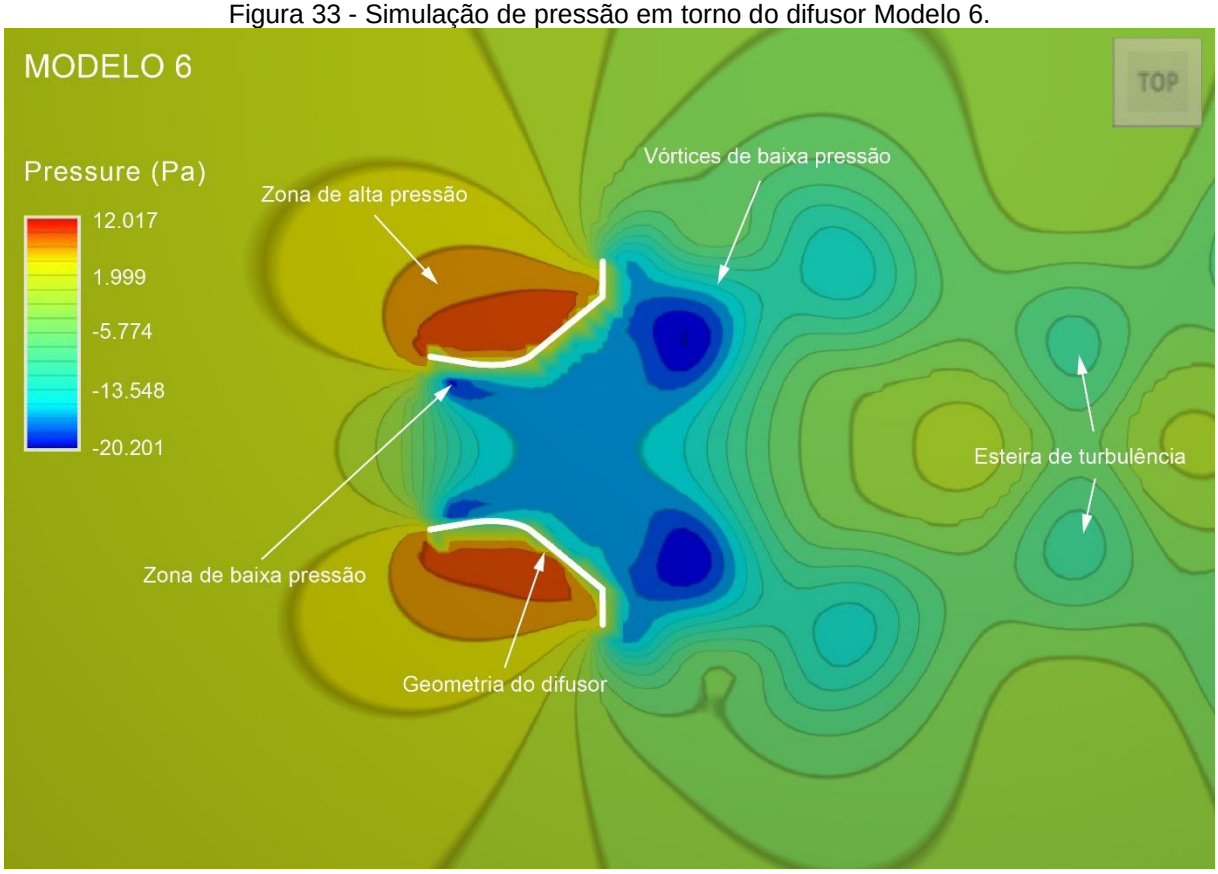


Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria de difusor Modelo 3 (Figura 32) é de tipo plano e possui os mesmos ângulos de entrada e de saída do Modelo 1, o que as diferencia é o seu comprimento, pois o Modelo 3 está adequado às proporções da área construtiva definidas para a elaboração das geometrias deste estudo, baseada na teoria da Razão Áurea.

A simulação realizada nesta geometria apresentou, na zona de alta pressão, resultados similares aos encontrados no Modelo 1, com um ligeiro aumento de 2,73%. Comparando as escalas cromáticas e os seus respectivos valores numéricos, é possível perceber que a geometria Modelo 3 causou um aumento de 10,95% no valor máximo de baixa pressão. Nos vórtices no plano de saída do difusor houve um aumento de intensidade, ficando a zona de baixa pressão 9,27% mais intensa do que a encontrada no Modelo 1.

Figura 33 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 6.

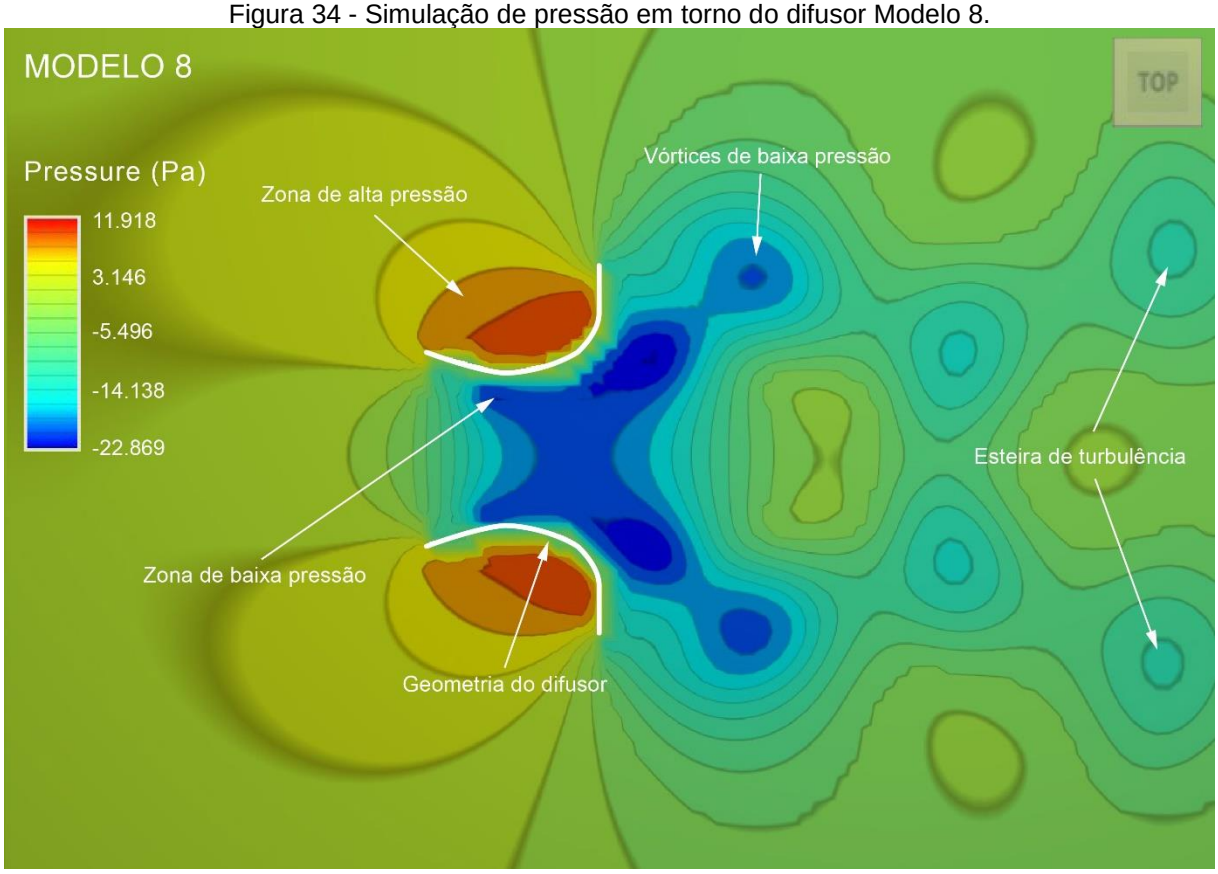


Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria do Modelo 6 (Figura 33) é do tipo curvo com ângulo semiaberto na seção divergente (plano de saída), diferencia-se por possuir um grande ângulo e flanges curtas.

A simulação no Modelo 6 apresentou na zona de alta pressão uma intensidade de 8,50% menor em relação ao Modelo 1. A zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor é visualmente similar à encontrada no Modelo 1, mas sua intensidade é 16,82% maior em relação ao valor máximo de baixa pressão. Na zona de vórtices no plano de saída do difusor, os resultados do Modelo 6 mostram que a zona de baixa pressão foi 39,87% mais intensa em relação ao Modelo 1. Partindo da premissa que a intensidade da zona de baixa pressão na região de vórtices no plano de saída do difusor é responsável pelo efeito aerodinâmico de aceleração do escoamento de ar, essa geometria apresenta características promissoras para o estudo.

Figura 34 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 8.



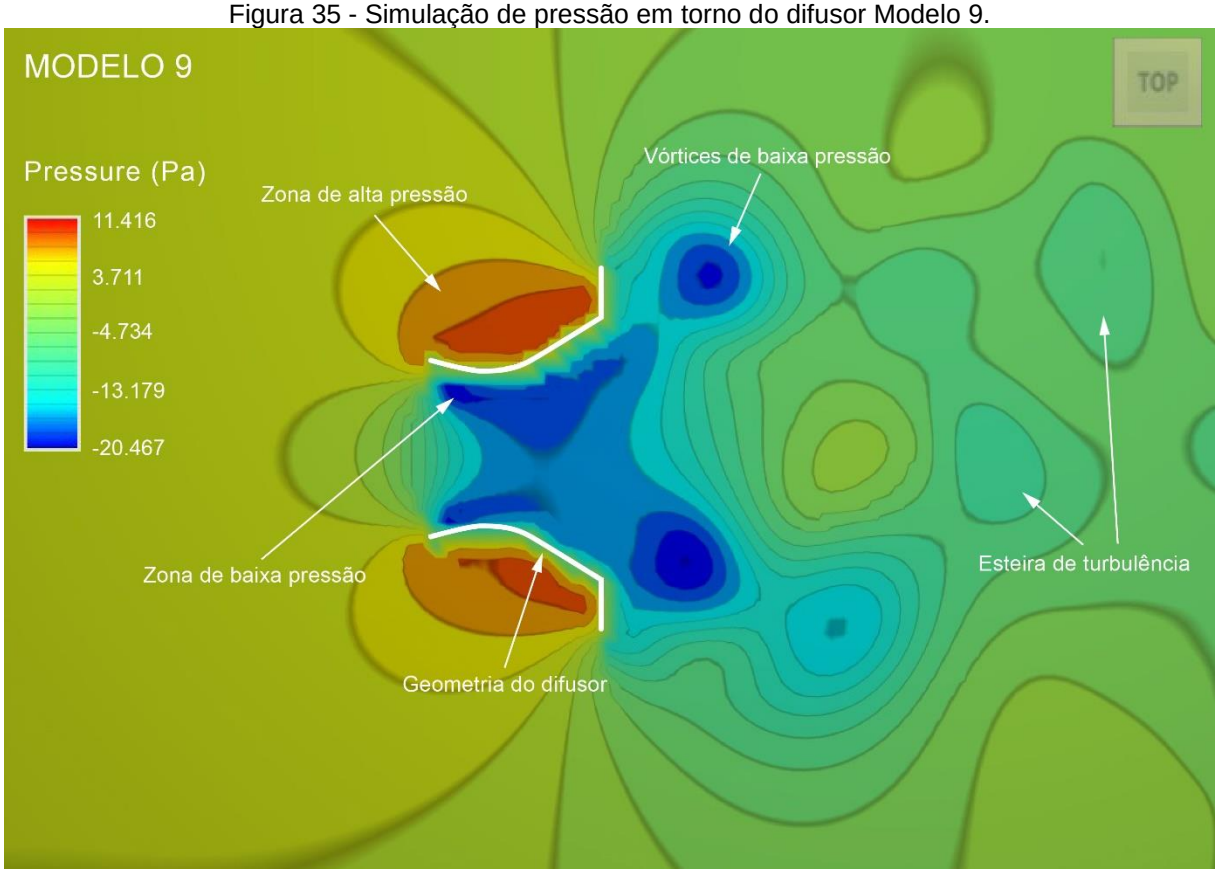
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria do Modelo 8 (Figura 34) é do tipo curvo com ângulo semiaberto na seção divergente (plano de saída), e ângulo convergente (plano de entrada).

A simulação no Modelo 8 apresentou, visualmente, na zona de vórtices de baixa pressão uma área mais intensa do que a encontrada no Modelo 1 e nos demais modelos. Essa característica deve-se ao raio das curvaturas de entrada e saída na geometria do difusor. Comparando as escalas cromáticas e os seus valores numéricos, é possível notar que a zona de baixa pressão máxima foi de 32,24% mais intensa em relação ao Modelo 1.

Observando a parte externa do difusor, percebe-se uma zona de alta pressão, bem concentrada na curva do ângulo semiaberto na seção divergente (plano de saída), ocasionada principalmente pelo flange (aba) na saída do difusor e pelo raio da curva. A zona de alta pressão do Modelo 8 apresentou uma intensidade 9,25% menor em relação ao Modelo 1.

Figura 35 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 9.

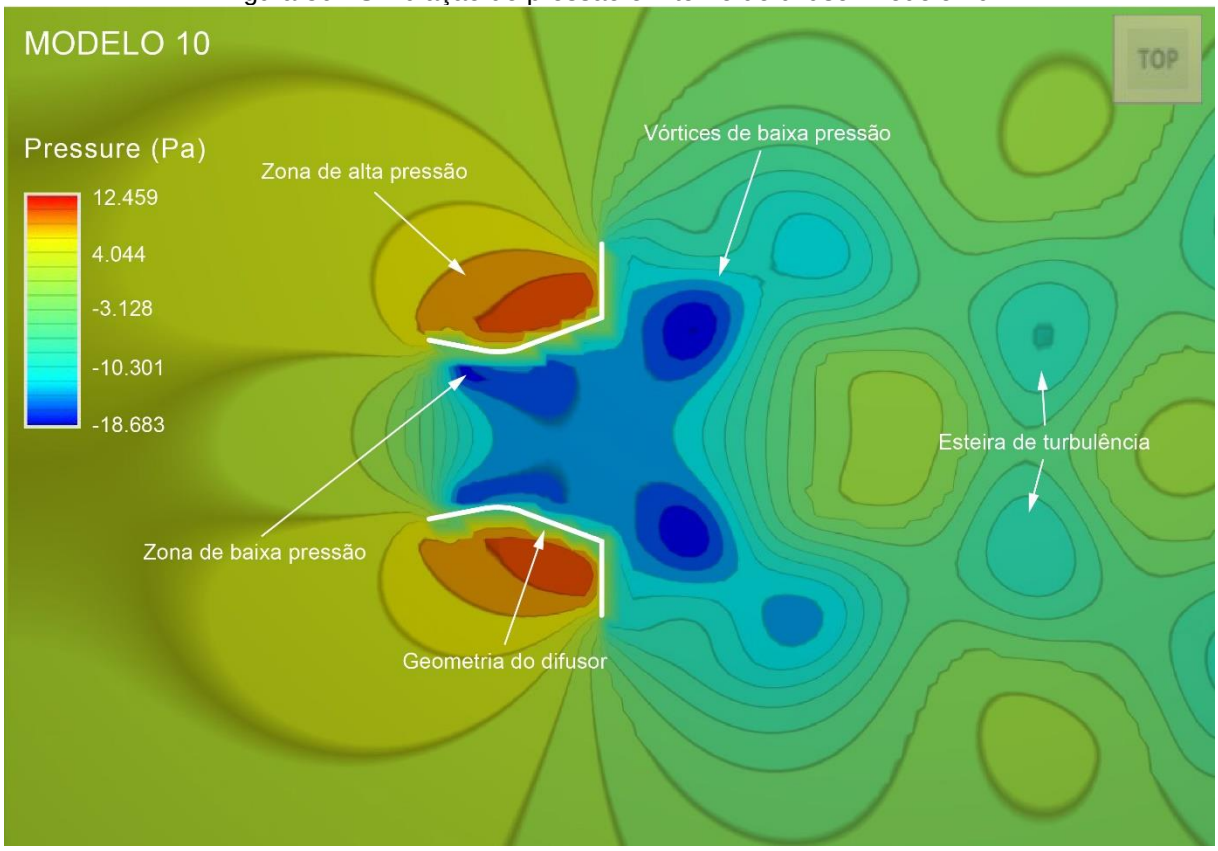


Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria do Modelo 9 (Figura 35) é do tipo curvo com ângulo semiaberto na seção divergente (plano de saída), e ângulo convergente (plano de entrada) com flange curta.

Na simulação realizada no Modelo 9, observou-se na zona de vórtices de baixa pressão, no plano de saída do difusor, uma área de baixa pressão mais intensa daquela encontrada no Modelo 1. A zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor é visualmente mais intensa do que a do Modelo 1, com intensidade de 18,35% maior em relação ao valor máximo de baixa pressão. Na parte externa do difusor, a geometria apresentou, na zona de alta pressão, uma redução de 13,07% em relação ao Modelo 1.

Figura 36 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 10.



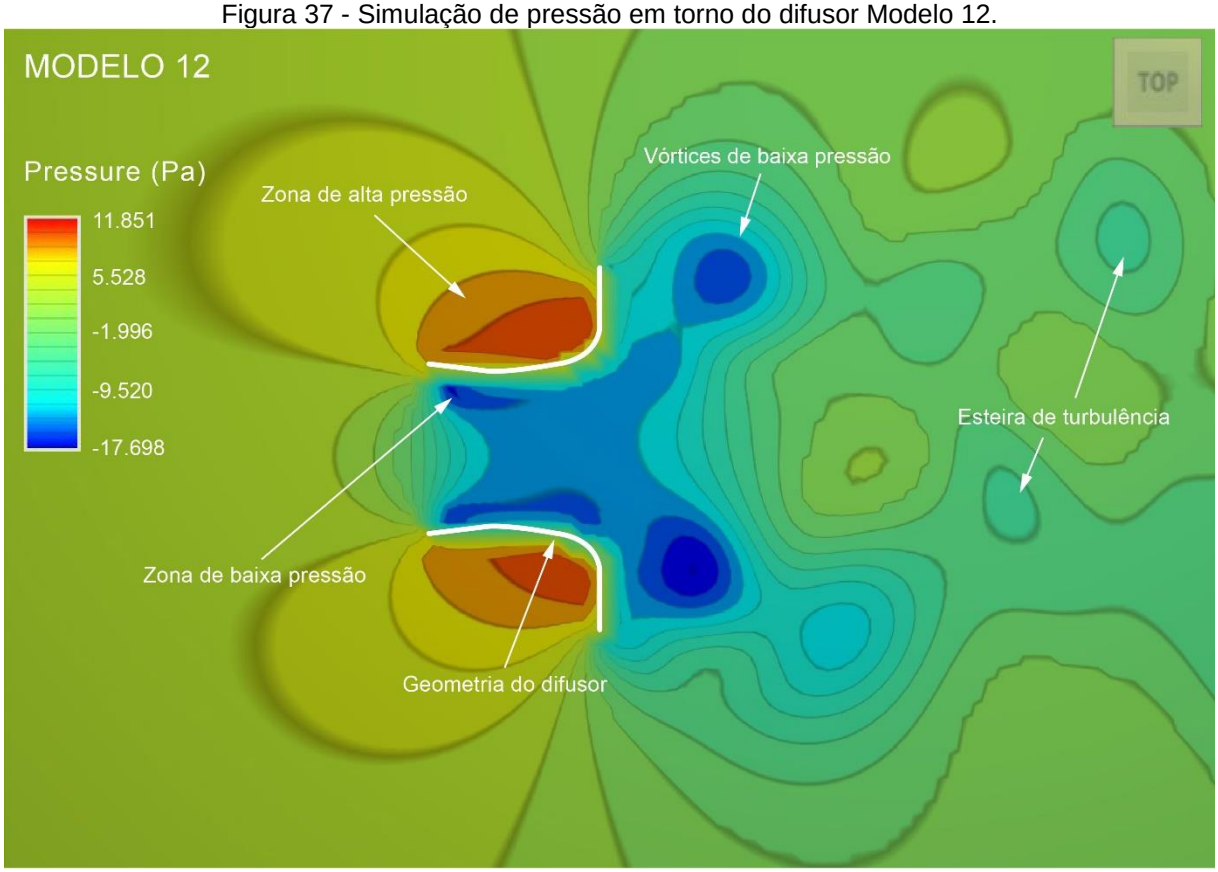
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria do Modelo 10 (Figura 36) é do tipo curvo com ângulo semiaberto na seção divergente (plano de saída), e ângulo convergente (plano de entrada), difere-se do modelo 9 pelos ângulos de entrada e de saída e sua flange mais longa.

A simulação realizada no Modelo 10 apresentou, visualmente, resultados similares ao Modelo 9, com zonas de alta e baixa pressão parecidas, com diferenças apenas nos valores numéricos. Em relação ao Modelo 1, a zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor foi 8,04% mais intensa. A zona de vórtices apresentou intensidade 6,35% maior que a encontrada no Modelo 1.

Quanto à zona de alta pressão na parte externa do difusor, a geometria do Modelo 10 teve uma redução de 5,13% em relação ao Modelo 1, no seu valor de alta pressão máxima.

Figura 37 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 12.



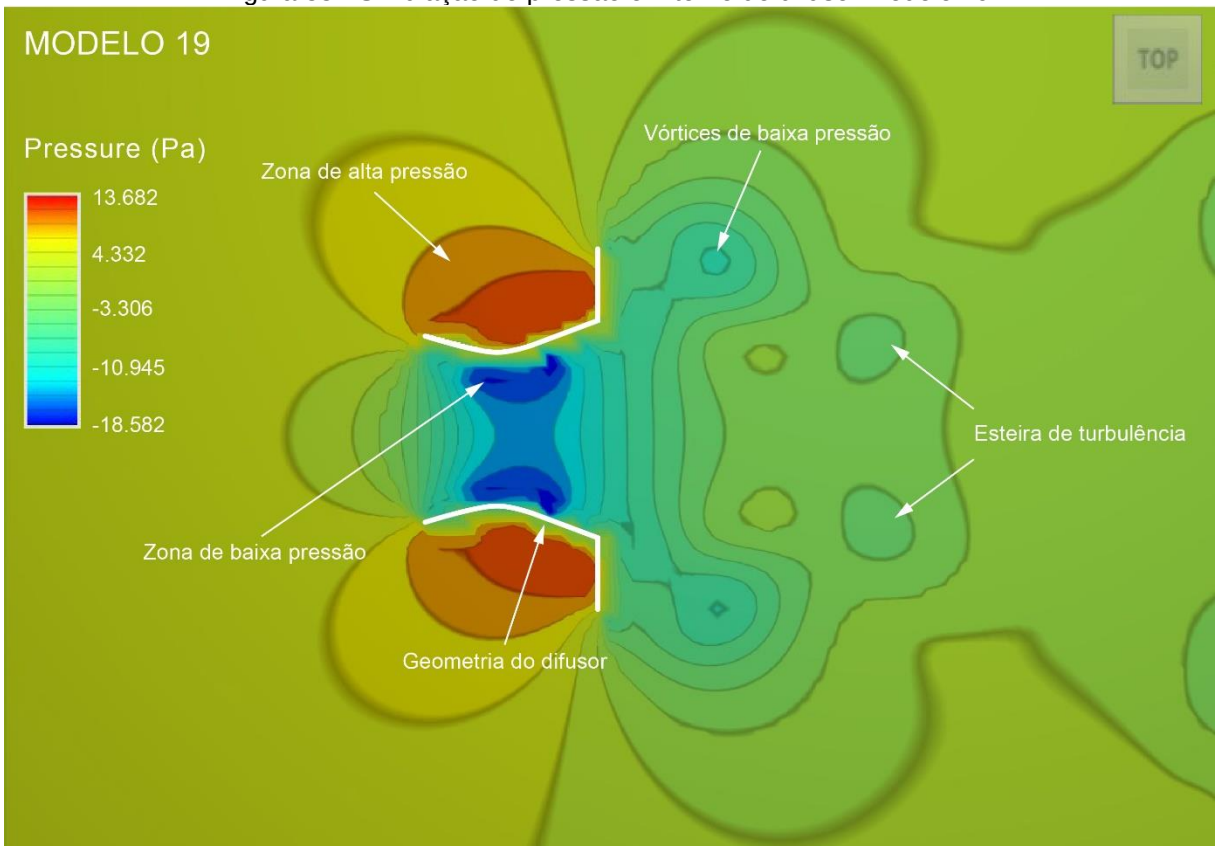
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria do Modelo 12 (Figura 37) é do tipo híbrida semi-divergente, caracterizada por não possuir um elemento predominante que caracterize a sua geometria.

A simulação no Modelo 12 apresentou, na zona de vórtices de baixa pressão, no plano de saída do difusor, uma área menos intensa do que a encontrada no Modelo 1, com uma redução na intensidade de 1,71%. Das geometrias selecionadas, foi a única que apresentou uma redução na zona de vórtices comparada ao Modelo 1. Esse fator explica-se pelo tipo de geometria do difusor.

Comparando as escalas cromáticas e os seus valores numéricos, é possível notar que a zona de baixa pressão máxima foi de 2,34% mais intensa em relação ao Modelo 1. Observando a parte externa do difusor, percebe-se que a zona de alta pressão do Modelo 12 apresentou uma intensidade 9,76% menor em relação ao Modelo 1.

Figura 38 - Simulação de pressão em torno do difusor Modelo 19.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A geometria do Modelo 19 (Figura 38) é do tipo curvo com ângulo semiaberto na seção divergente (plano de saída), e ângulo convergente (plano de entrada), difere-se do modelo 10 pelos ângulos de entrada e de saída e o raio da curva na garganta do difusor.

Na simulação realizada no Modelo 19, observou-se, na zona de vórtices de baixa pressão, no plano de saída do difusor, uma área de baixa pressão bastante similar à encontrada no Modelo 1, assim acontece também com a zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor, com diferenças apenas nos valores numéricos. Em relação ao Modelo 1, a zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor foi 7,44% mais intensa. Na zona de vórtices, apresentou-se intensidade 13% superior à encontrada no Modelo 1. Na parte externa do difusor, a geometria apresentou, na zona de alta pressão, um aumento de 4,18% em relação ao Modelo 1.

Os comparativos de pressão dos difusores simulados em relação ao Modelo 1 estão apresentados na Tabela 5. A Tabela foi dividida em seis colunas, em que a primeira corresponde à identificação do difusor e as demais apresentam os valores de pressão exibidos pela simulação, em que a segunda e a terceira coluna são referentes

aos valores relativos à alta pressão, representados na simulação pelas áreas coloridas em vermelho, laranja e amarelo. A quarta coluna corresponde à pressão regular (média geral) apresentada pelas simulações, correspondente às tonalidades entre o verde-amarelo ao verde-azul. As duas últimas colunas são referentes às áreas de baixa pressão e estão representadas na simulação pelas cores verde-azul ao azul-escuro.

Tabela 5 - Comparativos de pressão em Pascal (Pa).

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
Modelo 1	**13.133 Pa**	**5.527 Pa**	**-2.080 Pa**	**-9.686 Pa**	**-17.293 Pa**
Modelo 2	13.012	3.548	-3.216	-9.780	-18.587
Modelo 3	13.491	4.322	-3.306	-10.584	-19.187
Modelo 6	12.017	1.999	-5.774	-13.548	-20.201
Modelo 8	11.918	3.146	-5.496	-14.138	-22.869
Modelo 9	11.416	3.711	-4.734	-13.179	-20.467
Modelo 10	12.459	4.044	-3.128	-10.301	-18.683
Modelo 12	11.851	5.528	-1.996	-9.520	-17.698
Modelo 19	13.682	4.332	-3.306	-10.945	-18.582

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 6 apresenta a variação percentual de pressão dos difusores simulados em relação ao Modelo 1. Os valores estão expostos conforme os dados na tabela 5.

Tabela 6 - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 1.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
Modelo 1	**13.133 Pa**	**5.527 Pa**	**-2.080 Pa**	**-9.686 Pa**	**-17.293 Pa**
Modelo 2	-0.91%	-35.80%	54.62%	0.97%	7.48%
Modelo 3	2.73%	-21.80%	58.94%	9.27%	10.95%
Modelo 6	-8,50%	-63.83%	177.70%	39.87%	16.82%
Modelo 8	-9.25%	-43.08%	164.23%	45.96%	32.24%
Modelo 9	-13.07%	-32.86%	127.60%	36.05%	18.35%
Modelo 10	-5.13%	-26.83%	50.38%	6.35%	8.04%
Modelo 12	-9.76%	0.02%	-4.04%	-1.71%	2.34%
Modelo 19	4.18%	-21.62%	58.94%	13.00%	7.44%

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Com base nos resultados obtidos nas simulações realizadas nas geometrias selecionadas, foi possível perceber que as alterações na geometria do difusor produzem comportamentos bastante distintos no escoamento de ar. Comparados com o Modelo 1, elaborado por Watanabe *et al.* (2016), os difusores selecionados apresentaram, na sua maioria, resultados superiores, nos quais é possível destacar os Modelos 6, 8 e 9 que tiveram zonas de baixa pressão com os menores valores, assim como uma intensidade diferenciada na zona de vórtices no plano de saída do difusor.

4.11 TURBINA EÓLICA DE MICROESCALA

Para que as simulações e análises pudessem ser realizadas nesta pesquisa, foram projetadas turbinas eólicas de microescala para os ensaios no dispositivo WT e túnel de vento, foram duas, uma com rotor de duas pás e outra com rotor de três pás. Essas turbinas tinham como requisitos:

(i) serem projetadas e adaptadas para uso com os difusores referência desenvolvidos;

(ii) servirem como turbina eólica de microescala padrão (sem difusor) como referência para comparação de dados;

(iii) possuírem dimensões compatíveis com a seção de testes do túnel de vento do Laboratório de Design e Seleção de Materiais - LdSM/UFRGS.

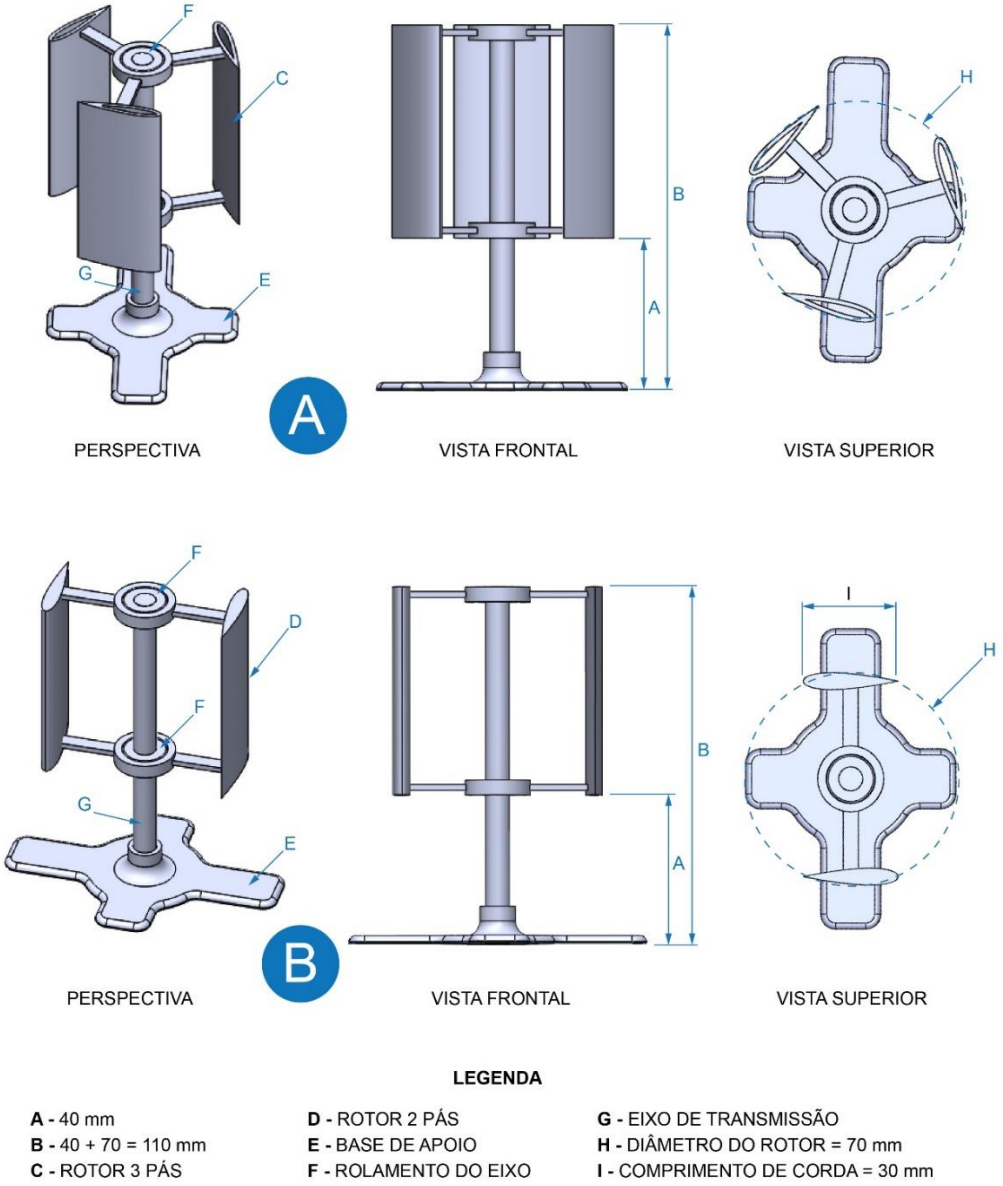
As duas turbinas projetadas possuem a mesma concepção de construção, alterando apenas o seu rotor com o número de pás. Elas são compostas por 4 componentes: (i) rotor padrão, que é a soma dos perfis NACA com a estrutura do rotor (de duas ou três pás), (ii) rolamentos de transmissão, (iii) eixo de transmissão e (iv) base de apoio.

O perfil NACA utilizado nas turbinas eólicas é o NACA 0024 com comprimento de corda de 30mm. O comprimento de corda do perfil NACA 0024 está exposto na Figura 38, denominado com a letra (I).

Os componentes das turbinas são de materiais distintos; para a sua manufatura foram utilizados: (i) prototipagem rápida via impressão 3D por FDM para os rotores e a base de apoio, (ii) usinagem por torneamento mecânico para o eixo de transmissão e (iii) peças pré-fabricadas ou adquiridas prontas, como os rolamentos do eixo. A

turbina eólica de eixo vertical com rotor de duas pás (A) e a turbina eólica de eixo vertical com rotor de três pás (B) podem ser visualizadas na Figura 39.

Figura 39 - Turbinas eólicas.



(A) Turbina eólica de eixo vertical com rotor de duas pás e (B) turbina eólica de eixo vertical com rotor de três pás.
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

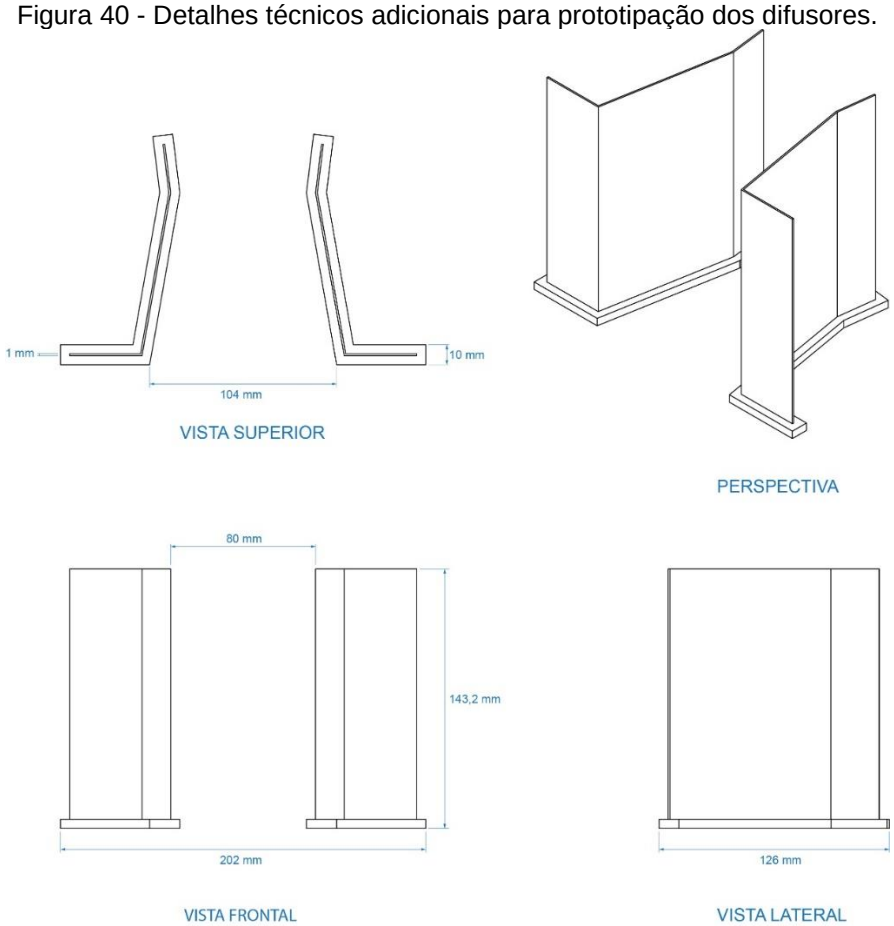
Na seção 4.14 serão apresentadas as simulações realizadas nas turbinas com rotor de duas e três pás, assim como os resultados atingidos por elas, para a tomada de decisão e definição do rotor mais adequado para este estudo.

4.12 PROTOTIPAGEM 3D

As geometrias simuladas e selecionadas na etapa dos ensaios no túnel de vento virtual com o *software* da Autodesk Flow Design foram preparadas para serem prototipadas, com o intuito de serem submetidas às simulações no dispositivo WT e túnel de vento. Para a sua construção, foi utilizada como tecnologia de prototipagem rápida a impressão tridimensional (3D) por FFF (*fused filament fabrication* - fabricação por filamento fundido). Ao se tratar de prototipagem rápida, esse é o processo mais comum, sua impressão é feita por camadas que utilizam materiais termoplásticos, como ABS, poliamida e PLA, para manufaturar os objetos.

As geometrias dos difusores possuem uma espessura de 1mm, para dar estabilidade na impressão tridimensional, e ao serem submetidos aos ensaios, foi adicionada uma base de 10mm com altura de 5mm que não influencia nos resultados das simulações. A Figura 40 mostra um esquema simplificado dos detalhes adicionais realizados para a prototipação dos difusores.

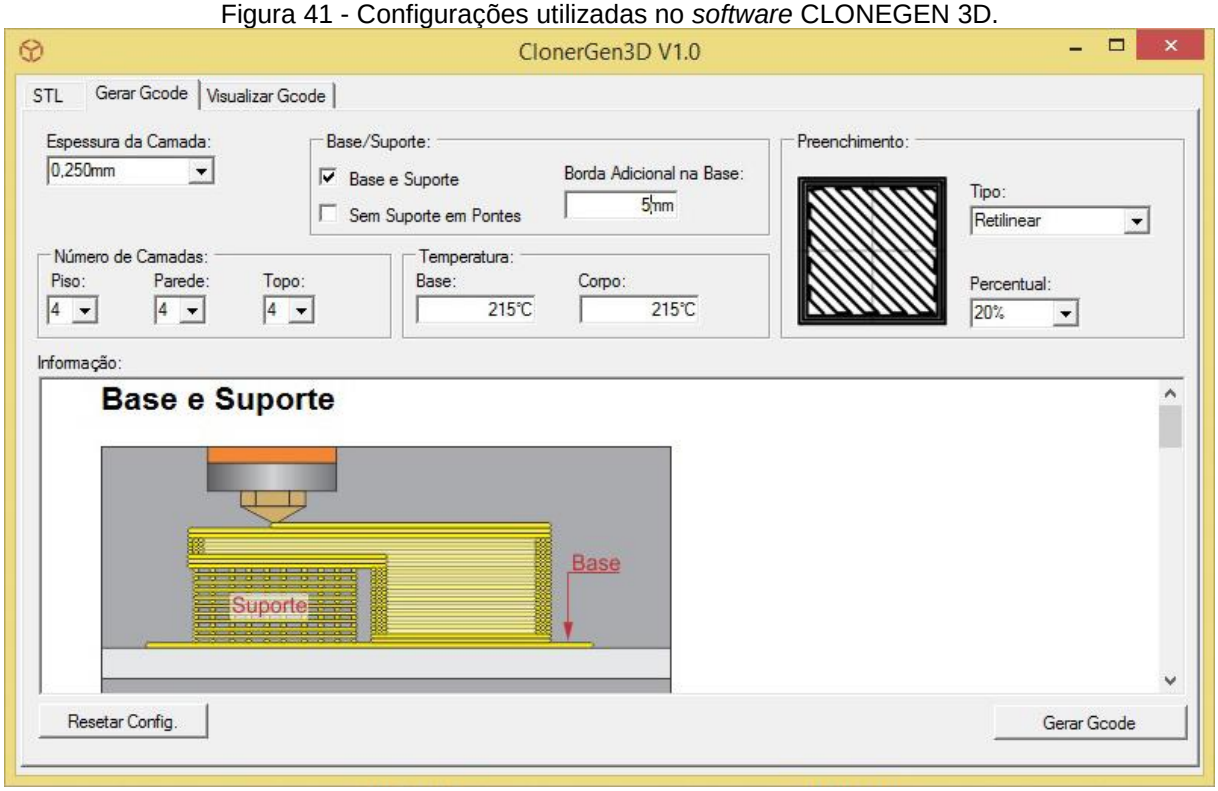
Figura 40 - Detalhes técnicos adicionais para prototipação dos difusores.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Os difusores foram prototipados na Oficina de Modelos, protótipos e Maquetes da Faculdade de Arquitetura da UFRGS (FA/UFRGS), lá se encontram duas impressoras 3D do tipo FFF (*fused filament fabrication* - fabricação por filamento fundido) da marca 3DCloner. A configuração da impressão foi efetuada por meio do *software* CLONEGEN 3D, disponibilizado pela fabricante da impressora 3DCloner. Partindo de um arquivo no formato STL, esse software possibilita gerar o código utilizado para carregar e enviar os G-CODES[4] para a impressora 3D. A Figura 41 mostra as configurações utilizadas no *software* CLONEGEN 3D para a impressão 3D dos difusores.

Figura 41 - Configurações utilizadas no *software* CLONEGEN 3D.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

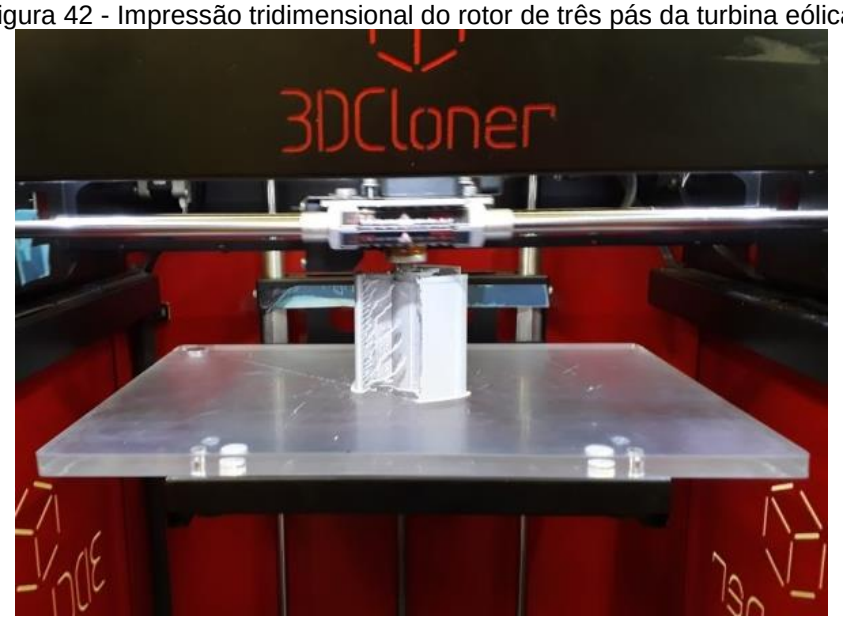
A matéria prima utilizada para a impressão 3D dos difusores foi o filamento de PLA[5] (ácido poliláctico) de 1,75 mm de diâmetro. Foram impressos, também, além dos difusores, os rotores da turbina eólica, de duas e três pás, e a base de apoio da turbina,

[4] O G-Code é o nome dado à linguagem de programação criada a partir da necessidade de maquinários industriais que faziam uso de sistemas Comando Numérico Computadorizado (CNC). Sua principal função é instruir a máquina a se mover geometricamente nas três dimensões, x, y e z.

[5] O PLA (também chamado de PDLA, PLLA), ou melhor dizendo, poliácido láctico, é um polímero sintético termoplástico que vem substituindo os plásticos convencionais em diversas aplicações. No processo de produção do PLA, as bactérias produzem o ácido lático por meio do processo de fermentação de vegetais ricos em amido, como a beterraba, o milho e a mandioca, ou seja, é feito utilizando fontes renováveis.

para os ensaios no dispositivo WT e túnel de vento. Para todas as impressões, foram utilizadas as mesmas configurações, expostas na Figura 41. A Figura 42 mostra a impressão do rotor de três pás da turbina eólica.

Figura 42 - Impressão tridimensional do rotor de três pás da turbina eólica.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Este estudo utilizou impressoras da marca 3DCloner com filamentos à base de PLA para a manufatura dos artefatos 3D utilizados. O uso de impressoras 3D de outros fabricantes e filamentos de outros tipos de materiais, ou até mesmo cores distintas, pode necessitar de configurações diferentes das apresentadas nesta pesquisa.

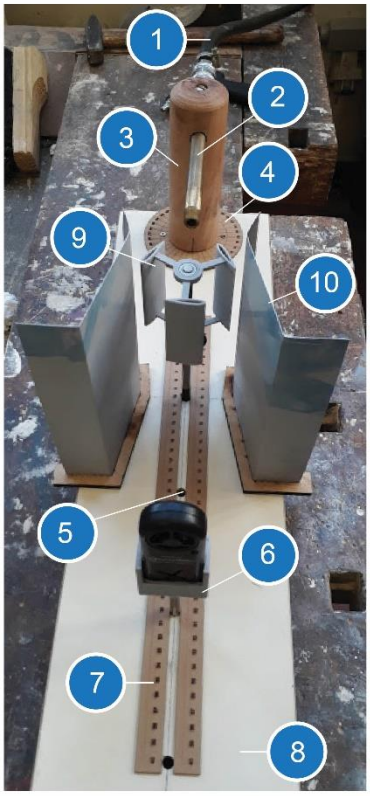
A prototipagem das geometrias dos difusores, assim como a dos componentes que compõem a turbina eólica de microescala, habilitam a próxima etapa da pesquisa, que realizará os ensaios aerodinâmicos no dispositivo WT e em túnel de vento para a avaliação do comportamento dinâmico dos difusores acoplados em uma turbina eólica de eixo vertical.

4.13 DISPOSITIVO WT

Partindo do princípio da pesquisa do qual o objetivo é fazer com que a turbina tenha seu torque com a menor velocidade de vento, constatou-se a necessidade de se elaborar um dispositivo com um propósito semelhante ao túnel de vento, porém aberto. O ar é inserido por meio de um compressor, de forma pontual, em que é

possível observar e estudar o ângulo do escoamento de ar sobre a turbina eólica. O dispositivo denominado de WT foi idealizado, projetado e construído na Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. A Figura 43 mostra o dispositivo WT e seus componentes.

Figura 43 - Dispositivo WT.



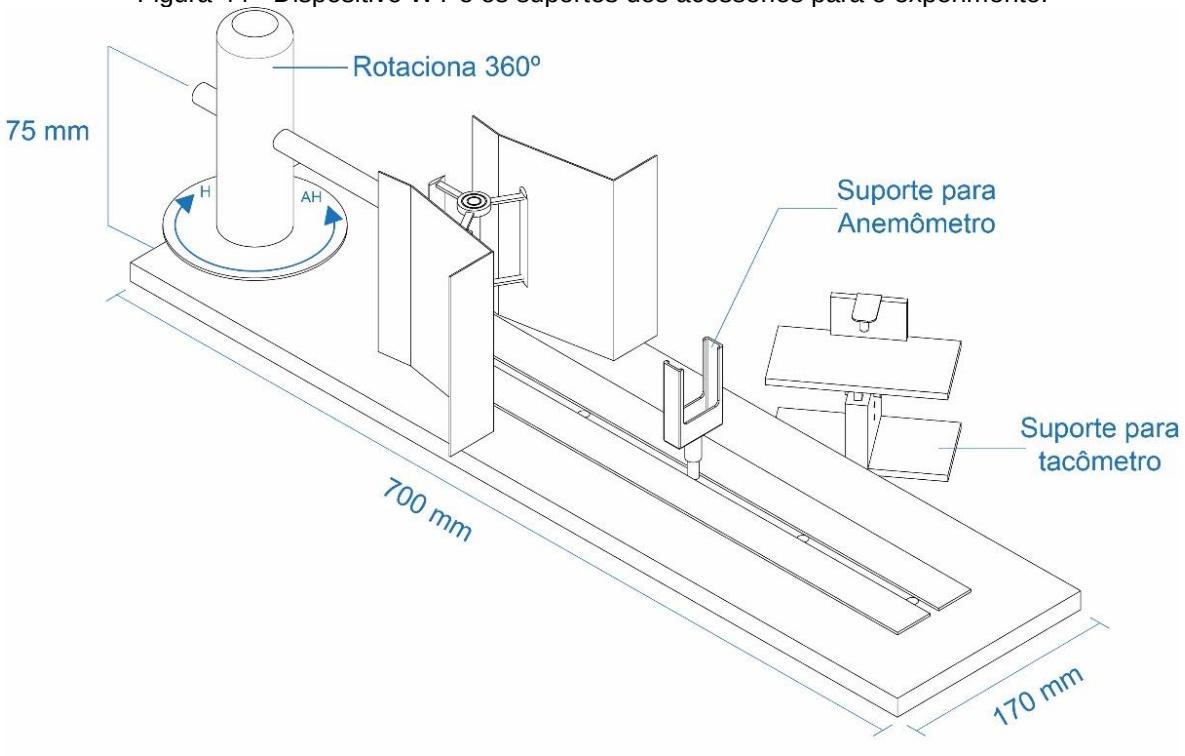
1 FLUXO DE AR DO COMPRESSOR
2 TUBO DIRECIONADOR
3 SUPORTE
4 RÉGUA DE ÂNGULO
5 BASE DE ENCAIXE PARA TURBINA E ANEMÔMETRO
6 SUPORTE PARA ANEMÔMETRO
7 RÉGUA
8 BASE
9 TURBINA EÓLICA
10 DIFUSOR

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Como é possível visualizar na Figura 43, o dispositivo WT é um equipamento aberto cujo princípio de funcionamento se dá através de um equipamento pneumático que capta o ar que está no ambiente, armazena-o sob alta pressão em um reservatório próprio e o transforma em ar comprimido. O ar vem por meio da mangueira (1) que está conectada ao tubo direcionador (2), este, por sua vez, possui regulagem podendo se aproximar ou afastar da turbina eólica que estará sendo ensaiada. O suporte (3) é responsável por sustentar e guiar o tubo direcionador, ele rotaciona 360º (graus) no sentido H – horário e AH – anti-horário sobre a régua de ângulo (4) para que o ângulo possa ser controlado no experimento. Os furos na base (8) são para os encaixes (5) da turbina eólica (9) e suporte do anemômetro (6). O suporte para o anemômetro, assim como os rotores da turbina eólica, também foi manufaturado na impressora 3D.

Os furos estão com uma distância de 10 centímetros entre seus centros, a régua (7) ao entorno dos furos serve para auxiliar no posicionamento do difusor (10). A Figura 44 mostra suas principais dimensões e os suportes dos acessórios que auxiliam para a realização do experimento.

Figura 44 - Dispositivo WT e os suportes dos acessórios para o experimento.



Fonte: Elaborado pelo autora (2019).

Na seção 4.15 serão apresentados a configuração do ensaio no dispositivo WT, os resultados obtidos nos ensaios realizados e também uma discussão dos resultados.

4.14 DEFINIÇÃO DO ROTOR

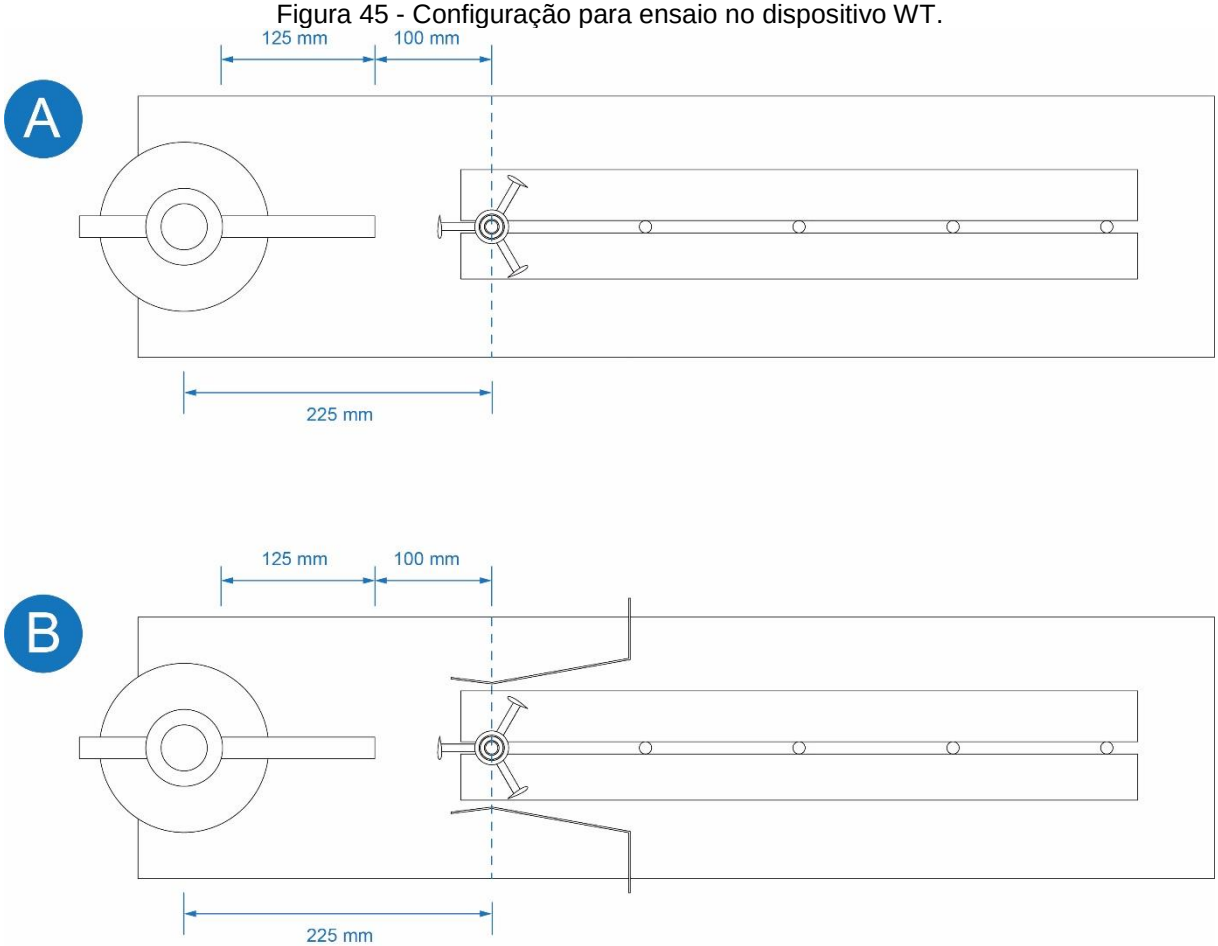
Dois rotores distintos foram prototipados para que, por meio de ensaios no dispositivo WT e túnel de vento, pudesse ser definido qual seria o mais adequado para ser utilizado nesta pesquisa. Os rotores foram ensaiados sem o difusor e com ele; o difusor utilizado foi o Modelo 1, concebido por Watanabe *et al.* (2016).

Os experimentos foram realizados em duas etapas: (i) ensaio no dispositivo WT para a medição da inicialização (menor torque de partida da turbina) e (ii) ensaio no túnel de vento, com o mesmo objetivo.

Para ambos os ensaios, foi utilizado um anemômetro digital portátil para a medição da velocidade do vento, da marca Incoterm. O anemômetro possui uma faixa medição de 0 a 30 m/s, com uma resolução de 0,1 m/s e precisão de ±5%. Também é apto a medir a temperatura local, com alcance de -15 °C a 45 °C, resolução de 0,2 °C e precisão de ± 2 °C.

Para os experimentos de medição da inicialização (menor torque de partida) no dispositivo WT, o eixo de transmissão da turbina era posicionado a uma distância de 100 mm do tubo direcionador. A Figura 45 mostra as configurações para os ensaios com a turbina sem difusor e com difusor.

Figura 45 - Configuração para ensaio no dispositivo WT.



(A) Turbina e (B) Turbina com difusor.

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Para a coleta dos dados da inicialização (menor torque de partida), o comando do compressor de ar era acionado lentamente até o momento em que o rotor da turbina começasse a girar. Nesse instante, o comando era travado, a turbina retirada do dispositivo, e era posicionado o anemômetro. Após um tempo de ±2 minutos era iniciada a aferição dos dados.

A Tabela 7 apresenta os resultados em metros por segundo (m/s) para o torque de partida (*start* rotacional) das turbinas com rotor de duas e três pás, com e sem o difusor Modelo 1 inserido.

Tabela 7 - Valores do torque de partida das turbinas no dispositivo WT.

ROTOR	TURBINA SEM DIFUSOR	TURBINA COM DIFUSOR	VARIAÇÃO
2 PÁS	6,2 m/s	5,8 m/s	- 6,45%
3 PÁS	5,2 m/s	4,9 m/s	- 5,77%
VARIAÇÃO	- 16,13%	- 15,52%	—

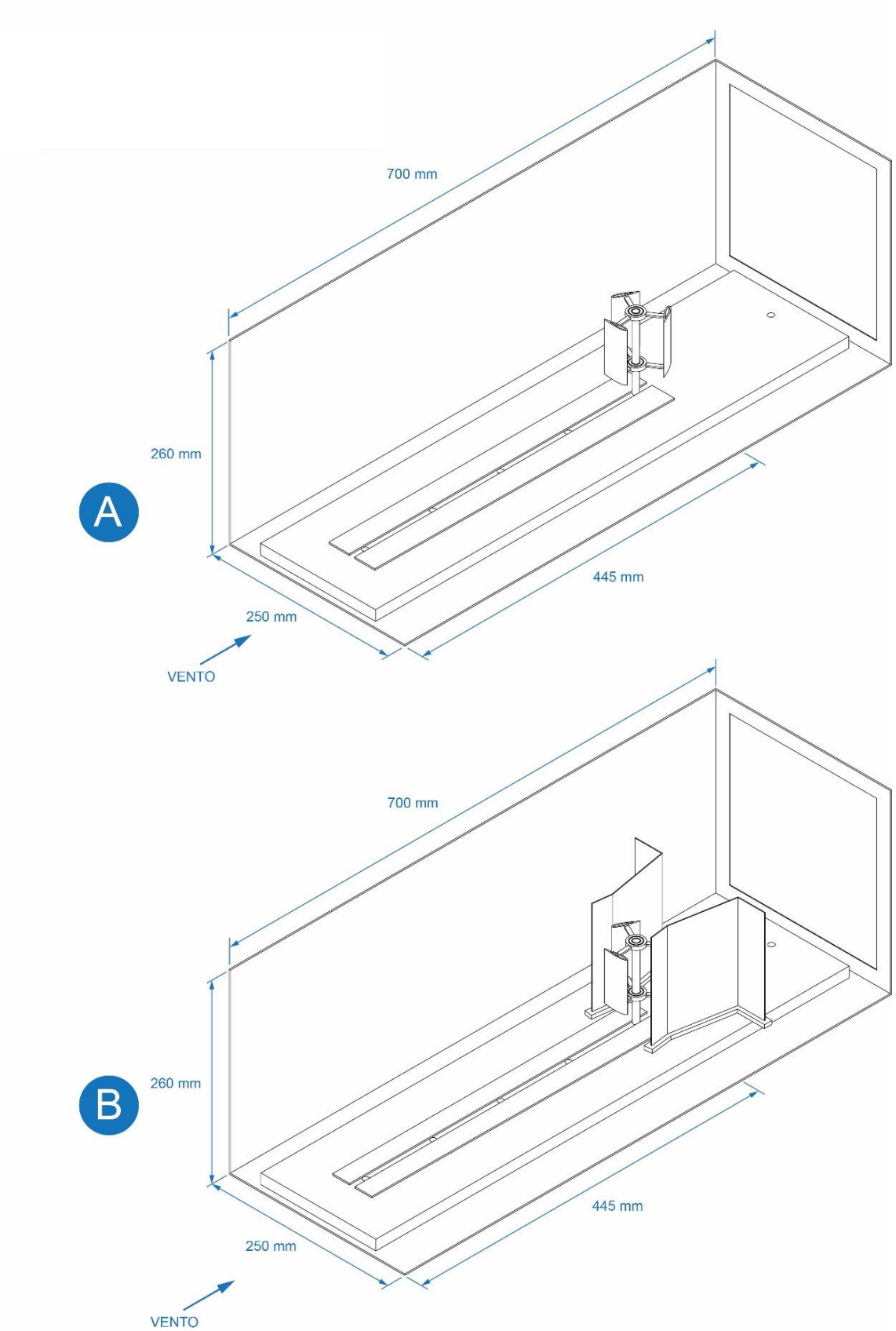
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

No dispositivo WT, a turbina eólica com rotor de três pás apresentou resultados superiores à turbina eólica com rotor de duas pás, com uma redução no torque de partida de 16,13% em relação à turbina sem difusor e 15, 52% quanto à turbina com difusor.

O túnel de vento possui uma seção de testes com dimensões de 250 mm x 260 mm x 700 mm (largura x altura x profundidade) e comprimento total de 2000 mm. A velocidade do vento produzido pelo motor do túnel de vento é controlada por um regulador de tensão monofásico da marca Varivolt Variac.

Para os experimentos de medição da inicialização (menor torque de partida) no túnel de vento, o eixo de transmissão da turbina era posicionado a 445 mm da entrada da seção de testes. A Figura 46 mostra as configurações para os ensaios com a turbina sem difusor e com difusor.

Figura 46 - Configuração para ensaio no túnel de vento.



(A) Turbina e (B) Turbina com difusor.

Fonte: Elaboro pela autora (2019).

Para a coleta dos dados da inicialização (menor torque de partida), a turbina era posicionada conforme as configurações mostradas na Figura 46, a seção de testes era lacrada e, por meio do regulador de tensão, a velocidade do vento era lentamente acelerada. No momento em que o rotor da turbina começasse a girar, o regulador de tensão era travado, a turbina retirada da seção de testes e o anemômetro era posicionado, a seção de testes era novamente lacrada. Após um tempo de ±2 minutos era iniciada a aferição dos dados.

A Tabela 8 apresenta os resultados em metros por segundo (m/s) para o torque de partida (*start* rotacional) das turbinas com rotor de duas e três pás, com e sem o difusor Modelo 1 inserido.

Tabela 8 - Valores do torque de partida das turbinas no túnel de vento.

ROTOR	TURBINA SEM DIFUSOR	TURBINA COM DIFUSOR	VARIAÇÃO
2 PÁS	3,6 m/s	3,3 m/s	- 8,33%
3 PÁS	2,8 m/s	2,4 m/s	- 14,29%
VARIAÇÃO	- 22,22%	- 27,27%	—

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

No túnel de vento, assim como no dispositivo WT, a turbina eólica com rotor de três pás mostrou resultados superiores à turbina eólica com rotor de duas pás, com uma redução no torque de partida de 22,22% em relação à turbina sem difusor e 27,27% quanto à turbina com difusor.

Sendo assim, com base nos resultados analisados, optou-se por utilizar a turbina eólica com rotor de três pás para os ensaios com os difusores concebidos nesta pesquisa, uma vez que, mesmo sem difusor, a turbina com rotor de três pás apresentou um melhor desempenho, ao se tratar do torque de partida, ponto primordial deste estudo.

4.15 ENSAIOS NO DISPOSITIVO WT

Esta seção apresenta os ensaios realizados no dispositivo WT, em que será avaliado o comportamento dinâmico da turbina eólica de microescala com o difusor.

4.15.1 Configuração do ensaio no dispositivo WT

Os modelos selecionados foram submetidos ao dispositivo WT, idealizado, projetado e construído na Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

Para os ensaios no dispositivo WT, foram utilizados: (i) anemômetro digital portátil, para a medição da velocidade do vento e (ii) tacômetro digital portátil ótico com mira laser, para medir as rotações por minuto (RPM) da turbina eólica.

(i) O anemômetro utilizado foi da marca Incoterm. Ele possui uma faixa de medição de 0 a 30 m/s, com uma resolução de 0,1 m/s e precisão de ±5%. Com ele, também é possível medir a temperatura local, com alcance de -15 °C a 45 °C, resolução de 0,2 °C e precisão de ± 2 °C.

(ii) O tacômetro utilizado foi da marca Instrutherm. Ele possui uma faixa de medição que vai de 1 a 99999 rotações por minuto (RPM), e sua resolução é de 0,1 RPM. A amostragem é medida a cada 1 segundo.

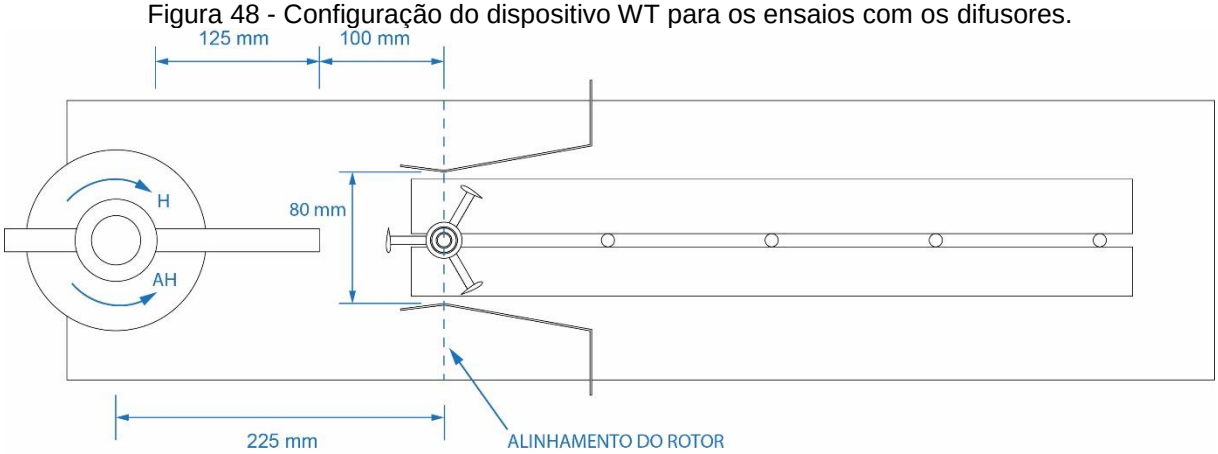
A Figura 47 mostra o modelo do anemômetro e tacômetro utilizados nos experimentos realizados no dispositivo WT.

Figura 47 - Anemômetro digital e tacômetro utilizado nos experimentos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O dispositivo WT possui dimensões de 700 mm x 170 mm (largura x profundidade). A Figura 48 mostra a configuração do dispositivo WT para os ensaios realizados com os difusores.

Figura 48 - Configuração do dispositivo WT para os ensaios com os difusores.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Nos experimentos de medição das rotações por minuto (RPM), a velocidade do vento foi definida em 4 m/s, valor correspondente a 14,4 km/h. Foi definida essa velocidade, partindo da média anual de ventos registradas na estação metereológica do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Porto Alegre) a uma altitude de 3 metros. Segundo a escala de vento de Beaufort[6], essa velocidade é classificada como vento fraco, com força 3, e é perceptível quando as folhas das árvores se agitam e as bandeiras se desfraldam[7] (MALACARNE; RIBEIRO, 2018).

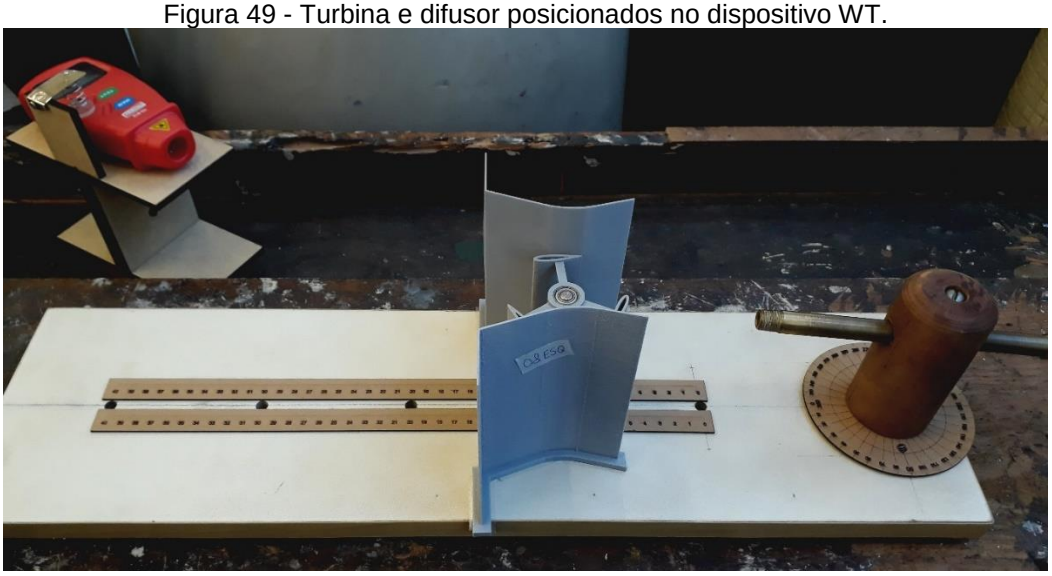
No dispositivo WT, o eixo de transmissão da turbina era posicionado a uma distância de 100 mm do tubo direcionador, conforme as configurações apresentadas na figura 46. Nos experimentos de medição das rotações por minuto (RPM), o anemômetro era posicionado a uma distância de 100 mm do tubo direcionador, mesmo local que a turbina será alocada. A entrada do escoamento de ar era iniciada pelo compressor, quando alcançada a velocidade de vento desejada (4 m/s), o comando do compressor era travado e o anemômetro retirado. A turbina era posicionada conforme as especificações estipuladas. Após um tempo de ±2 minutos, os dados eram coletados. Sua análise foi realizada coletando informações por um período de 2 minutos. Foi realizada uma média dos valores de RPM de 15 em 15 segundos durante esse tempo.

Para os experimentos de medição do torque de partida da turbina, o processo para a aferição dos dados foi diferente. A turbina era posicionada conforme as

[6] Beaufort: essa escala foi imaginada no século XIX pelo almirante inglês Sir Francis Beaufort (1774-1857). Na sua origem, tinha a finalidade de qualificar ventos no mar pelos seus efeitos sobre os navios à vela e o aspecto das ondas. Posteriormente, a escala foi adaptada para uso em terra também, estabelecendo relação com os efeitos do vento sobre a fumaça, árvores e edifícios.
[7] Desfraldam: despregar, soltar.

configurações especificadas anteriormente, na Figura 46, o comando do compressor de ar era acionado lentamente até o momento em que o rotor da turbina começasse a girar. Nesse instante, o comando era travado, a turbina retirada do dispositivo, e era posicionado o anemômetro. Após um tempo de ±2 minutos era iniciada a aferição dos dados. Os ensaios para a medição do torque de partida foram realizados com o tubo direcionador em três ângulos distintos: 0°, 5° e -5°. A Figura 49 mostra a turbina eólica com um dos difusores selecionados posicionado para a realização dos ensaios.

Figura 49 - Turbina e difusor posicionados no dispositivo WT.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Nos experimentos de medição do torque de partida da turbina, foram realizados 10 ensaios com cada difusor em cada ângulo, no final é realizada uma média desses valores.

4.15.2 Resultados no dispositivo WT

Seguindo as configurações descritas anteriormente para os experimentos no dispositivo WT, apresentam-se a seguir os resultados encontrados.

A Tabela 9 apresenta os resultados em metro por segundo (m/s) para o torque de partida da turbina (*start* rotacional) quando o ângulo estava em 0º. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde à turbina sem o difusor, o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1, definido como difusor referência para esta pesquisa. O terceiro valor é referente ao Modelo 2, difusor do tipo curvo de forma Venturi também desenvolvido por Watanabe *et al.* (2016). Esse modelo apresentou resultados

interessantes nas simulações realizadas com o túnel de vento virtual do *software* da Autodesk Flow Design, por esse motivo, foi prototipado para ser comparado com os demais. A última coluna apresenta a média dos dados coletados.

Tabela 9 - Valores do *start* rotacional quando o tubo direcionador estava em 0°.

DIFUSOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	**MÉDIA**
Turbina	5,4	5,3	5,3	5,4	5,5	5,2	5,1	5,3	5,4	5,2	**5,3**
Modelo 1	**5,2**	**4,8**	**4,9**	**5,4**	**5,3**	**4,8**	**5,3**	**4,9**	**5,3**	**5,1**	**5,1**
Modelo 2	5,0	4,7	4,5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,6	4,9	4,9	**4,7**
Modelo 3	4,9	4,8	5,0	5,1	4,9	4,7	4,7	5,0	4,8	4,9	**4,8**
Modelo 6	4,1	4,3	4,1	4,0	3,9	4,2	4,3	4,2	4,2	3,9	**4,1**
Modelo 8	3,5	3,1	3,8	3,6	3,3	3,4	3,1	3,4	3,5	3,4	**3,4**
Modelo 9	4,2	4,4	4,3	4,2	4,2	4,7	4,3	4,2	4,5	4,4	**4,3**
Modelo 10	4,4	4,5	4,3	4,2	4,3	4,5	4,3	4,4	4,3	4,3	**4,3**
Modelo 12	4,6	4,7	4,6	4,4	4,5	4,6	4,5	4,5	4,4	4,6	**4,5**
Modelo 19	4,5	4,6	4,7	4,6	4,4	4,5	4,5	4,6	4,8	4,4	**4,5**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 10 apresenta os resultados em m/s para o *start* rotacional quando o tubo direcionador estava com um ângulo de 5°.

Tabela 10 - Valores do *start* rotacional quando o tubo direcionador estava em 5°.

DIFUSOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	**MÉDIA**
Turbina	5,7	5,8	5,9	6,1	5,8	6,0	5,9	5,9	6,2	6,0	**5,9**
Modelo 1	**5,8**	**5,4**	**5,3**	**5,5**	**5,7**	**5,2**	**5,4**	**5,3**	**5,5**	**5,5**	**5,5**
Modelo 2	5,5	5,3	5,6	5,5	5,4	5,6	5,7	5,2	5,2	5,5	**5,4**
Modelo 3	5,5	5,6	5,3	5,7	5,4	5,3	5,6	5,5	5,5	5,3	**5,4**
Modelo 6	4,4	4,6	4,3	4,7	3,6	4,6	4,5	4,3	4,7	4,4	**4,5**
Modelo 8	4,1	3,9	4,0	3,9	4,2	4,1	4,1	3,9	4,0	4,2	**4,0**
Modelo 9	4,8	4,8	4,6	4,7	4,9	5,0	4,8	4,5	4,6	4,6	**4,7**
Modelo 10	5,0	4,9	5,1	4,8	4,9	4,9	5,0	5,2	4,8	4,9	**5,0**
Modelo 12	5,5	5,6	5,5	5,4	5,5	5,5	5,7	5,7	5,6	5,4	**5,5**
Modelo 19	5,2	5,1	5,2	5,0	5,3	5,1	5,0	4,9	5,2	5,2	**5,1**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 11 apresenta os resultados em m/s para o *start* rotacional quando o tubo direcionador estava com um ângulo de -5°.

Tabela 11 - Valores do *start* rotacional quando o tubo direcionador estava em -5°.

DIFUSOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	**MÉDIA**
Turbina	8,3	8,2	8,3	8,5	8,0	8,2	8,1	8,4	8,2	8,1	**8,2**
Modelo 1	**7,9**	**7,9**	**7,7**	**7,6**	**7,7**	**7,9**	**7,5**	**7,8**	**7,9**	**7,7**	**7,7**
Modelo 2	7,5	7,6	7,4	7,5	7,5	7,2	7,7	7,4	7,7	7,6	**7,5**
Modelo 3	6,8	6,9	6,8	6,7	6,5	6,7	6,8	6,8	6,6	6,7	**6,7**
Modelo 6	5,1	5,0	5,2	4,9	5,3	5,0	5,0	5,0	4,9	5,2	**5,0**
Modelo 8	4,7	4,5	4,6	4,2	4,7	4,7	4,4	4,3	4,6	4,6	**4,5**
Modelo 9	5,5	5,2	5,0	5,2	5,2	5,4	5,1	5,3	5,3	5,4	**5,2**
Modelo 10	5,9	5,8	6,0	5,6	5,8	5,9	6,1	5,8	5,7	5,9	**5,8**
Modelo 12	7,2	7,3	7,5	7,1	7,3	7,4	7,2	7,2	7,1	7,4	**7,2**
Modelo 19	6,2	6,3	6,0	6,2	6,4	6,1	6,2	6,2	6,4	6,0	**6,2**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 12 apresenta as variações percentuais do *start* rotacional dos difusores em relação ao Modelo 1. O primeiro valor apresentado, na segunda linha da tabela, corresponde aos valores da turbina sem o difusor aplicado, e o segundo valor, na terceira linha, carresponde ao difusor Modelo 1, definido como difusor referência para esta pesquisa. A tabela mostra o quanto os difusores reduziram a velocidade necessária para rotacionar em relação ao Modelo 1 (em negrito); os valores em parênteses apresentam essa redução da velocidade em relação à turbina sem um difusor.

Tabela 12 - Variação percentual do *start* rotacional dos difusores.

DIFUSOR	ÂNGULO 0°	VARIAÇÃO		ÂNGULO 5°	VARIAÇÃO		ÂNGULO -5°	VARIAÇÃO	
Turbina	5,3	**3,92%**	(——)	5,9	**7,27%**	(——)	8,2	**6,49%**	(——)
Modelo 1	5,1	——	(-3,76%)	5,5	——	(-6,78%)	7,7	——	(-6,10%)
Modelo 2	4,7	**-7,84%**	(-11,32%)	5,4	**-1,82%**	(-8,46%)	7,5	**-2,60%**	(-8,54%)
Modelo 3	4,8	**-5,88%**	(-9,43%)	5,4	**-1,82%**	(-8,46%)	6,7	**-12,98%**	(-18,29%)
Modelo 6	4,1	**-19,61%**	(-22,64%)	4,5	**-18,18%**	(-23,73%)	5,0	**-35,06%**	(-39,01%)
Modelo 8	3,4	**-33,33%**	(-35,85%)	4,0	**-27,27%**	(-32,20%)	4,5	**-41,56%**	(-45,12%)
Modelo 9	4,3	**-15,69%**	(-18,87%)	4,7	**-14,54%**	(-20,34%)	5,2	**-32,47%**	(-36,59%)
Modelo 10	4,3	**-15,69%**	(-18,87%)	5,0	**-9,09%**	(-15,25%)	5,8	**-24,68%**	(-29,27%)
Modelo 12	4,5	**-11,76%**	(-15,09%)	5,5	**0%**	(-0%)	7,2	**-6,49%**	(-12,20%)
Modelo 19	4,5	**-11,76%**	(-15,09%)	5,1	**-7,27%**	(-13,56%)	6,2	**-19,48%**	(-24,39%)

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 13 apresenta os resultados das rotações por minuto (RPM) para a turbina. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde aos valores da turbina sem um difusor aplicado, o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1. A última coluna mostra o quanto as rotações por minuto aumentaram em em relação ao Modelo 1 (em negrito); os valores em parênteses apresentam esse aumento das rotações em relação à turbina sem um difusor.

Tabela 13 - Resultados e variação percentual das RPM nos difusores.

DIFUSOR	15 seg	30 seg	45 seg	60 seg	75 seg	90 seg	105 seg	120 seg	**MÉDIA**	**VARIAÇÃO**	
Turbina	671	600	556	500	493	543	614	668	580,6	**-23,84%**	(——)
Modelo 1	**779**	**749**	**752**	**805**	**742**	**728**	**762**	**782**	**762,3**	——	(31,30%)
Modelo 2	853	793	878	817	807	806	852	847	831,6	**9,08%**	(43,23%)
Modelo 3	804	843	821	882	857	895	831	828	845,1	**10,85%**	(45,56%)
Modelo 6	1231	1291	1287	1265	1269	1301	1283	1325	1394	**82,85%**	(140,10%)
Modelo 8	1412	1499	1603	1476	1447	1507	1588	1464	1499,5	**96,69%**	(158,18%)
Modelo 9	1132	1185	1174	1122	1193	1165	1209	1184	1170,5	**53,53%**	(101,52%)
Modelo 10	1072	1193	1190	1183	1030	1082	942	1175	1108,3	**45,37%**	(90,84%)
Modelo 12	839	811	850	892	885	854	876	863	858,7	**12,64%**	(47,90%)
Modelo 19	994	946	973	1059	909	986	1087	1021	996,8	**30,75%**	(71,67%)

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A próxima seção trará uma análise e discussão dos resultados apresentados.

4.15.3 Discussão dos resultados

Os resultados apresentados indicam que, quanto ao torque de partida (*start* rotacional), os difusores que tiveram os melhores resultados, considerando os ensaios nos três ângulos do bico direcionador, foram o Modelo 6, Modelo 8 e Modelo 9. Os três possuem a geometria do tipo curvo de ângulo semiaberto.

O difusor Modelo 6, quando o bico direcionador estava em 0°, teve uma redução do *start* rotacional de 19,61% em relação ao Modelo 1, e 22,64% em relação à turbina eólica. O difusor Modelo 8, com o bico direcionador em 0°, apresentou uma redução no *start* rotacional maior do que o Modelo 6, 33,33% em relação ao Modelo 1, e 35,85% comparado à turbina.

Os melhores resultados no *start* rotacional das turbinas aconteceram quando o bico direcionador estava posicionado em 0°. Os piores resultados foram com o bico direcionador posicionado em -5°, em que foi necessária uma velocidade maior para a turbina girar.

Comparando o difusor Modelo 1 com a turbina sem difusor, ele apresentou uma redução no *start* rotacional quando o bico direcionador estava posicionado em 0° de 3,76%, em 5° de 6, 78% e em -5° de 6,10%.

O difusor Modelo 2 de tipo curvo, também desenvolvido por Watababe *et al.* (2016), apresentou uma redução no *start* rotacional quando o bico direcionador estava posicionado em 0° de 5,88% em relação ao Modelo 1, e 9,43% em relação à turbina. Ele foi prototipado e submetido aos ensaios porque apresentou, nas simulações de túnel de vento virtual do *software* Autodesk Flow Design, resultados interessantes e superiores ao Modelo 1, despertando, dessa forma, curiosidades sobre a sua geometria.

Os resultados relativos às rotações por minuto (RPM) mostraram que os Modelos 6, 8 e 9 apresentaram os melhores desempenhos, ficando o Modelo 8 com o melhor resultado dentre todas as geometrias ensaiadas na plataforma WT. Ele apresentou um aumento nas rotações de 96,69% em relação ao Modelo 1, e 158,18% em relação à turbina eólica.

O Modelo 1 mostrou um aumento nas rotações de 31,30% em relação à turbina. Os modelos que apresentaram valores mais próximos ao Modelo 1 foram os Modelos 2, 3 e 12. Em relação ao Modelo 1, todos os difusores tiveram redução no seu torque de partida (*start* rotacional) e aumento nas rotações por minuto (RPM).

4.16 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Esta seção apresenta os ensaios realizados no túnel de vento, em que será avaliado o comportamento dinâmico da turbina eólica de microescala com o difusor.

4.16.1 Configuração do ensaio em túnel de vento

Os difusores selecionados foram submetidos ao túnel de vento de circuito aberto de baixa velocidade do tipo aspirador (*suckdown*) (BARLOW *et al.,* 1999) que

pertence ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM – UFRGS). A Figura 50 mostra o túnel de vento do LdSM-UFRGS.

Figura 50 - Túnel de vento do LdSM-UFRGS.

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

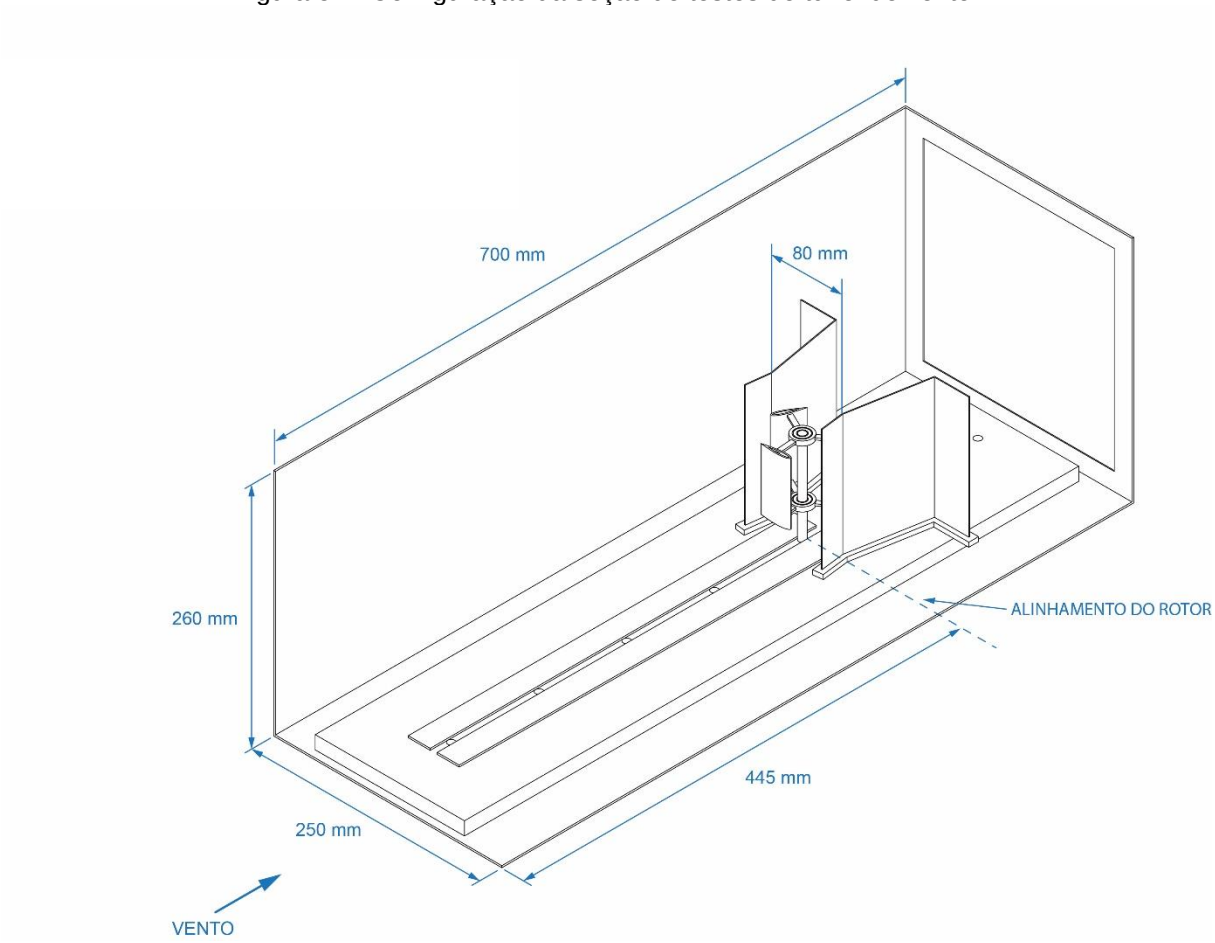
Para os experimentos no túnel de vento, também foram utilizados o anemômetro digital portátil, para a medição da velocidade do vento, e o tacômetro digital portátil ótico com mira laser, para medir as rotações por minuto (RPM) da turbina eólica.

A seção de testes no túnel de vento possui dimensões de 250mm x 260mm x 700mm (largura x altura x profundidade) e comprimento total de 2000mm. A velocidade do vento, produzido pelo motor do túnel de vento, é controlada por um regulador de tensão monofásico da marca Varivolt Variac.

Para os experimentos de medição das rotações por minuto (RPM), a velocidade do vento foi definida em 4m/s, mesma velocidade utilizada nas simulações em túnel de vento virtual do *software* Autodesk Flow Design e no dispositivo WT.

A turbina eólica de microescala foi posicionada a uma distância de 445mm da entrada da seção de testes, assim como o anemômetro, que foi posicionado à mesma distância. A Figura 51 mostra a configuração do túnel de vento para a realização dos experimentos.

Figura 51 - Configuração da seção de testes do túnel de vento.



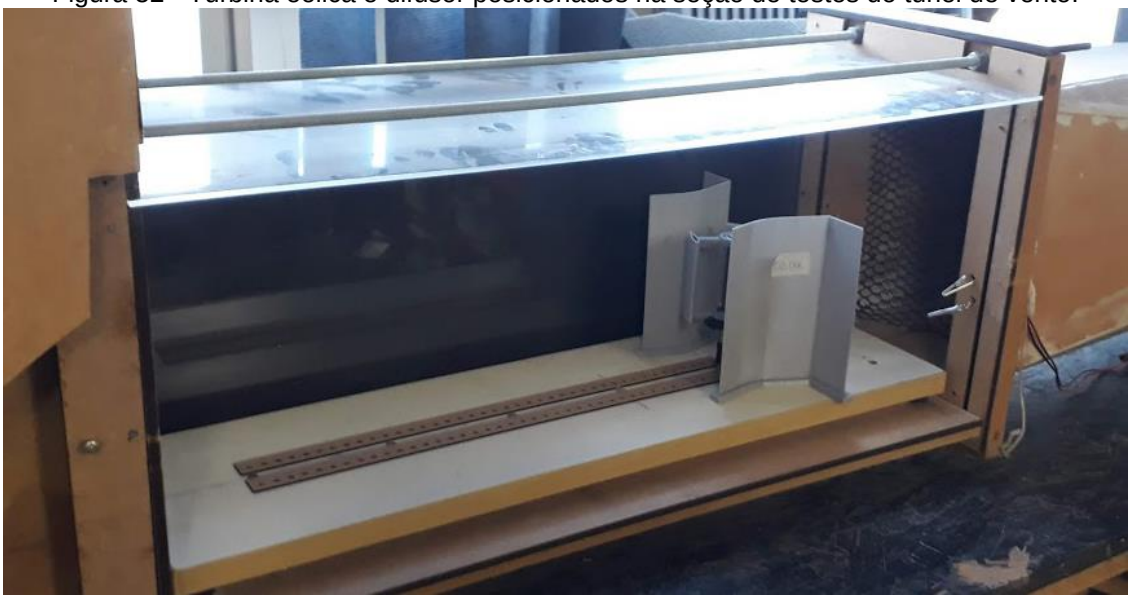
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Nos experimentos de medição das rotações por minuto (RPM), o anemômetro era posicionado a uma distância de 445 mm da entrada da seção de testes e ela era lacrada. A entrada do escoamento de ar dentro da seção de testes era iniciada pelo regulador de tensão, quando alcançada a velocidade de vento desejada (4m/s) o regulador de tensão era travado. Nesse instante, o anemômetro era retirado da seção de testes, a turbina era posicionada conforme as especificações mostradas na Figura 51 e a seção de testes era lacrada novamente. Passado um tempo de ±2 minutos, a aferição dos dados era iniciada. Esse tempo de ±2 minutos para a aferição dos dados nos ensaios era necessário para o escoamento de ar estabilizar. As informações foram coletadas por um período de tempo de 2 minutos. Foi realizada uma média dos valores de RPM de 15 em 15 segundos durante esse tempo.

Para os experimentos de medição do torque de partida (*start* inicial da turbina), a turbina era posicionada a uma distância de 445 mm da entrada da seção de testes, conforme as especificações apresentadas na figura 51, a seção de testes era lacrada

e por meio do regulador de tensão a velocidade do vento era lentamente acelerada. No instante em que o rotor da turbina começasse a girar, o regulador de tensão era travado, a turbina retirada da seção de testes e o anemômetro era posicionado onde estava a turbina. A seção de testes era novamente lacrada e após um tempo de ±2 minutos os dados eram coletados. A Figura 52 mostra a turbina eólica de microgeração com o difusor posicionados na seção de testes do túnel de vento.

Figura 52 - Turbina eólica e difusor posicionados na seção de testes do túnel de vento.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Nos experimentos de medição do torque de partida da turbina, foram realizados 10 ensaios com cada difusor, no final é realizada uma média desses valores.

4.16.2 Resultados no túnel de vento

Seguindo as configurações descritas anteriormente para os experimentos no túnel de vento, serão apresentados os resultados encontrados.

A Tabela 14 apresenta os resultados em metros por segundo (m/s) para o torque de partida da turbina (*start* rotacional). O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde à turbina sem o difusor, o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1, definido como difusor referência para esta pesquisa. A última coluna apresenta a média dos dados coletados.

Tabela 14 - Valores do *start* rotacional.

DIFUSOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	**MÉDIA**
Turbina	2,6	2,7	2,7	2,5	2,7	2,9	2,6	2,6	2,9	2,7	**2,7**
Modelo 1	**2,3**	**2,0**	**2,4**	**2,3**	**2,1**	**2,0**	**2,0**	**2,1**	**2,0**	**2,2**	**2,1**
Modelo 2	1,7	1,6	2,0	1,8	2,1	2,0	2,1	2,2	1,9	2,0	**1,9**
Modelo 3	2,0	1,9	2,1	2,0	1,8	1,8	1,9	2,0	1,8	1,8	**1,9**
Modelo 6	1,0	1,3	1,1	1,1	1,3	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	**1,2**
Modelo 8	1,1	0,9	0,7	0,7	0,8	0,6	0,8	0,7	0,8	0,9	**0,8**
Modelo 9	1,2	1,1	1,4	1,6	1,2	1,6	1,6	1,4	1,3	1,6	**1,4**
Modelo 10	1,7	1,8	1,5	1,5	1,7	1,5	1,4	1,4	1,6	1,8	**1,6**
Modelo 12	2,3	2,0	2,1	2,1	2,1	2,4	1,9	2,3	2,1	2,1	**2,1**
Modelo 19	1,8	1,9	2,2	2,0	2,2	1,9	2,2	1,7	1,8	2,2	**2,0**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 15 apresenta as variações percentuais do *start* rotacional dos difusores em relação ao Modelo 1. O primeiro valor apresentado, na segunda linha da tabela, corresponde aos valores da turbina sem o difusor aplicado, e o segundo valor, na terceira linha, corresponde ao difusor Modelo 1, definido como difusor referência para esta pesquisa. A tabela mostra o quanto os difusores reduziram a velocidade necessária para rotacionar em relação ao Modelo 1 (em negrito); os valores em parênteses apresentam essa redução da velocidade em relação à turbina sem um difusor.

Tabela 15 - Variação percentual do *start* rotacional dos difusores.

DIFUSOR	***START* INICIAL**	**VARIAÇÃO**	
Turbina	2,7	**28,57%**	(——)
Modelo 1	**2,1**	——	**(-22,22%)**
Modelo 2	1,9	**-9,52%**	(-29,63%)
Modelo 3	1,9	**-9,52%**	(-29,63%)
Modelo 6	1,2	**-42,86%**	(-55,55%)
Modelo 8	0,8	**-61,90%**	(-70,37%)
Modelo 9	1,4	**-33,33%**	(-48,15%)
Modelo 10	1,6	**-23,81%**	(-40,73%)
Modelo 12	2,1	**-0%**	(-22,22%)
Modelo 19	2,0	**-4,76%**	(-25,92%)

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 16 mostra os resultados das rotações por minuto (RPM) para a turbina. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde aos valores da turbina sem um difusor aplicado; o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1. A última coluna mostra o quanto as rotações por minuto aumentaram em em relação ao Modelo 1 (em negrito); os valores em parênteses apresentam esse aumento das rotações em relação à turbina sem um difusor.

Tabela 16 - Resultados e variação percentual das RPM nos difusores.

DIFUSOR	15 seg	30 seg	45 seg	60 seg	75 seg	90 seg	105 seg	120 seg	**MÉDIA**	**VARIAÇÃO**	
Turbina	468	510	412	533	485	421	423	443	461,8	**-29,68%**	(——)
Modelo 1	**574**	**727**	**669**	**616**	**633**	**665**	**652**	**720**	**657**	——	(42,52%)
Modelo 2	902	893	875	924	801	843	792	754	848	**29,07%**	(83,95%)
Modelo 3	917	824	883	808	842	869	841	848	854	**29,98%**	(85,25%)
Modelo 6	1428	1386	1465	1481	1393	1491	1364	1402	1426,2	**117,05%**	(200,33%)
Modelo 8	1776	1715	1787	1824	1683	1728	1716	1710	1742,3	**165,14%**	(277,87%)
Modelo 9	1235	1226	1213	1200	1200	1172	1308	1269	1227,8	**86,76%**	(166,16%)
Modelo 10	1254	1203	1175	1104	1242	1144	1116	1224	1182,7	**79,91%**	(156,40%)
Modelo 12	1021	1085	1023	1046	1027	966	961	993	1015,2	**54,49%**	(120,17%)
Modelo 19	1234	1097	1171	1245	995	1303	1168	1194	1175,8	**78,84%**	(154,88%)

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Na próxima seção apresenta-se uma análise e discussão dos resultados apresentados.

4.16.3 Discussão dos resultados

Os resultados apresentados mostram que, quanto ao torque de partida (*start* rotacional), os difusores que tiveram os melhores resultados foram o Modelo 6, Modelo 8 e Modelo 9. Os três possuem a geometria do tipo curvo de ângulo semiaberto. O Modelo 6 apresentou uma redução no seu torque de partida (*start* inicial) de 42,86% em relação ao Modelo 1, e 55,55% quanto à turbina eólica. O Modelo 8 foi o que mostrou os melhores resultados, tendo uma redução em relação ao Modelo 1 de 61,90% no *start* inicial, e 70,37% quando comparado com a turbina. O Modelo 9 apresentou uma redução no *start* inicial de 33,33% em relação ao Modelo 1, e 48,15% em relação à turbina eólica.

O Modelo 1 apresentou uma redução de 22,22% em relação à turbina eólica. O Modelo 12 teve o mesmo valor de start inicial do Modelo 1 de 2,1m/s. O Modelo 2 e o Modelo 3 apresentaram o mesmo valor de *start* rotacional, com uma redução de 9,52% em relação ao Modelo 1.

Os resultados relativos às rotações por minuto (RPM) mostraram que os Modelos 6, 8 e 9 apresentaram os melhores desempenhos, ficando o Modelo 8 com o melhor resultado dentre todas as geometrias ensaiadas no túnel de vento. Esse modelo apresentou um aumento nas rotações de 165,14% em relação ao Modelo 1, e 277,87% em relação à turbina eólica.

Os Modelos 6 e 9 também tiveram bons resultados: o Modelo 6 teve um aumento nas rotações em relação ao Modelo 1 de 117,05%, e 200,33% em relação à turbina. O Modelo 9 apresentou um aumento nas rotações de 86,76% em relação ao Modelo 1, e 166,16% quanto à turbina eólica.

O Modelo 1 teve um aumento de 42,52% em relação à turbina. Os Modelos 2 e 3 apresentaram resultados semelhantes; o Modelo 2 apresentou um aumento nas rotações de 29,07%, enquanto o Modelo 3 mostrou um aumento de 29,98% em relação ao Modelo 1.

Em relação ao Modelo 1, apenas o Modelo 12 não apresentou redução no seu *start* rotacional, mantendo a mesma velocidade para a turbina começar a girar. Todos os difusores tiveram aumento nas rotações por minuto (RPM).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como proposta desenvolver o projeto de um difusor aerodinâmico para uma turbina eólica de eixo vertical de microescala, manipulando sua geometria para melhorar o seu torque de partida (*start* rotacional) em situações de ventos de baixa velocidade. Sendo assim, buscou-se integrar ferramentas computacionais de simulação, por meio de um *software* de túnel de vento virtual, o Autodesk Flow Design, e testes experimentais, com o uso do dispositivo que foi concebido para esta pesquisa, e o túnel de vento localizado no LdSM-UFRGS, para que a combinação dessas técnicas de análise e coleta de dados auxiliassem o processo de design de um difusor aerodinâmico para uma turbina eólica de eixo vertical de microescala.

O desenvolvimento de difusores para turbina eólicas de eixo vertical de pequena e microescala é um tema ainda pouco explorado, as pesquisa mais relevantes no tema são desenvolvidas pelos pesquisadores da Universidade de Kyushu no Japão, iniciadas pelos pesquisadores do Departamento de Aeronáutica e Astronáutica, Professor Koichi Watanabe e Professor Shuhei Takahashi e também pelo Professor Yuji Ohya, pesquisador do Instituto de Mecânica Aplicada (2016). Esse cenário dificultou inicialmente a busca de conhecimento sobre o tema, pois a maioria das referências e da literatura abordava o tema de difusores de pequena e microescala para aerogeradores de eixo horizontal. Tendo em vista essa perspectiva, este trabalho demonstrou seu pionerismo ao abordar o tema na área do design dentro da literatura científica nacional sobre o tema, uma vez que, por meio dele, foi elaborada a primeira patente de invenção (PI) nacional abordando essa questão.

Ter construído uma área padrão para a geometria de um difusor permitiu dar mais controle e precisão ao processo de design de um difusor para uma turbina eólica de eixo vertical de microescala. O objetivo dessa área construtiva padrão foi buscar estabelecer parâmetros fáceis de serem compreendidos, possibilitando que seja possível desenvolver e reproduzir de forma precisa os difusores elaborados nesta pesquisa. Além disso, a área construtiva poderá ser utilizada como ponto de partida para novas pesquisas nessa área, como modelo de referência.

O processo metodológico que foi constituido por Ximenes (2018), utilizado para este estudo, com a utilização de análises por simulação computacional por meio do

software de túnel de vento virtual da Autodesk Flow Design, aliado aos experimentos com o dispositivo WT e túnel de vento, mostrou-se satisfatório para a validação das geometrias dos difusores desenvolvidos. A utilização do *software* de túnel de vento virtual para a seleção das geometrias possibilitou um ganho de tempo projetual, pois por meio dele foi possível selecionar as geometrias que passariam para o processo de prototipagem em impressora 3D e os ensaios experimentais no dispositivo WT e túnel de vento, processos mais demorados. Esse *software* se mostrou muito promissor para a área do design em projetos que envolvam simulação, visualização e avaliação do escoamento de ar em torno de objetos.

Os ensaios experimentais realizados no dispositivo WT e no túnel de vento foram fundamentais para avaliar a precisão das simulações em túnel de vento virtual e validar esses resultados. Eles foram indispensáveis para a avaliação dinâmica dos difusores, pois eles possibilitam condições experimentais mais próximas a uma situação real.

Em relação às geometrias de difusores elaboradas, os resultados mostraram que a manipulação da geometria é um caminho bastante promissor no desenvolvimento de difusores para turbinas eólicas, independentemente do seu tamanho ou orientação, pois uma pequena variação na sua forma é capaz de produzir comportamentos aerodinâmicos bem diferentes.

A geometria Modelo 8 foi a que apresentou os melhores resultados, tanto nas simulações em túnel de vento virtual quanto nos ensaios realizados no dispositivo e no túnel de vento. Seus resultados foram melhores que o Modelo 1, modelo referência deste estudo, tanto na redução da velocidade do *start* rotacional quanto nas rotações por minuto (RPM). As geometrias dos Modelos 6 e 9 também apresentaram bons resultados, mas o Modelo 8 se sobressaiu sobre eles.

As geometrias de difusor com ângulo semiaberto produzem máximas de baixa pressão melhores que as outras geometrias, por isso essa geometria é ideal para aplicações em que se busca uma melhor performance nas rotações por minuto.

Neste trabalho, os difusores foram avaliados sobre determinadas condições, como, por exemplo, em escala reduzida, com difusores e turbina eólica prototipados em impressora 3D, com turbina eólica de microescala, com diâmetro de 70 mm. Neste estudo, não foram realizadas simulações ou ensaios com difusores elaborados em escalas diferentes e/ou com materiais distintos. A utilização de materiais e escalas

diferentes pode contribuir trazendo resultados diferenciados dos encontrados neste estudo, podendo, assim, ser aprofundados os conhecimentos sobre difusores para turbina eólica de eixo vertical de microescala.

Comparando a aplicação de um difusor em uma turbina eólica de eixo vertical com uma turbina eólica de eixo horizontal, trabalho desenvolvido por Ximenes (2018), é possível apontar que ambos possuem a sua aplicação independente do local de implementação, mas, ao se tratar de microgeração de energia com condições de vento de baixa velocidade, sugere-se que o difusor acoplado a uma turbina eólica de eixo vertical seja o mais indicado.

Por fim, ficam estabelecidas como soluções finais para o problema de pesquisa apresentado as geometrias de difusores Modelo 6 e Modelo 8 como alternativas finais. O Modelo 9 também apresentou resultados interessantes, mas considerando o objetivo deste estudo, de alcançar o menor torque de partida de uma turbina eólica de eixo vertical com o uso de um difusor, as alternativas Modelo 6 e 8 se destacam. As definições finais dessas geometrias de difusores são apresentadas na seção seguinte.

5.1 DIFUSORES FINAIS SELECIONADOS

Partindo das considerações sobre os resultados da pesquisa, ficaram definidos os difusores Modelo 6 (Difusor curvo de ângulo semiaberto variante 1) e Modelo 8 (Difusor curvo de ângulo semiaberto variante 3) como as soluções finais que atendem às especificações estipuladas por esta pesquisa.

O apêndice D apresenta as configurações completas do difusor Modelo 6 curvo de ângulo semiaberto variante 1, final recomendado por esta pesquisa.

O apêndice E apresenta as configurações completas do difusor Modelo 8 curvo de ângulo semiaberto variante 3, final recomendado por esta pesquisa.

5.2 PRODUÇÃO ACADÊMICA E CIENTÍFICA COMPLEMENTAR

Por meio desta pesquisa, foi possível realizar junto à Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico (SEDETEC) da UFRGS, órgão que promove a interação da Universidade com a sociedade estimulando e apoiando as atividades de desenvolvimento tecnológico e inovação, responsável pelos assuntos relativos à

propriedade intelectual e transferência de tecnologia, um pedido de patente na categoria Pedido Nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional de PCT, com o seguinte registro no INPI:

(i) Difusor Aerodinâmico para Aerogeradores de Eixo Vertical e Processo de Fabricação de Difusor Aerodinâmico (BR 10 2019 010102 4).

Desta pesquisa também foi elaborado um artigo que foi submetido em maio de 2019 para avaliação na revista Gestão e Tecnologia de Projetos, classificação Qualis CAPES “B2”.

5.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA

Esta pesquisa teve como contribuição o fato de mostrar experimentalmente que a minipulação da geometria de um difusor pode proporcionar melhorias consideráveis na sua performance, permitindo que se desenvolvam difusores para situações com foco específico, como, por exemplo, difusores para turbinas eólicas projetados e otimizados para rotacionar com baixas velocidades de vento.

Tem como contribuição também a proposta de ter um método para a eleboração do design de difusores, com a preocupação de apresentar uma área construtiva para que os Modelos possam ser reproduzidos, proporcionando, assim, que outros estudos sejam realizados sobre eles.

O estudo também contribuiu com a elaboração de um dispositivo que poderá ser explorado em novas pesquisas. Além de trazer uma solução disponível para o desenvolvimento de soluções em energia eólica de baixo custo, que não exige condições climáticas e geográficas especiais para trabalhar de maneira eficaz. É uma solução para o crescente interesse no desenvolvimento de redes descentralizadas de micro e minigeração de energia.

Por fim, há a contribuição e produção de informações técnico-científicas que irão auxiliar a área de design no projeto de turbinas eólicas de eixo vertical de microescala.

5.4 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Verificar a integração de difusor, microturbina e gerador de energia.

- Pesquisar o alcance da eficiência dos difusores em turbina eólicas.
- Pesquisar maneiras de integração das microturbinas no ambiente urbano.

REFERÊNCIAS

ABE, Ken-ichi; OHYA, Yuji. An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. United States, v. 92, Iss. 3-4, p. 315-330, 2004. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2003.12.003.

ABE, K.; NISHIDA, M.; SAKURAI, A.; OHYA, Y.; KIHARA, H.; WADA, E.; SATO, K.. Experimental and numerical investigations of flow fields behind a small wind turbine with a flanged diffuser. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. United States, v. 93, Iss. 12, p. 951-970, 2005. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2005.09.003.

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim anual de geração eólica 2017**. Disponível em: https://www.ambienteenergia.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Boletim_Anual_de_Geracao_Eolica_2017.pdf. Acesso em: 06 abr. 2018.

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim anual de geração eólica 2018**. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf. Acesso em: 12 fev. 2019.

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Infovento número 11 I Atualizado em 16 maio de 2019.** Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Infovento-11_PT.pdf. Acesso em: 29 maio 2019.

ACKERMANN, T.; and SODER, L. An overview of wind energy-status, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 6(1-2), 67–127, 2002.

AKHGARI, Arash. **Experimental investigation of the performance of a diffuser augmented vertical axis wind turbine**. Dissertação. B. Sc, University of Tehran, 2011.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília: ANEEL, 2012. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf. Acesso em: 05 maio 2018.

ANNEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Energia Eólica, 2013. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06energia_eolica.pdf. Acesso em: 05 maio 2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf. Acesso em: 05 maio 2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed – Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/publicacoes. Acesso em: 05 maio 2018.

AUTODESK. **Autodesk Flow Design**: Virtual wind tunnel testing tools. Disponível em: http://www.autodesk.com/products/flow-design/. Acesso em: 10 maio 2018.

AZEVEDO, J. P. M.; NASCIMENTO, R. S., SCHRAM, I. B.. Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão. **Revista UNINGÁ**, Vol.51, p. 101-106 (Jan-Mar -2017), 2017.

BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S.. Impactos ambientais de usinas eólicas. In: **AGRENER GD 2013. 9º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio no Rural**, 2013, Itajubá. Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente, 2013.

BARLOW, Jewel B.; RAE, William H. Jr.; POPE, Alan. Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

BIANCHI, Patrícia N. L.; Instrumento para a eficácia das políticas públicas energéticas: Brasil e União Européia. **Revista de Direito da Cidade**, Vol. 11, nº 1. ISSN 2317-7721. DOI: 10.12957/rdc.2019.31197.

BOYER, C. B. História da Matemática. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1974. 488p.

BNDES – Panorama do setor de energia eólica. **Revista do BNDES**, junho de 2013, p 183 – 206. 2013.

BRUNETTI, F.; **Mecânica dos Fluídos**. 2ª edição revisada. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN 978-85-7605-182-4.

CARNEIRO, Joaquim. **Energia**: do carbono às renováveis. 3º ano da licenciatura em ciências do ambiente. Departamento de Física, 2013.

CHEN, L., PONTA, F.L., LAGO, L.I. Perspectives on innovative concepts in wind power generation. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 1, p. 398-410, 2011.

CORREIA, Ismael Ricardo Durães da Rocha. **Caracterização aerodinâmica de uma pá para rotor de micro-eólica**. Braga, 2014. xx f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecãnica, Braga, Portugal, 2014.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. 2 ed. Rio de janeiro: Synergia, 2013, 320 p. ISBN: 978-85-61325-88-6.

DIAS, André Luis da Silva. **Microgeração distribuída para uso residencial com base em fontes de energia eólica e solar fotovoltaica.** Rio de Janeiro, 2017. 99 f. Projeto de Graduação – UFRJ, Escola Politécnica, 2017.

FERREIRA, H. T.. **Energia eólica**: Barreiras a sua participação no setor elétrico Brasileiro . Dissertação. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – PIPGE. São Paulo, 2008.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M.; **Computational methods for fluid dynamics**. 3rd edition. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002. ISBN 3-540-42074-6.

FOREMAN, K.M.; GILBERT, B.; OMAN, R.A.. Diffuser augmentation of wind turbines. **Solar Energy**. London, v. 20, Iss. 4, p. 305-311, 1978. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(78)90122-6.

FRANKOVOC, B.; and VRSALOCIV, I.New high profitable wind turbines, **Renewable Energy**, 24(3-4), 491-499, 2001.

GASCH, R. and TWELE, J. (eds), **Wind Power Plants**: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Solarpraxis AG, Alemanha, 2002.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2010. Série Sustentabilidade.

GOMES, Luiz Eduardo Bueno Gomes, HENKES, Jairo Afonso. **Análise da energia eólica no cenário elétrico: aspectos gerais e indicadores de viabilidade economica**.R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 3, n. 2, p.463 - 482, out. 2014/mar.2015.

GORECKI, J. P. **Túneis aerodinâmicos: passado, presente e futuro.** Encit 88 – II Encontro Nacional de Ciências Térmicas. Águas de Lindóia – SP, 1988.

GIPE, Paul. **Wind Energy for the Rest of Us***: A Comprehensive Guide to Wind Power and How to Use It.* Bakersfield, California: wind-works.org, 2016. 560 pages.

GREENPEACE BR - GREENPEACE BRASIL. **[r]evolução energética:** A caminho do desenvolvimento limpo (cenário brasileiro 2013). São Paulo: Greenpeace, 2013.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind 2006 Report. Brussels: GWEC, 2006. Disponível em: http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/gwec-2006_final_01.pdf. Acesso em: 20 abr. 2018.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind Statistics 2017. Brussels: GWEC, 2006. Disponível em: https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf. Acesso em: 25 abr. 2019.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap**: wind energy. Paris: IEA Publications, 2013.

IGRA, O.. Compact shrouds for wind turbines. **Energy Conversion**. New York, v. 16, Iss. 4, p. 149-157, 1977. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904(81)90005-4.

IGRA, O., Research and development for shrouded wind turbines. **Energy Cont. & Momt**, 1981. **21**: p. 13-48.

INOUE, Masahiro; KSAKURAI, Akira; OHYA, Yuji. A Simple Theory of Wind Turbine with Brimmed Diffuser. **Turbomachinery**. Tokyo, v. 30, n. 8, p. 497-502, 2002. DOI: http://doi.org/10.11458/tsj1973.30.497.

JASEN, W. A. M.; SMULDERS, P.T.; Rotor design for horizontalaxis windmills. **SWD publications**; Vol.7701). Amersfoort: Stuurgroep Windenergie Ontwikkelingslanden. (1977).

KANNAN, T. Saravana; MUTASHER, Saad A.; LAU, Y.H. Kenny. Design and flow velocity simulation of diffuser augmented wind turbine using cfd. **Journal of Engineering Science and Technology**. Malaysia, v. 8, n. 4, p. 372-384, 2013. ISSN: 1823-4690.

KIRKE, B., **Developments in ducted water current turbines**. U. of South Australia, 2005.

KISHORE, Ravi Anant; MARIN, Anthony; PRIYA, Shashank. Efficient Direct-Drive Small-Scale Low-Speed Wind Turbine. **Energy Harvesting and Systems**. Berlin, v. 1, Iss. 1-2, p. 27-43, 2014. ISSN: 2329-8766. DOI: http://dx.doi.org/10.1515/ehs-2014-0004.

KOSASIH, Buyung; TONDELLI, Andrea. Experimental Study of Shrouded Micro-wind Turbine. **Procedia Engineering.** 49 (2012) 92 – 98. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.10.116.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A.; **Fudamentos de metodologia científica**. 5ª edição – São Paulo: Atlas, 2001.

LIMA, Eduardo Coutinho de. **Investimento em energia renovável**: Fontes biomassa, eólica e solar. Monografia. Centro Universitário de Brasilia - UniCEUB/ICPD, 2016.

LÖBACH, B. **Design industrial**: bases para a configuração dos produtos industriais. s. l.: Edgar Blücher, 2001.

MALACARNE, Marcio; RIBEIRO, Fabrício K. Análise da frequência e do padrão dos ventos na região da grande Vitório entre 2006 e 2016. **Revista Geonorte**, V.9, N.32, p. 137-159, 2018. DOI: 10.21170/geonorte.2018.V.9.N.32.137.159.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)**. Brasília: MME, 2017. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/proinfa. Acesso em: 15 abr. 2018.

MARQUES, Jeferson; **Turbinas eólicas**: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

MARTINS, F. R.; GUARNIERE, R. A.; PEREIRA, E. B.. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, nº 1, 1304, 2008.

NASA. Learning to Fly: The Wright Brothers' Adventure.2002. Disponível em: https://www.nasa.gov/pdf/58225main_Wright.Brothers_508.pdf. Acesso em 12 maio 2018.

NASCIMENTO, R. S., SILVA, C. A. G.. Parâmetros da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Uningá**, Vol.28, n.3, pp. 154-157 (Out-Dez – 2016), 2016.

NETO, C. R. de O., LIMA, E. C. de..Novas perspectivas de desenvolvimento: uma análise da energia eólica no Brasil. **Revista Grifos**, nº41, 2016.

OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi; SAKURAI, Akira. Development of High-Performance Wind Turbine with Brimmed Diffuser. **Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences**. Tokyo, v. 50, n. 587, p. 477-482, 2002. DOI: http://doi.org/10.2322/jjsass.50.477.

OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi; SAKURAI, Akira; INOUE, Masahiro. Development of high-performance wind turbine with a brimmed-diffuser: Part 2. **Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences**. Tokyo, v. 52, n. 604, p. 210-213, 2004. DOI: http://doi.org/10.2322/jjsass.52.210.

OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi; SAKURAI, Akira; Abe, Ken-ichi; INOUE, Masahiro. Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. United Kingdom, v. 96, Iss. 5, p. 524-539, 2008. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2008.01.006.

OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi. A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology. **Energies**. Switzerland, v. 3, p. 634-649, 2010. ISSN 1996-1073. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/en3040634

OKAMOTO, Satoru; MERRISON, Jonathan; PORTMAN, V.; SANDLER, B.; CHAPSKY, V.; LIU, Xin; QIU, Yuanying; DUAN, Xuechao; BENEDETTO, Sara Di; RUFOLO, Giuseppe C.; MARINI, Marco; TRIFONI, Eduardo; ANDRIANNE, Thomas; RAZAK, Norizham Abdul; DIMITRIADIS, Grigorios; KOTHERA, Curt S.; WERELEY, Norman M. **Wind Tunnels**. Croatia: InTech, c2011.

OLIVEIRA, Mariana Schmidt de. **Design de pás para aerogeradores de eixo horizontal aplicado à microenergia**. Porto Alegre, 2017. 130 f. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, Brasil, 2017.

PACHECO, F. **Energias Renováveis**: Breve Conceito. Conjuntura e Planejamento, Salvador: SEI, n.149,Outubro/2006.

PAULO, Jorge Alexandre Rente; **Contrução, Desenvolvimento e Otimização de Concentrador e Difusor para Turbina Eólica**. Dissertação de Mestrado. Escola superior de tecnologia e de gestão Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2013.

PHILLIPS, D. G.; FLAY, R. G. J.; NASH, T. A. Aerodynamic analysis and monitoring of the vortec 7 diffuser-augmented wind turbine. **IPENZ Transactions**, 1999, Vol. 26, Nº. 1/EMCh.

PRODANOV, CC; FREITAS, Ed. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. Novo Hamburgo, RS: Feevale, 2013., 2009.

QUEREJAZU, Daniel; CROSS, John-Michael; Small Scale Wind Power for Homes, Farms and Communities. **Environmental and Energy Study Institute** – EESI, 1112 16th Street, NW, Suite 300. Washington, DC 20036, 2012.

ROA, A.M., AUMELAS, V., MAITRE, T. and PeELLONE, C., Numerical and experimental analysis of a darrieus-type cross flow water turbine in bare and shrouded configurations. **IOP Conf. Series**: Earth and Environmental Science, 2010.

SACHS, I. A revolução energética do século XX. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 21-38, 2007.

ŞAHIN, Ahmet Duran. Progress and recent trends in wind energy. **Progress in Energy and Combustion Science**. Amsterdam, v. 30, n. 5, p. 501-543, 2004. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2004.04.001.

SILVA, V, B, A Da. **O Impacto da Ligação de Fontes de Energia Renovável nas Redes de BT**. 2012. 138 f. Dissertação Integrada em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - Faculdade de Engenharia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 2012.

SMALL SCALE WIND ENERGY, 2008. **Policy insights and practical guidance**, 2008.

SMALL WIND WORLD REPORT 2017. Published by WWEA – World Wind Energy Association, 2017.

SIRIGU, Giuseppe, CASSARO, Mario, BATTIPEDE, Manuela, GILI, Piero, FRULLA, Giacomo. Wind Generator Innovative Blade Design: Variable Twist and Start-Up Control. **International Journal of Mechanics**. New York, v. 10, p. 53-61, 2016. ISSN: 1998-4448.

TAKAHASHI, S., OHYA, Y., KARASUDANI, T. and Watanabe, K., Numerical and experimental studies of airfoils suitable for Vertical Axis Wind Turbines and an application of wind-energy collecting structure for higher performance. **International Association of Wind engineering**, 2006.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU,C. **COMPUTATIONAL Fluid Dynamics**: A Practical Approach, 1ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008, 459 p.

VERDUM, Valdirene. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics:** the finite volume method. 2nd Edition. Harlow: Pearson Education Limited, 2007. ISBN: 978-0-13-127498-3.

WATANABE, K.; TAKAHASHI, S; OHYA, Y. Application of a diffuser structure to vertical-axis wind turbines. **Energies 2016**, 9, 406; Doi: 10.3390/en9060406.

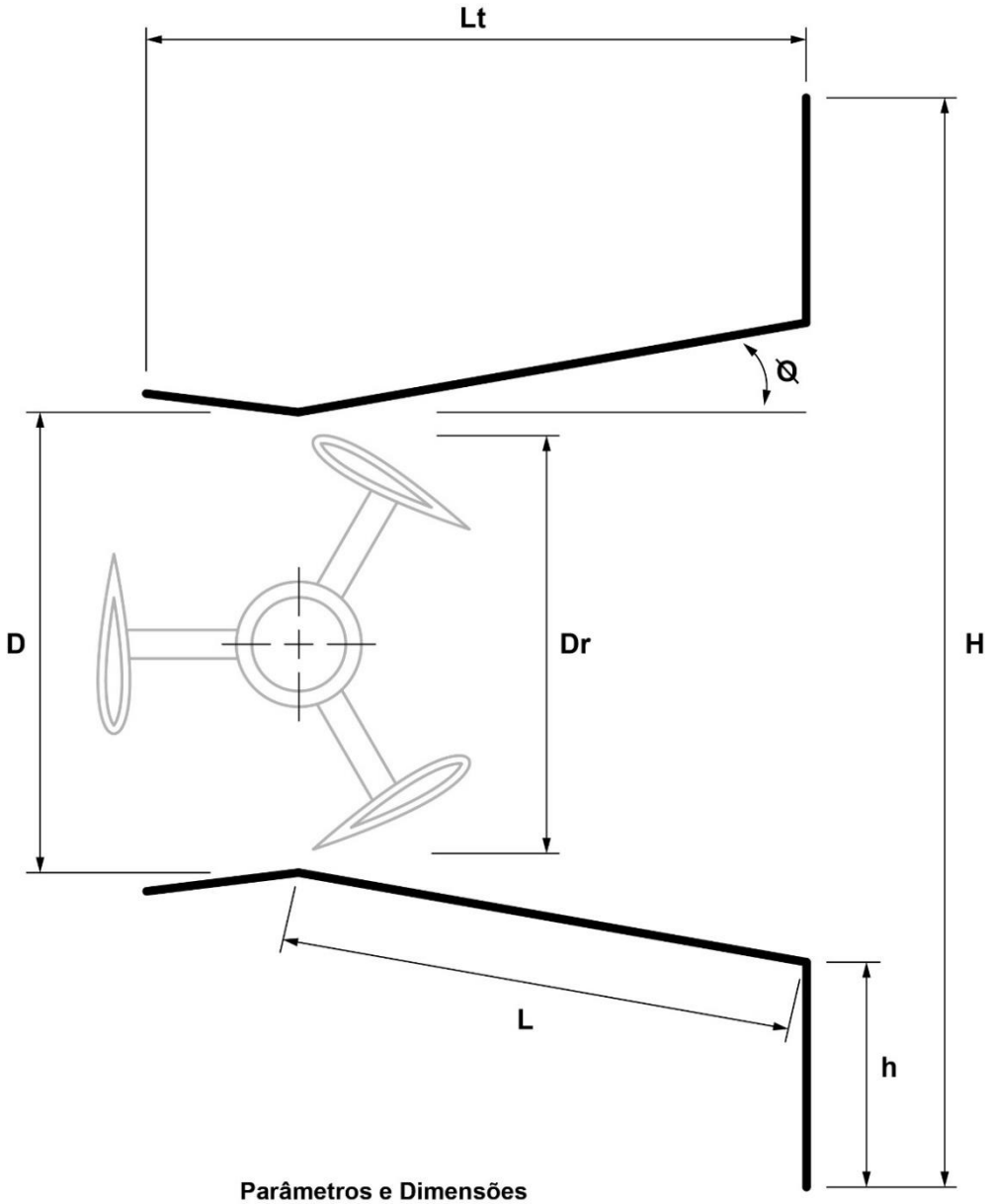
WONG, K. V. **Essays in Energy**. First published by Momentum Press®, LLC. 222 East 46th Street, New York, NY 10017, 2016. ISBN-13: 978-1-60650-819-0.

XIMENES, Fernando Silveira. **Design de difusor aerodinâmica para turbina eólica de pequena escala**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Design. UFRGS, 2018.

APÊNDICE A

DIFUSOR DE TIPO PLANO DE FORMA VENTURI

Desenhos e Dimensões (medidas em milímetros)



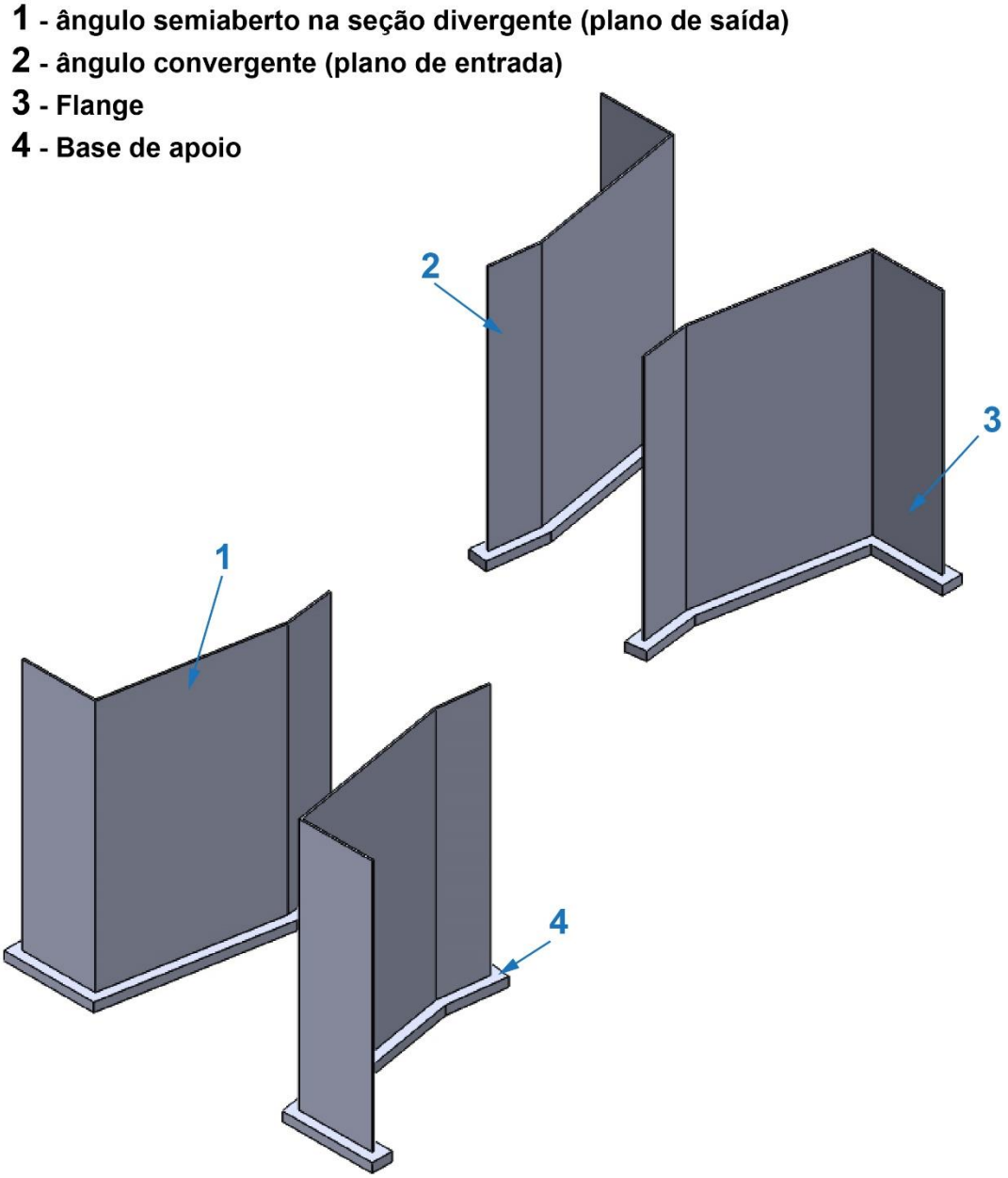
Parâmetros e Dimensões

PARÂMETRO		VALOR
Distância entre os dois lados do difusor na garganta	D	80 mm
Diâmetro do rotor	Dr	70 mm
Altura do difusor	W	143,2 mm
Comprimento do difusor	L	91,2 mm
Largura do flange	h	40 mm
Ângulo semi-aberto do difusor	Ø	10°
Altura do rotor	Wr	70 mm
Tipo de pá	-	NACA 0024
Comprimento total do difusor	Lt	117,3 mm
Largura total do difusor	H	55,8 mm

APÊNDICE A

DIFUSOR DE TIPO PLANO DE FORMA VENTURI

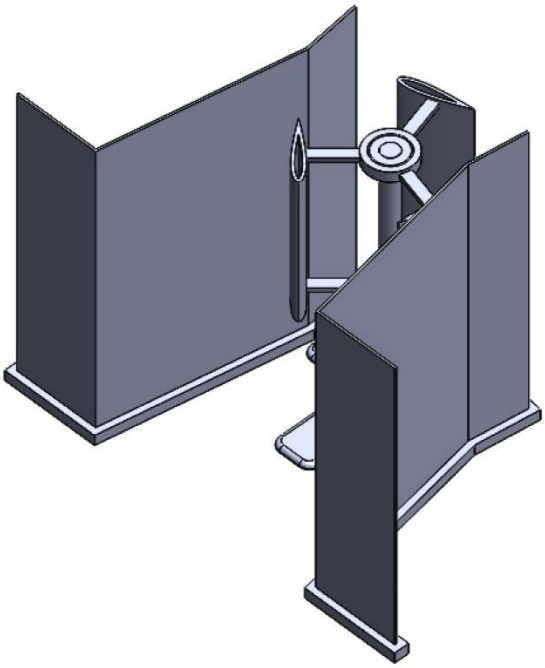
Partes Construtivas



APÊNDICE A

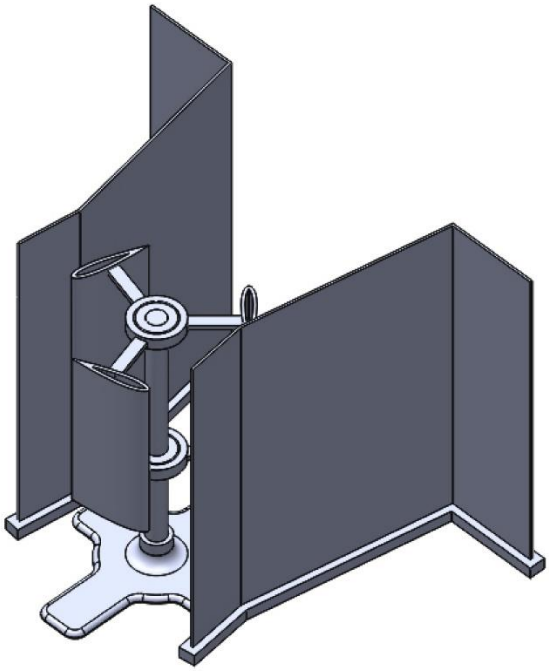
DIFUSOR DE TIPO PLANO DE FORMA VENTURI

Vistas Projetivas Aplicadas



VISTA PERSPECTIVA FRONTAL

Difusor acoplado em uma turbina eólica de microescala



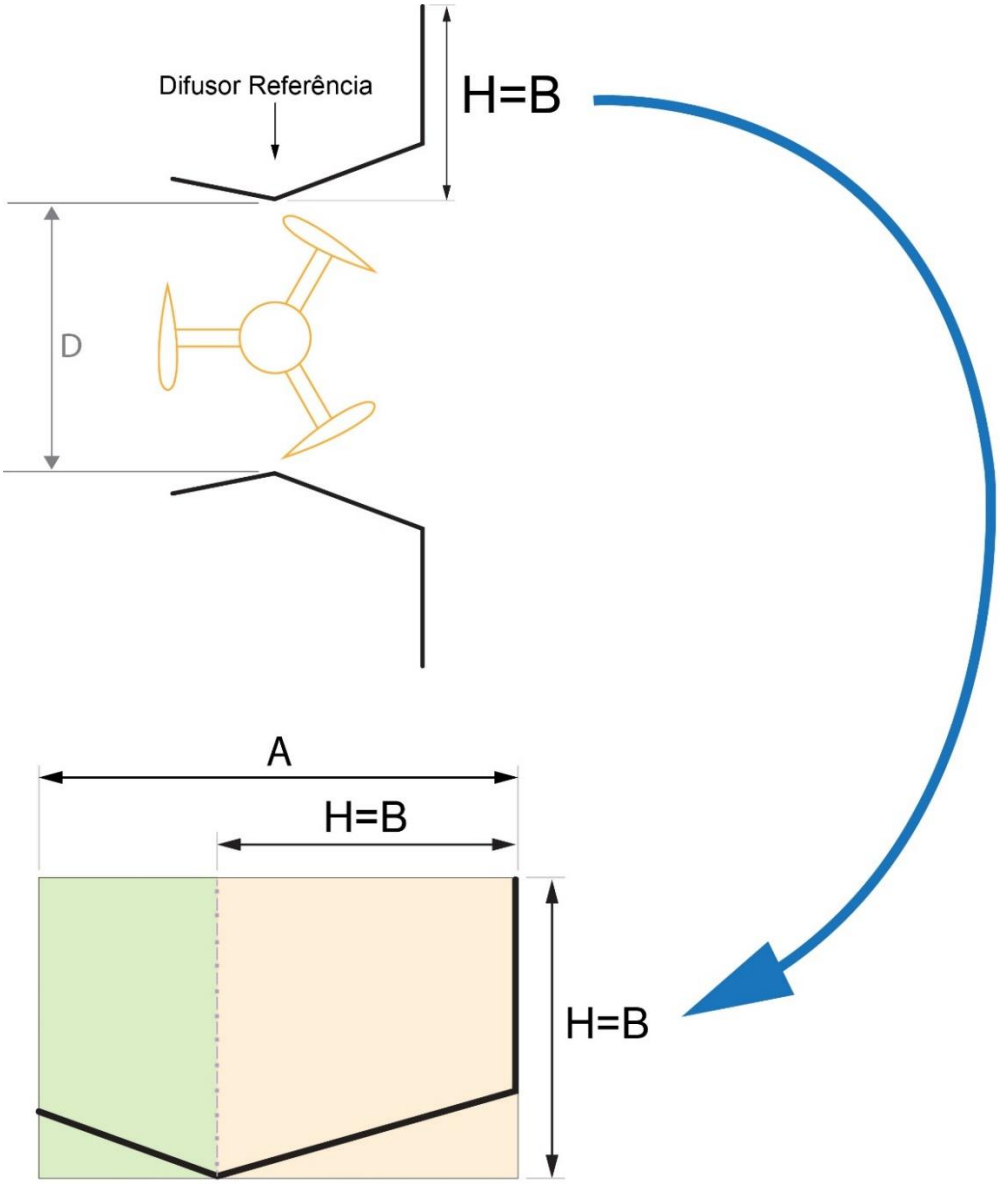
VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR

Difusor acoplado em uma turbina eólica de microescala

APÊNDICE B

RAZÃO ÁUREA

Configuração da Razão Áurea (medidas em milímetros)



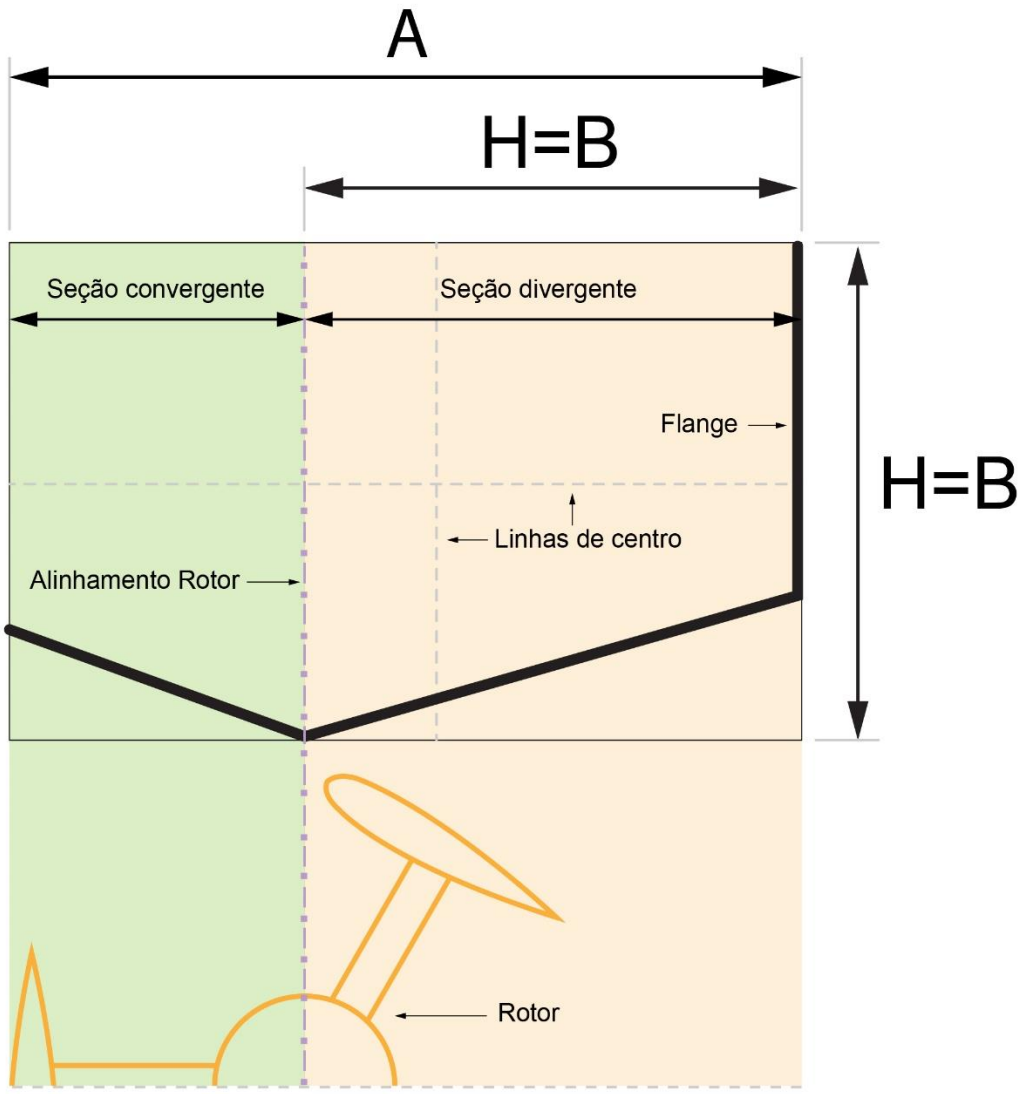
$$\text{Razão Áurea: } \frac{A}{B} = \frac{A+B}{A} = 1{,}618$$

$$\text{Razão Áurea: } \frac{90{,}3}{55{,}8} = \frac{90{,}3+55{,}8}{90{,}3} = 1{,}618$$

APÊNDICE B

ÁREA CONSTRUTIVA PADRÃO PARA A GEOMETRIA DO DIFUSOR

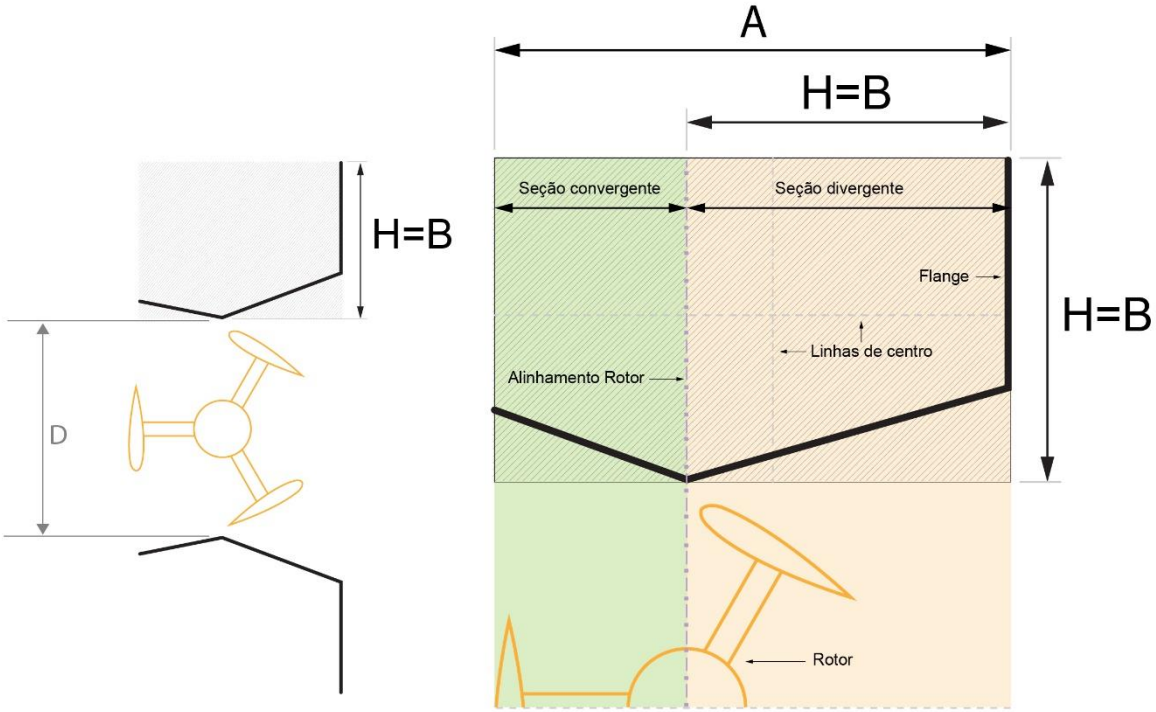
Conceito e construção da área do difusor



APÊNDICE B

ÁREA CONSTRUTIVA PADRÃO PARA A GEOMETRIA DO DIFUSOR

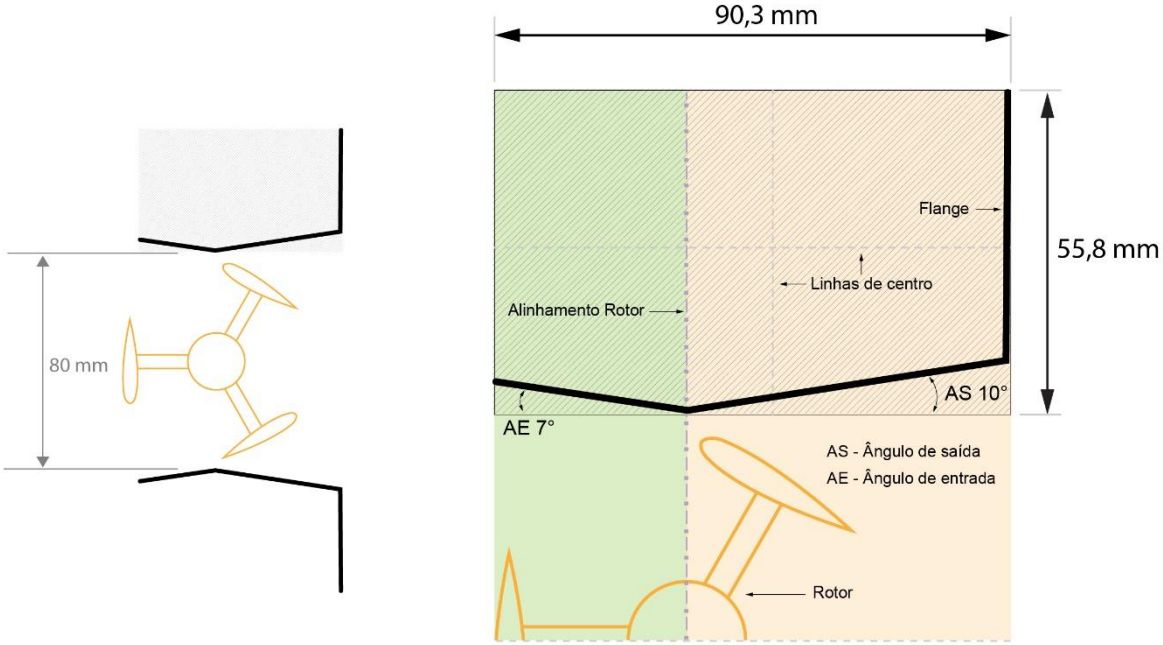
Conceito e construção da área do difusor



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 3

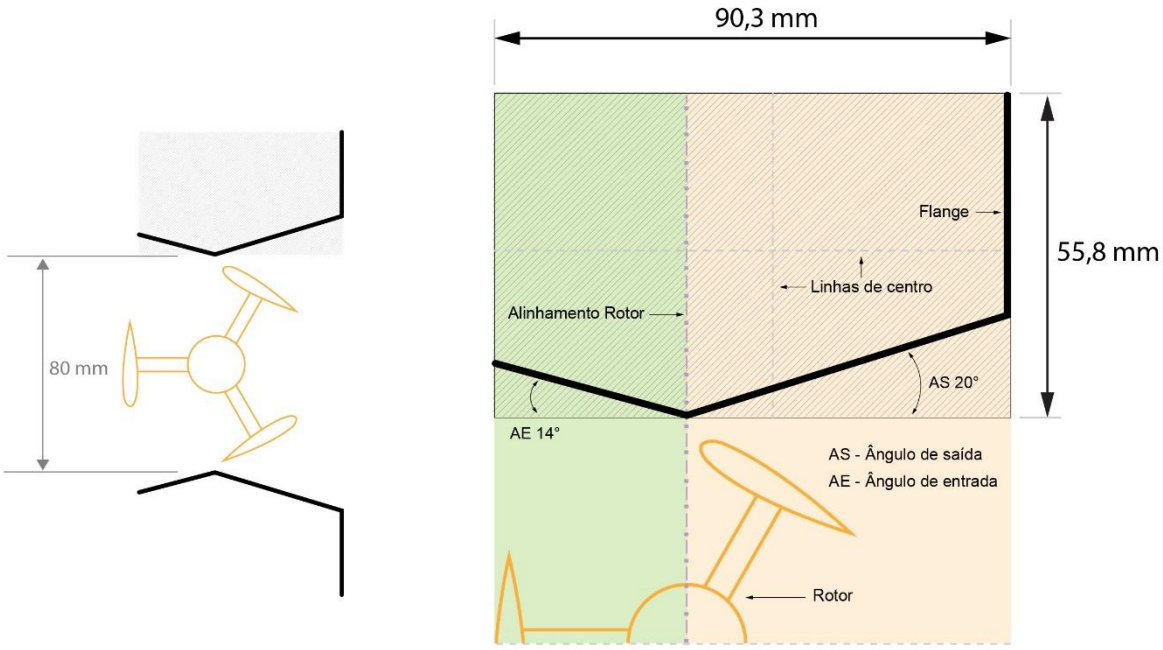
Difusor plano de ângulo semiaberto V1 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 4

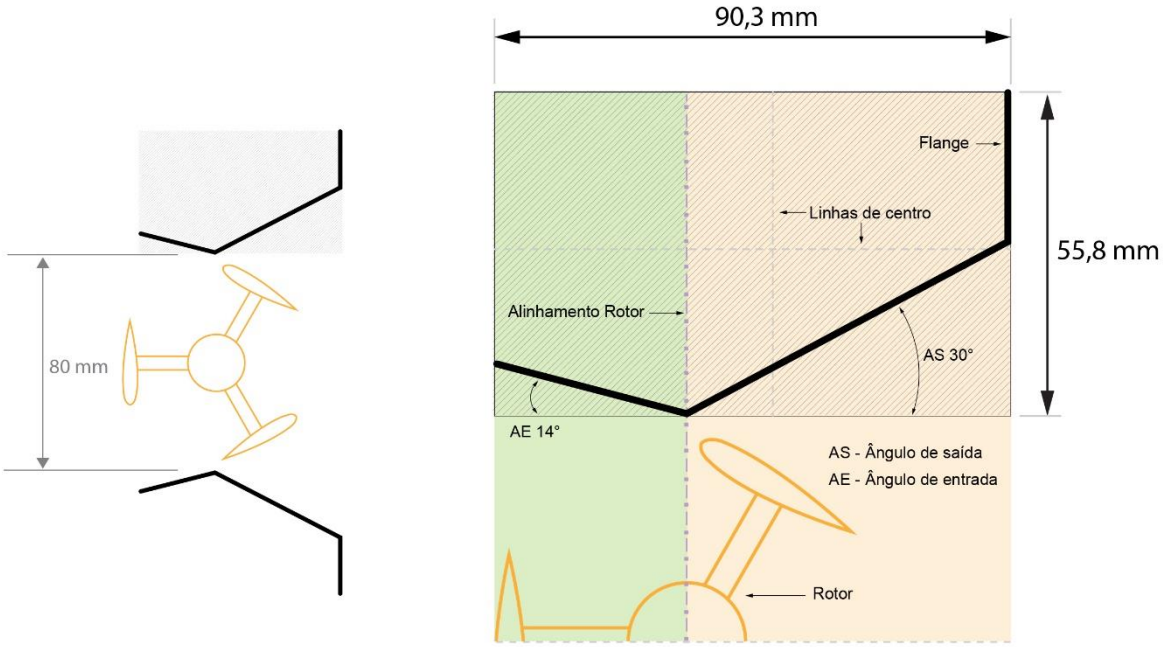
Difusor plano de ângulo semiaberto V2 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 5

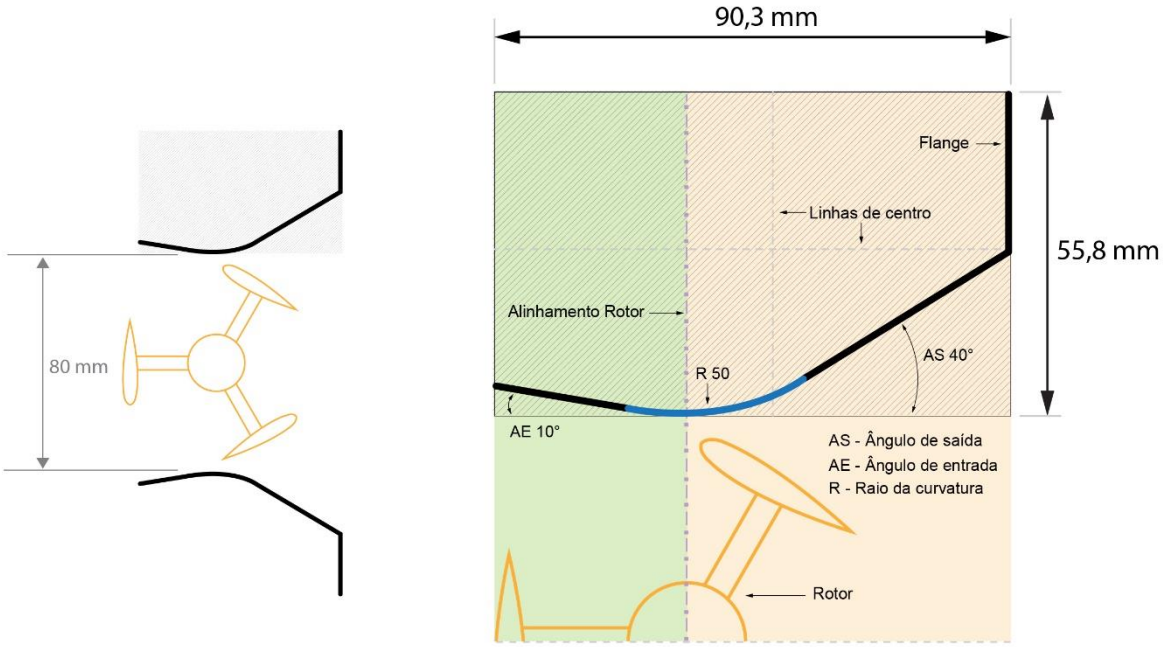
Difusor plano de ângulo semiaberto V3 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 6

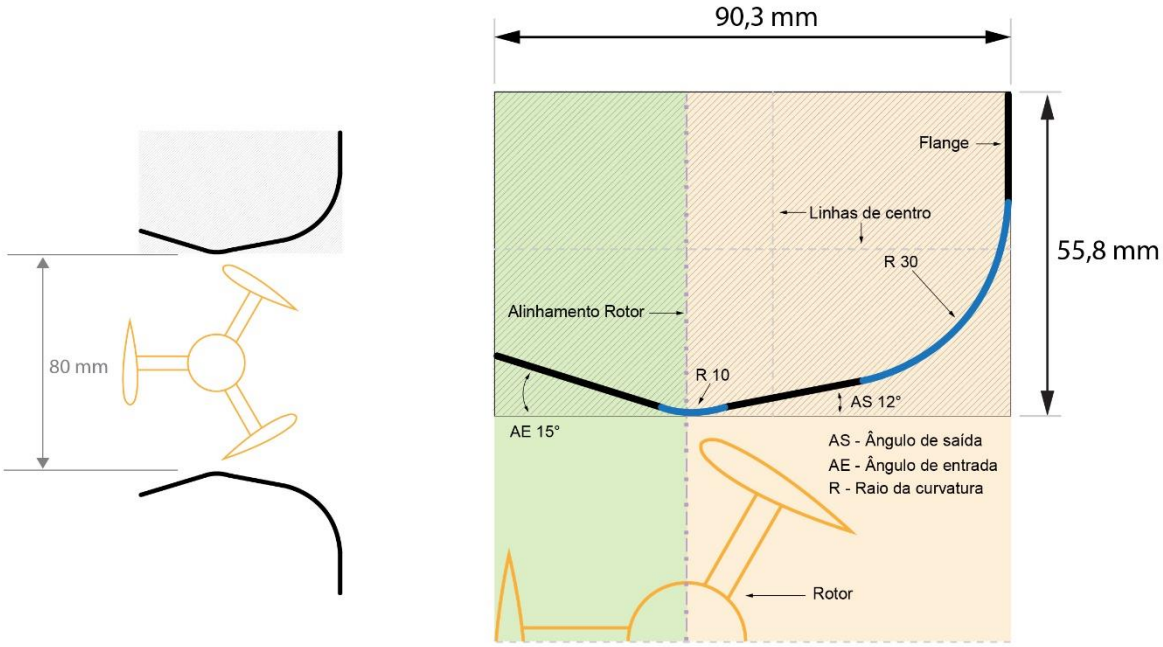
Difusor curvo de ângulo semiaberto V1 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 7

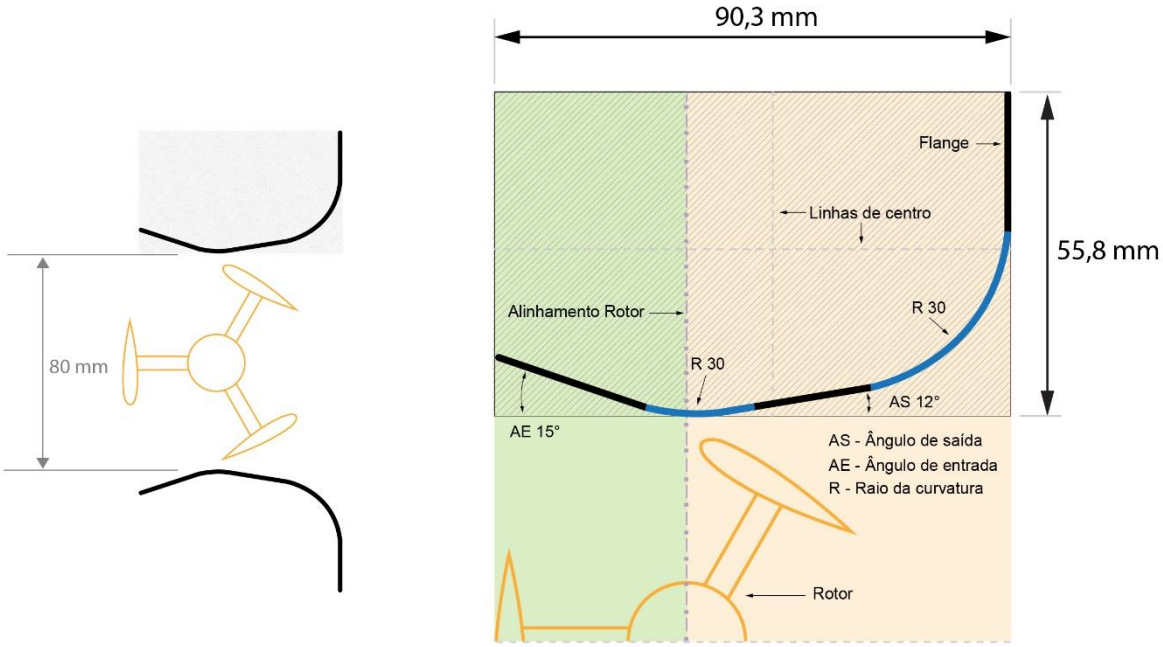
Difusor curvo de ângulo semiaberto V2 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 8

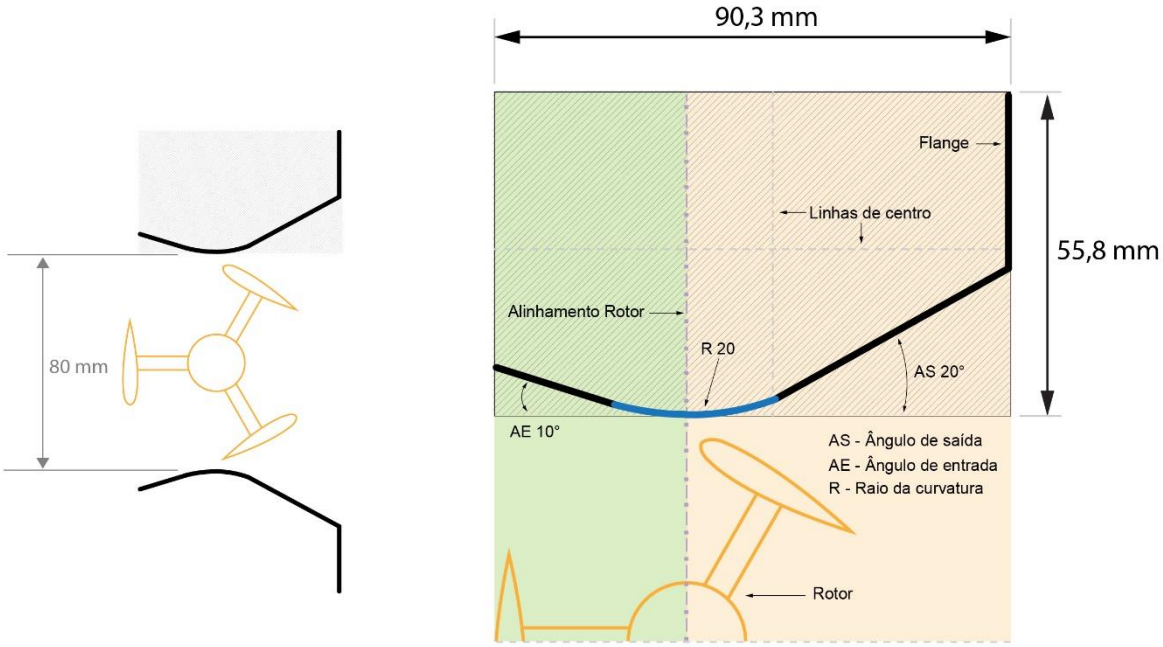
Difusor curvo de ângulo semiaberto V3 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 9

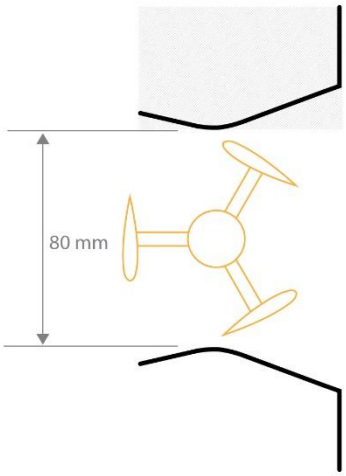
Difusor curvo de ângulo semiaberto V4 (medidas em milímetros)

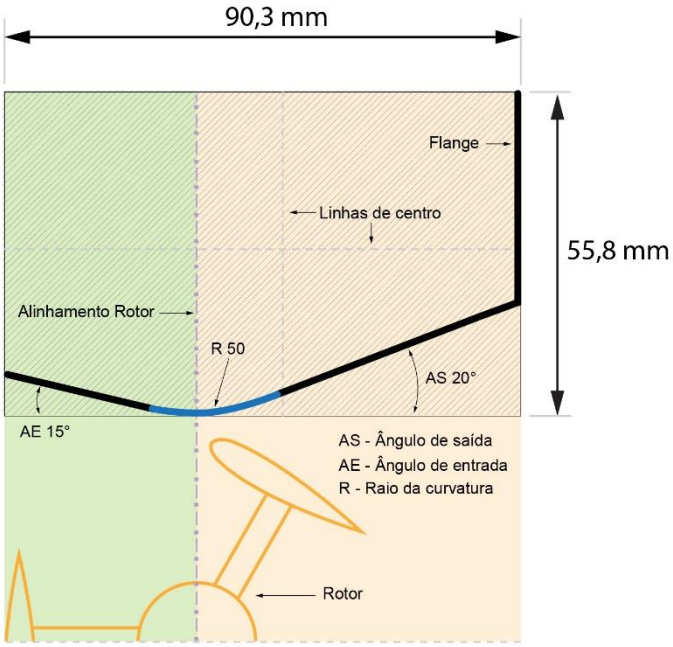


APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 10

Difusor curvo de ângulo semiaberto V5 (medidas em milímetros)

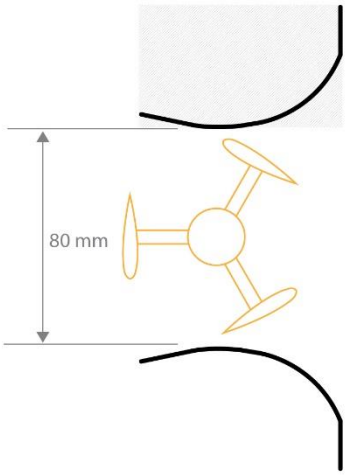


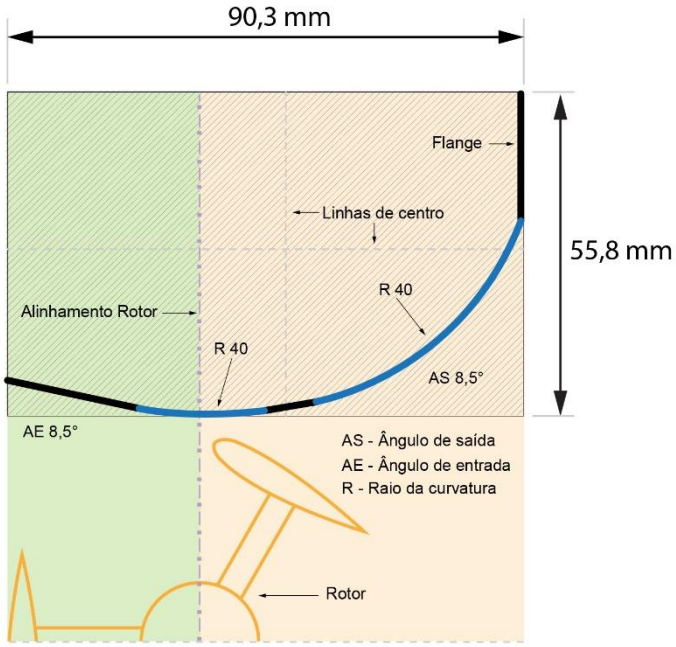


APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 11

Difusor curvo de ângulo semiaberto V6 (medidas em milímetros)

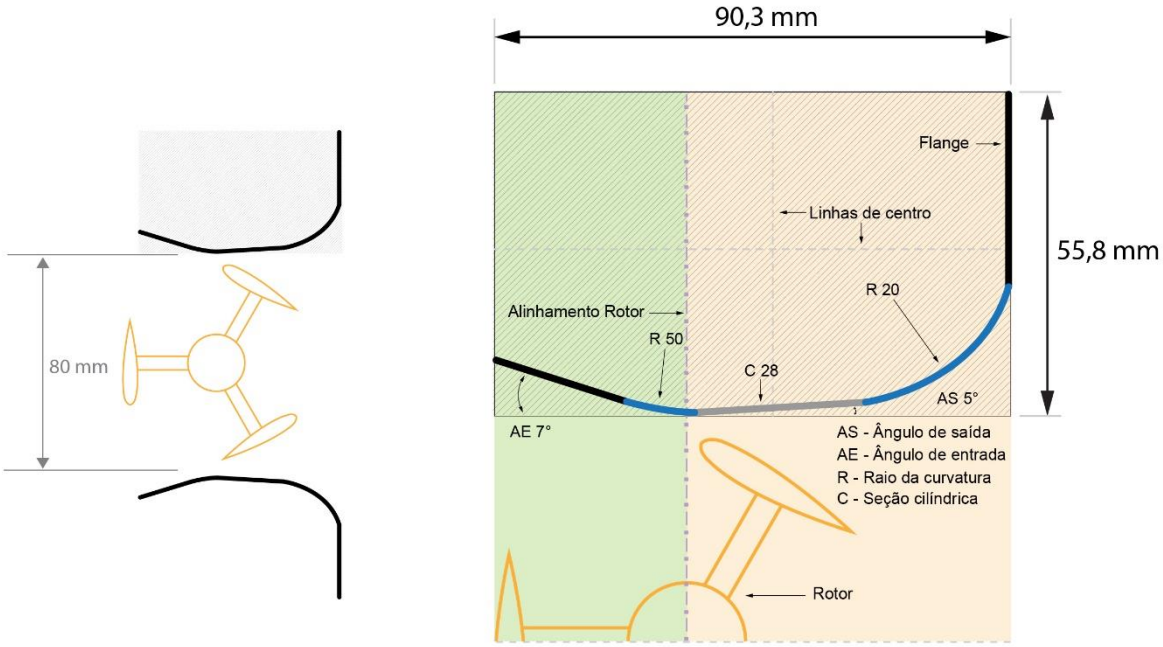




APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 12

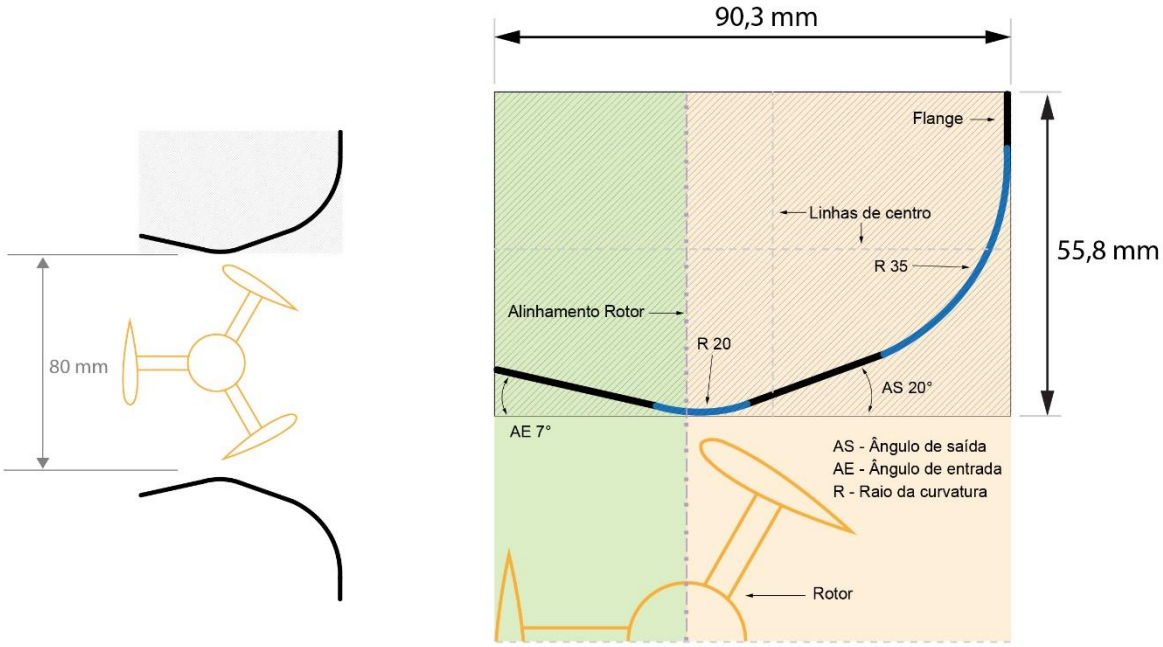
Difusor híbrido semi – divergente (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 13

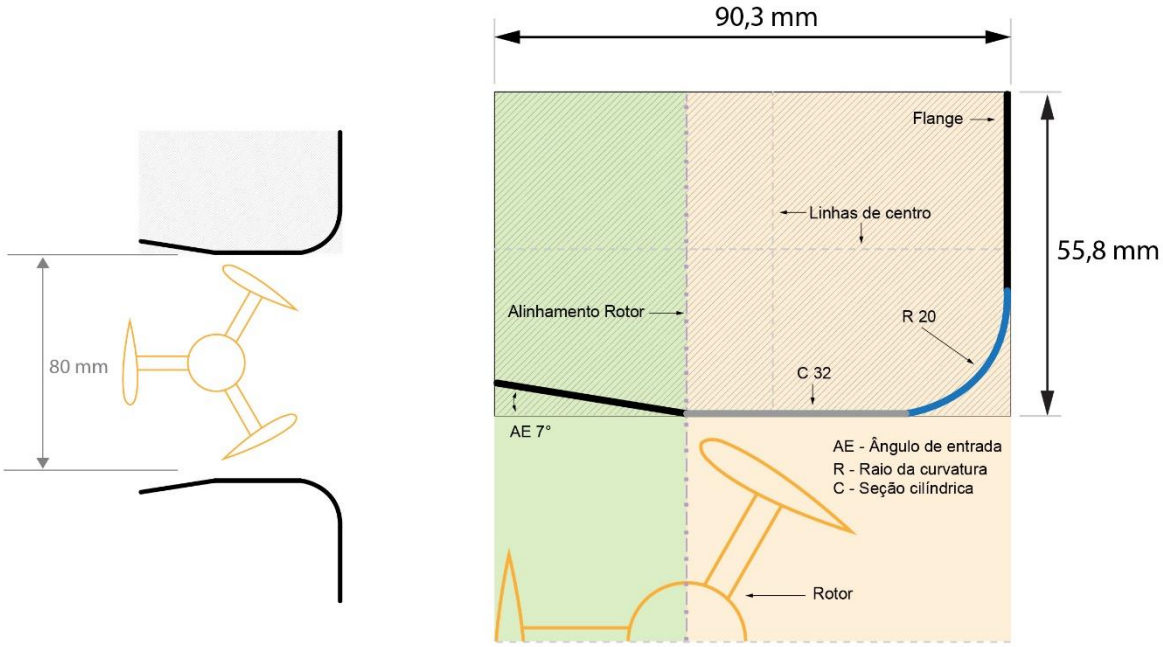
Difusor curvo de ângulo semiaberto V7 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 14

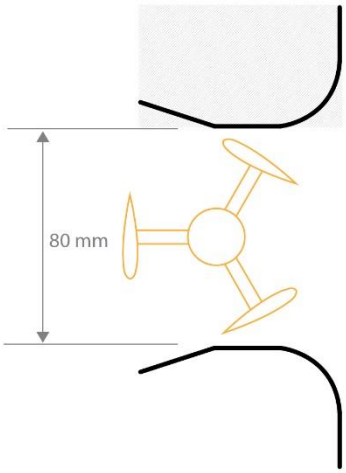
Difusor cilíndrico semi – divergente (medidas em milímetros)

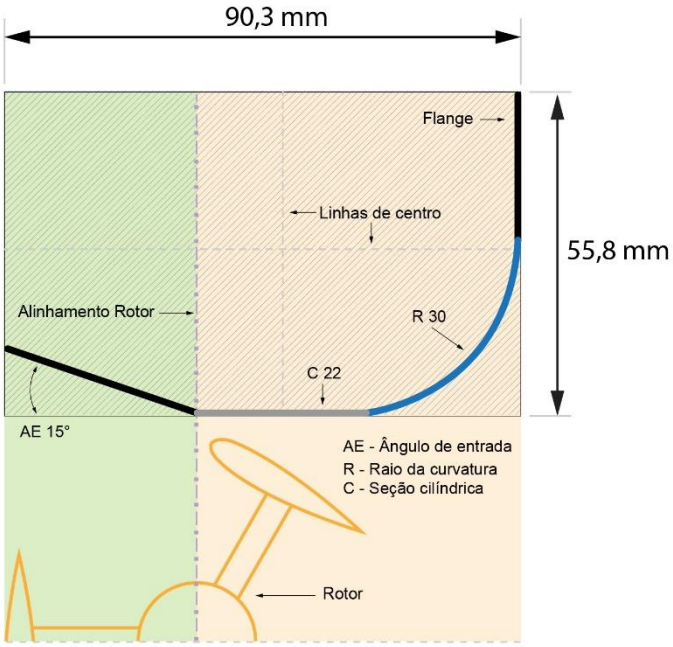


APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 15

Difusor cilíndrico semi – divergente (medidas em milímetros)

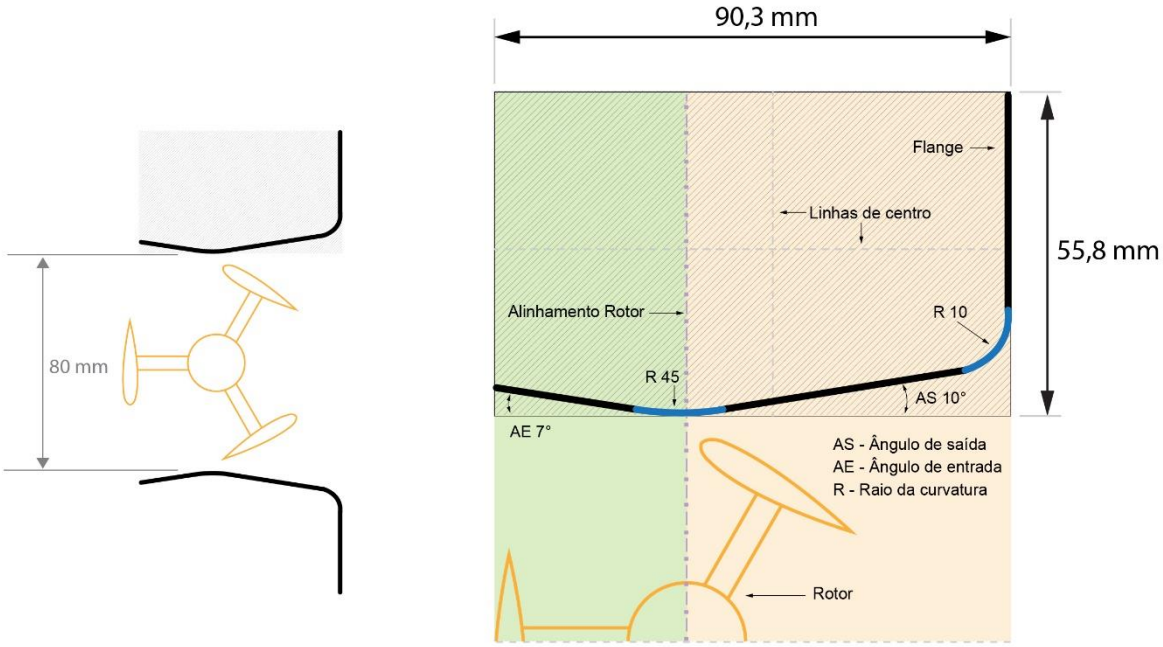




APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 16

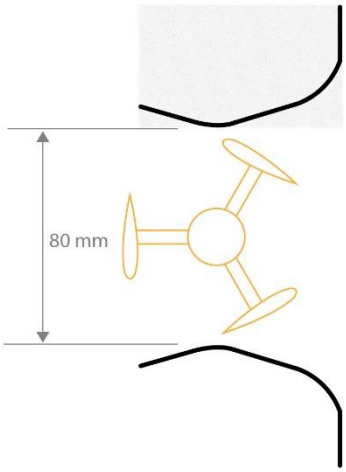
Difusor curvo de ângulo semiaberto V8 (medidas em milímetros)

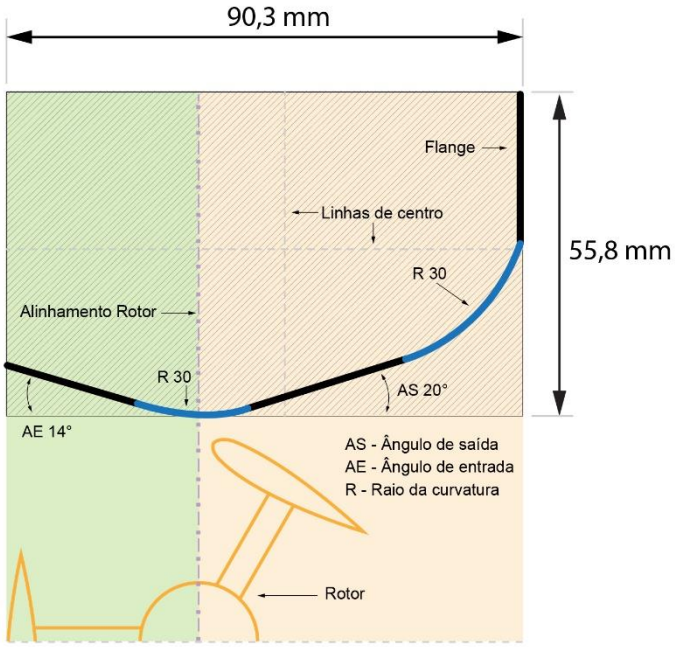


APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 17

Difusor curvo de ângulo semiaberto V9 (medidas em milímetros)

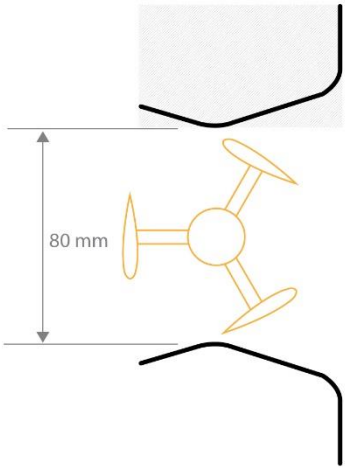


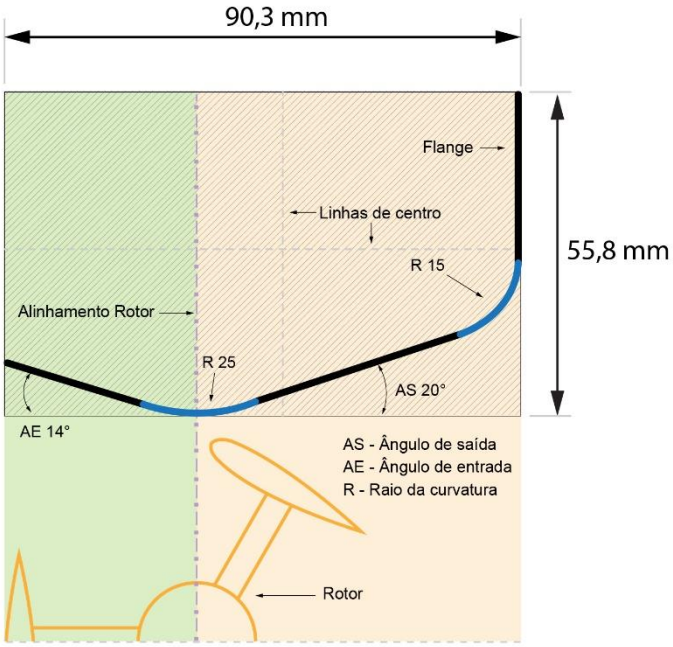


APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 18

Difusor curvo de ângulo semiaberto V10 (medidas em milímetros)

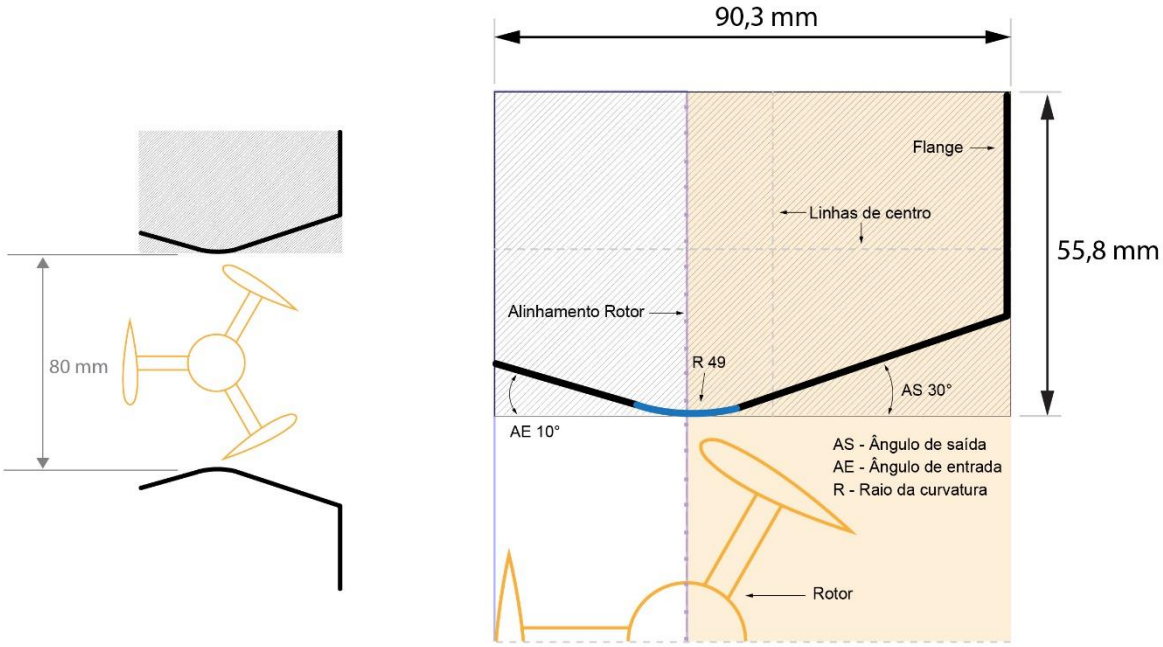




APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 19

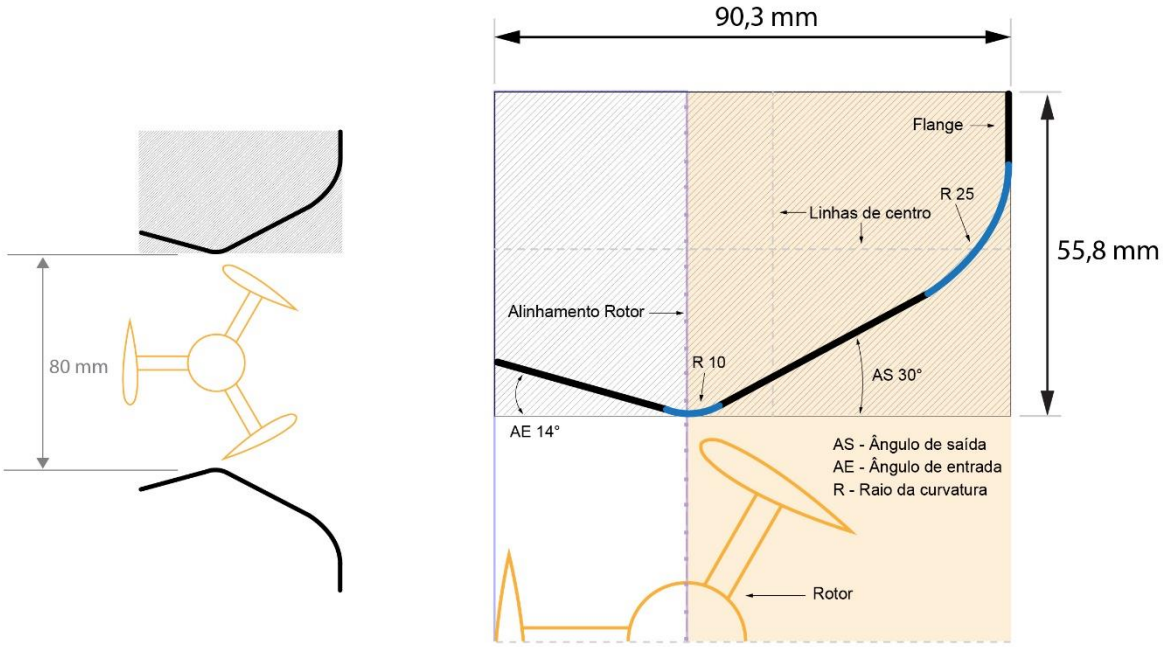
Difusor curvo de ângulo semiaberto V11 (medidas em milímetros)



APÊNDICE C

GEOMETRIA DOS DIFUSORES – MODELO 20

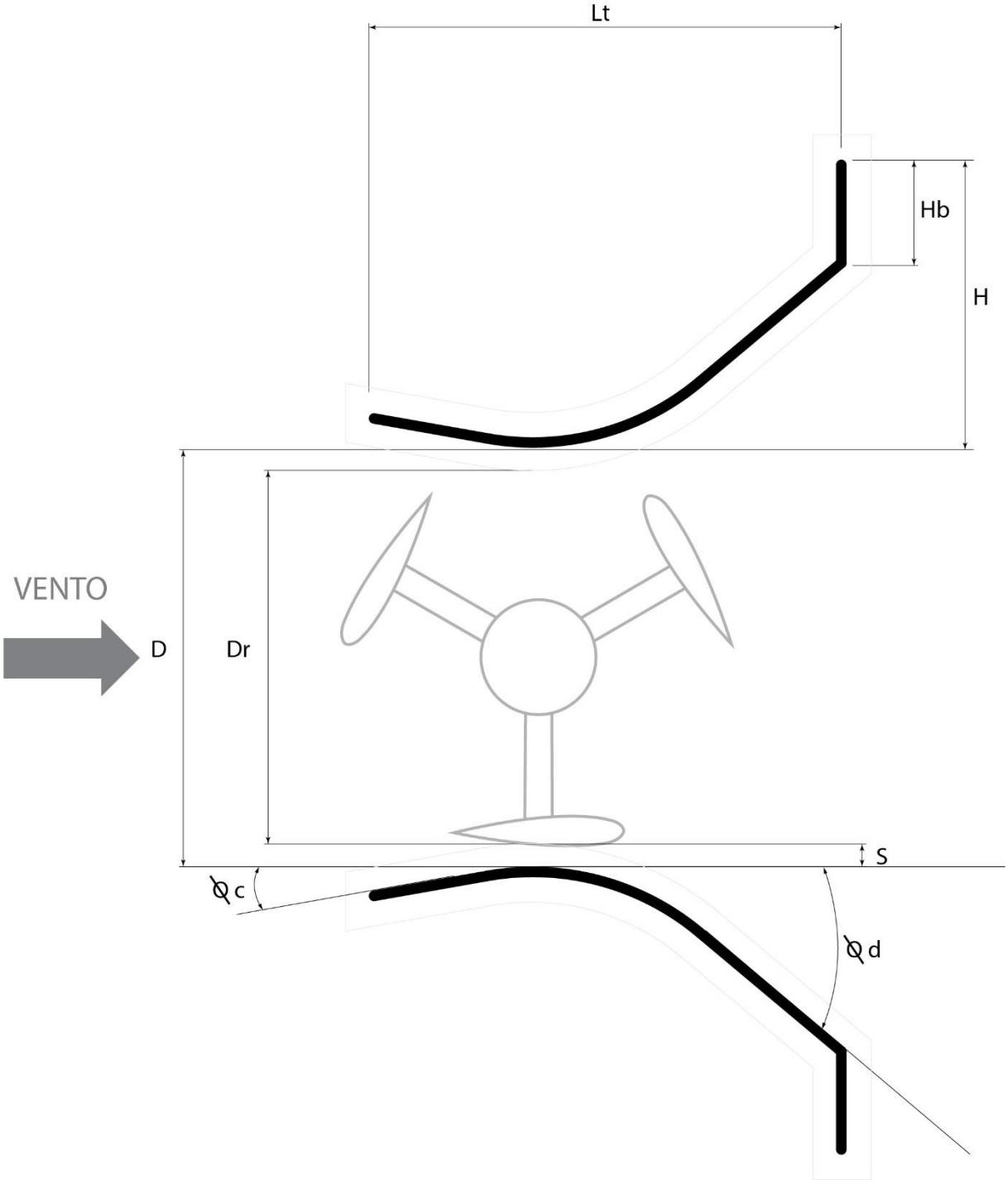
Difusor curvo de ângulo semiaberto V12 (medidas em milímetros)



APÊNDICE D

DIFUSOR MODELO 6 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V1* ***FINAL***

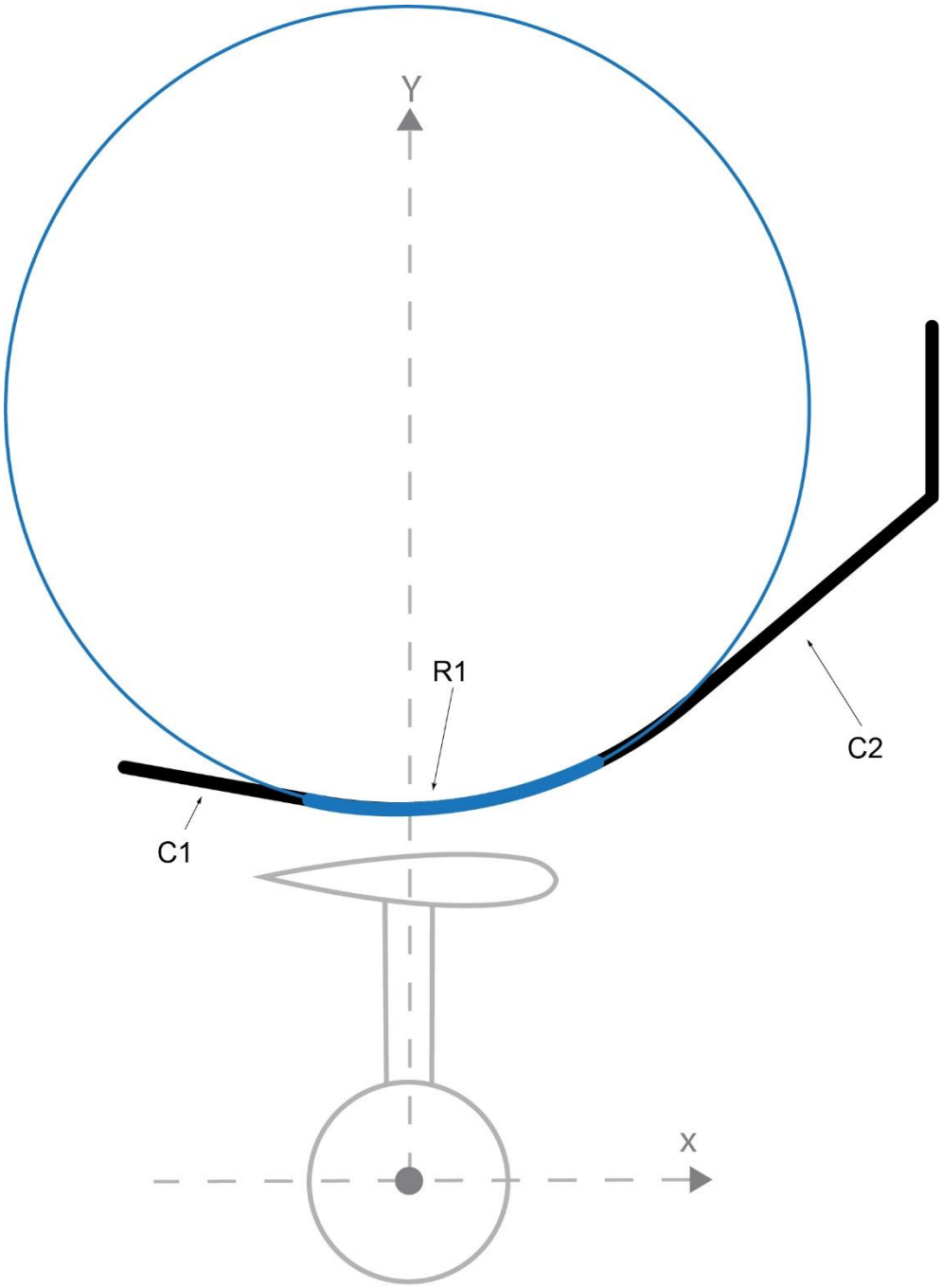
Desenhos e dimensionamentos (medidas em milímetros)



APÊNDICE D

DIFUSOR MODELO 6 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V1* ***FINAL***

Desenhos e dimensionamentos (medidas em milímetros)



APÊNDICE D

DIFUSOR MODELO 6 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V1* ***FINAL***

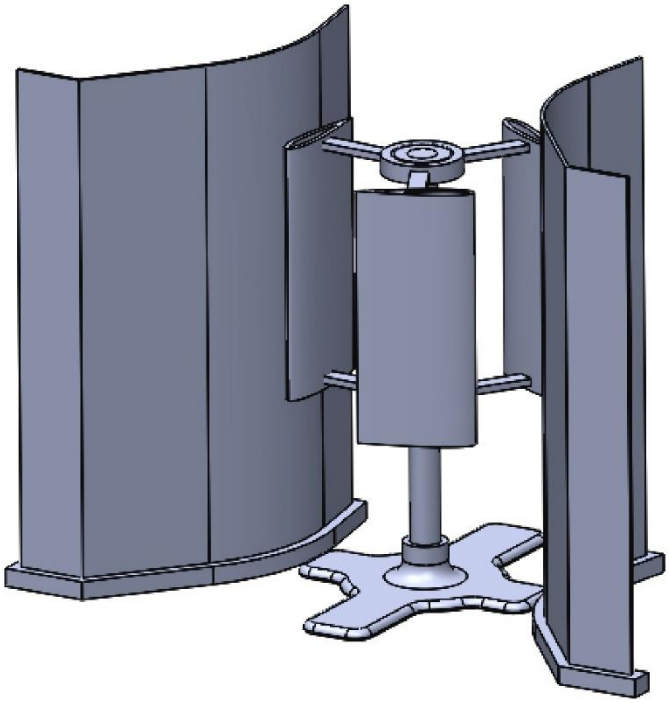
Desenhos e dimensionamentos (medidas em milímetros)

PARÂMETRO	SIGLA	DIMENSÃO
Distância entre os dois lados do difusor na garganta	D	80 mm
Diâmetro do rotor	Dr	70 mm
Altura do difusor	W	143,2 mm
Largura do difusor	H	558 mm
Comprimento do difusor	Lt	903 mm
Largura da flange	Hb	185 mm
Ângulo de entrada (convergente)*	α_c	10°
Ângulo de saída (divergente)*	α_d	40°
Afastamento da ponta	S	5 mm
Altura do rotor	Wr	70 mm
Tipo de pá		NACA 0024
Raio da curvatura de entrada	R1	50 mm
Comprimento seção linear de entrada	C1	220 mm
Comprimento seção linear de saída	C2	350 mm

APÊNDICE D

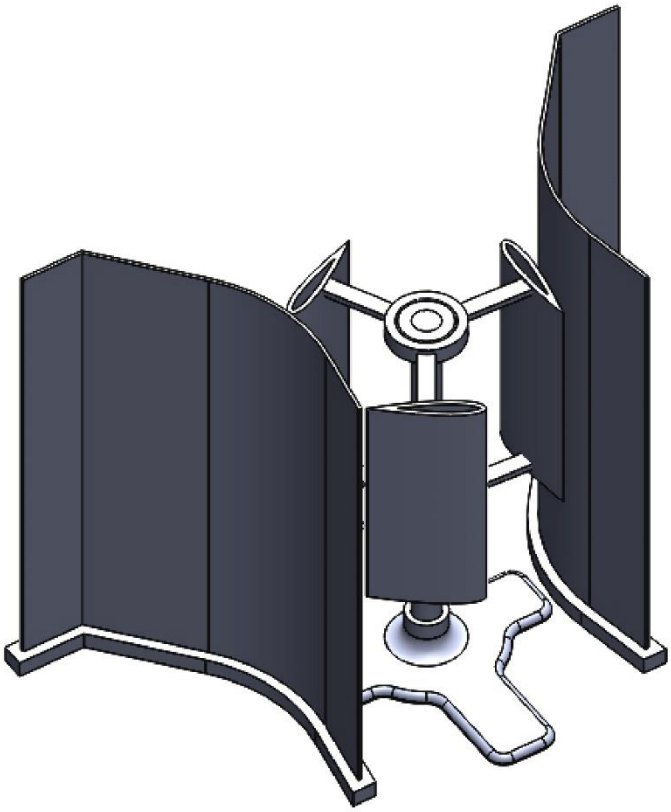
DIFUSOR MODELO 6 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V1* ***FINAL***

Vistas projetivas aplicadas.



VISTA PERSPECTIVA FRONTAL

Difusor acoplado em uma turbina eólica de microescala



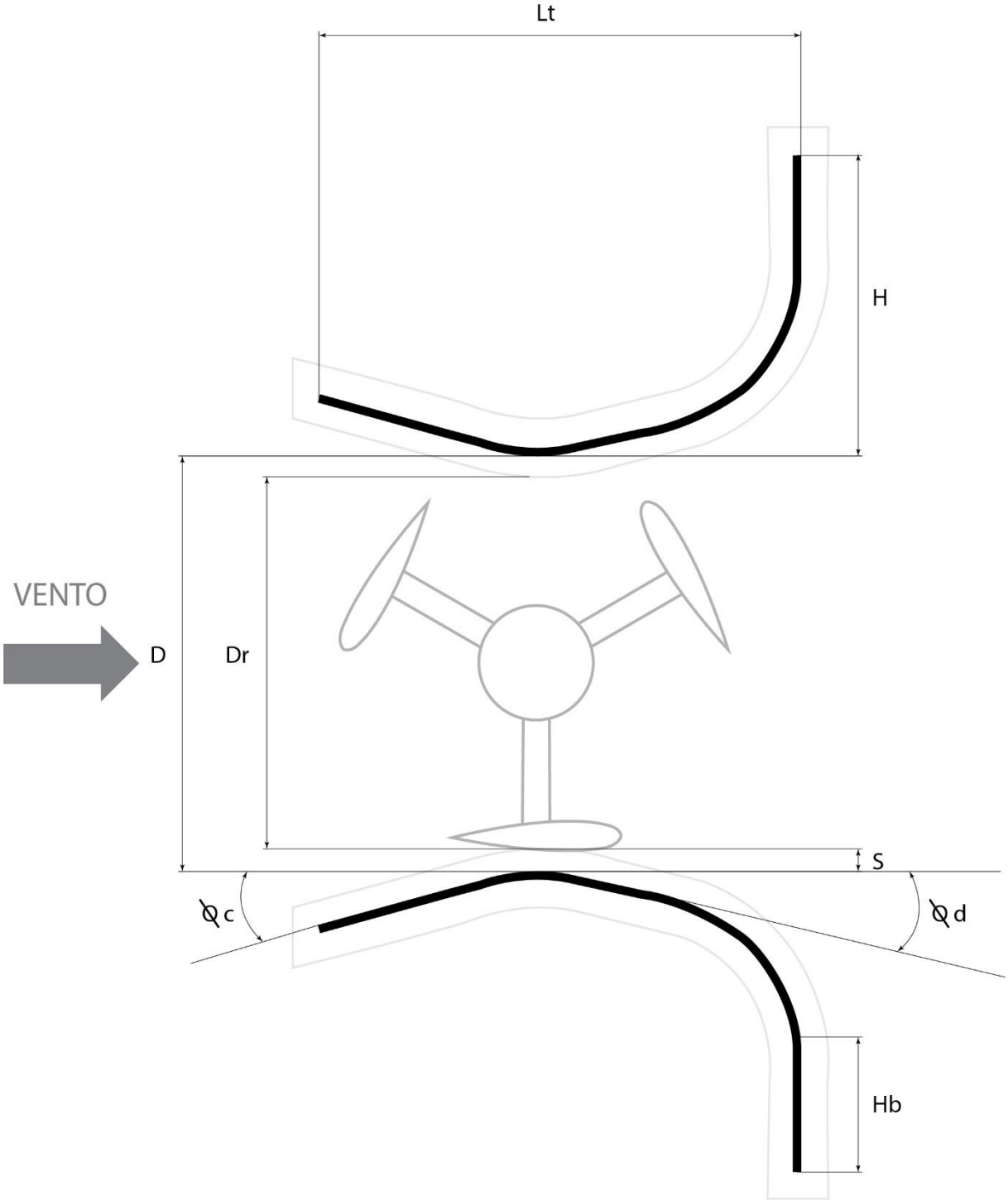
VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR

Difusor acoplado em uma turbina eólica de microescala

APÊNDICE E

DIFUSOR MODELO 8 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V3* ***FINAL***

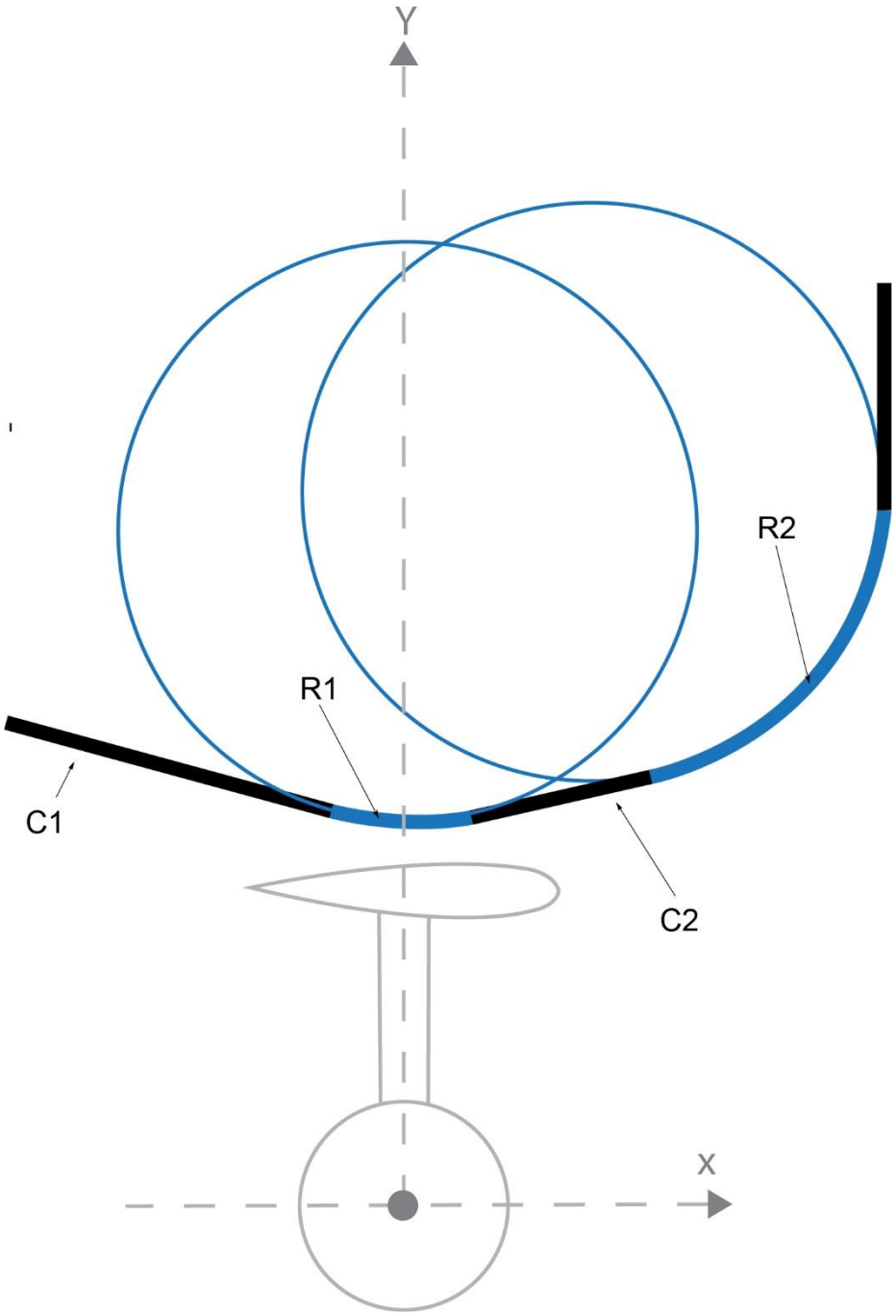
Desenhos e dimensionamentos (medidas em milímetros).



APÊNDICE E

DIFUSOR MODELO 8 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V3* ***FINAL***

Desenhos e dimensionamentos (medidas em milímetros).



APÊNDICE E

DIFUSOR MODELO 8 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V3* ***FINAL***

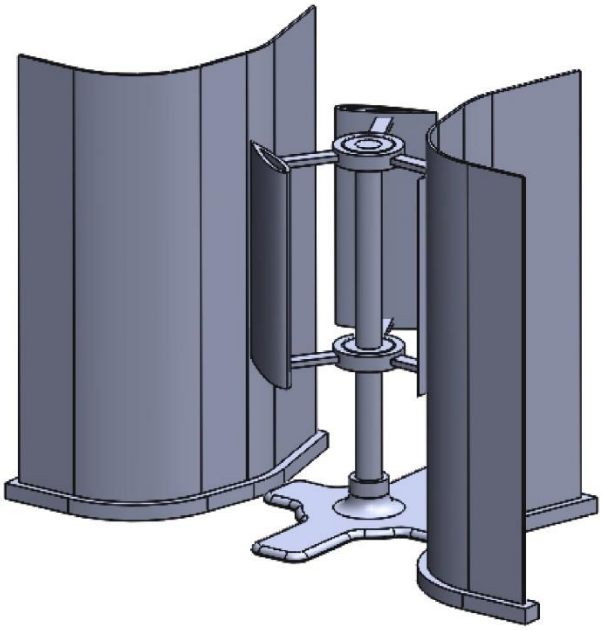
Desenhos e dimensionamentos (medidas em milímetros).

PARÂMETRO	SIGLA	DIMENSÃO
Distância entre os dois lados do difusor na garganta	D	80 mm
Diâmetro do rotor	Dr	70 mm
Altura do difusor	W	143,2 mm
Largura do difusor	H	558 mm
Comprimento do difusor	Lt	903 mm
Largura da flange	Hb	200 mm
Ângulo de entrada (convergente)*	α_c	15°
Ângulo de saída (divergente)*	α_d	12°
Afastamento da ponta	S	5 mm
Altura do rotor	Wr	70 mm
Tipo de pá		NACA 0024
Raio da curvatura de entrada	R1	30 mm
Raio da curvatura de saída	R2	30 mm
Comprimento seção linear de entrada	C1	312 mm
Comprimento seção linear de saída	C2	184 mm

APÊNDICE E

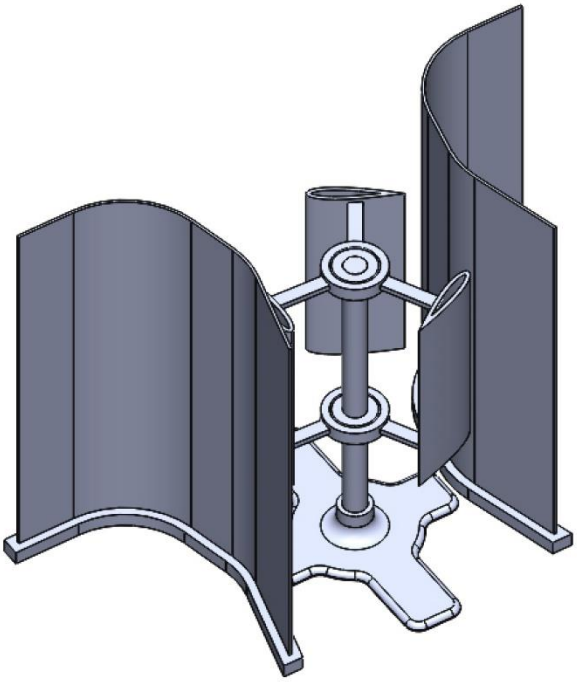
DIFUSOR MODELO 8 - *Difusor curvo de ângulo semiaberto V3* ***FINAL***

Vistas projetivas aplicadas.



VISTA PERSPECTIVA FRONTAL

Difusor acoplado em uma turbina eólica de microescala



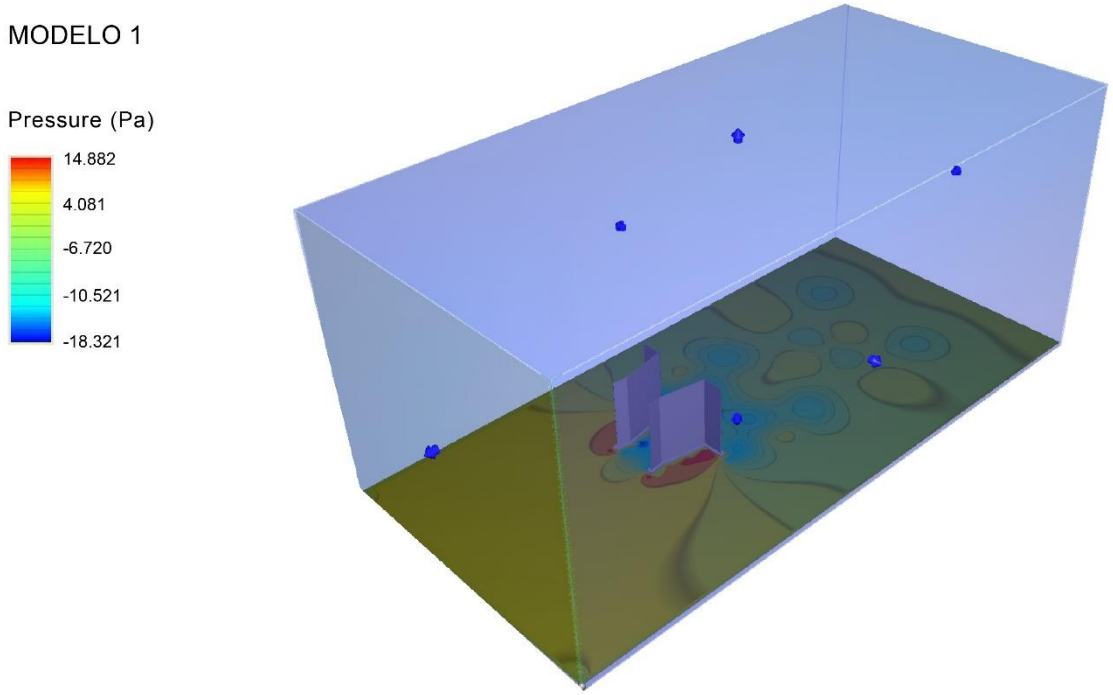
VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR

Difusor acoplado em uma turbina eólica de microescala

APÊNDICE F

Configurações do posicionamento do plano bidimensional nas simulações em túnel de vento virtual no software Autodesk Flow Design.

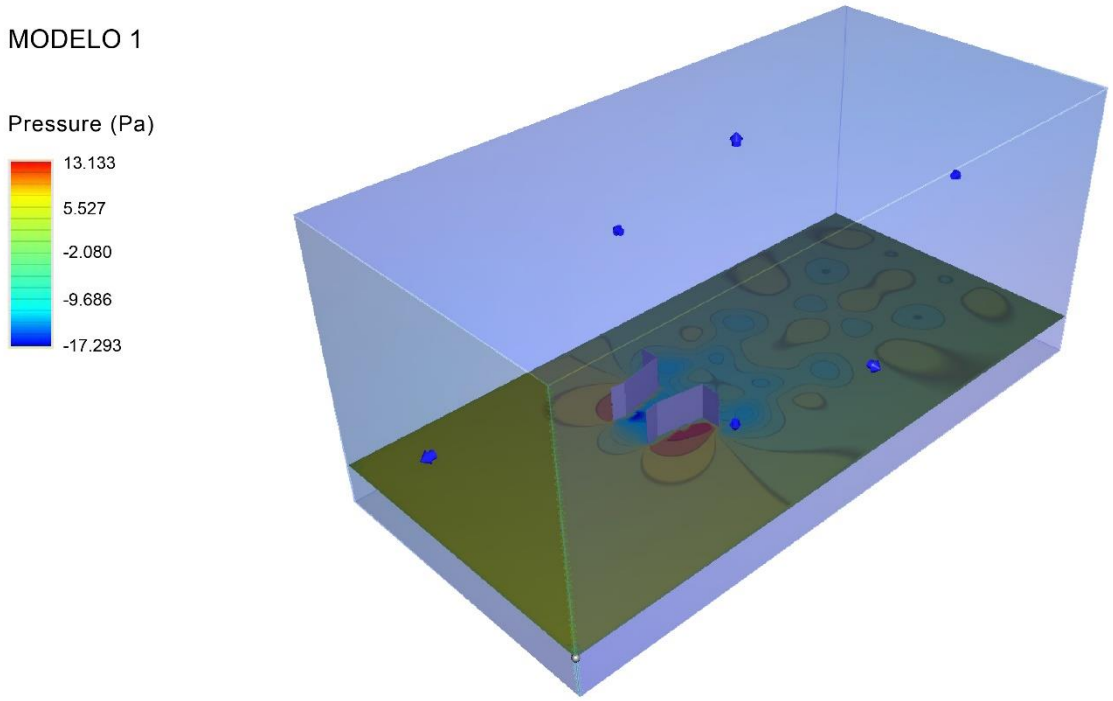
Modelo 01 – Plano na Base.



APÊNDICE F

Configurações do posicionamento do plano bidimensional nas simulações em túnel de vento virtual no software Autodesk Flow Design.

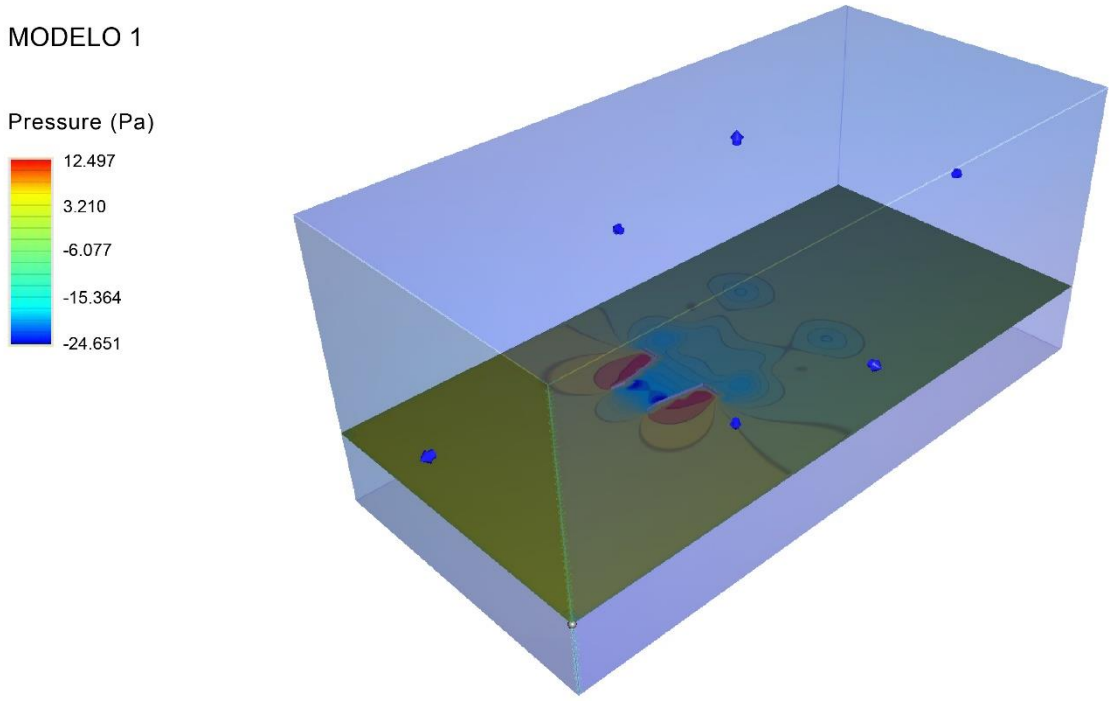
Modelo 01 – Plano na região central (meio do difusor).



APÊNDICE F

Configurações do posicionamento do plano bidimensional nas simulações em túnel de vento virtual no software Autodesk Flow Design.

Modelo 01 – Plano no Topo.



Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).