



**PGDESIGN** | Programa de Pós-Graduação  
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Fernando Silveira Ximenes

**DESIGN DE DIFUSOR AERODINÂMICO COMPACTO  
PARA UMA TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre  
2018

**FERNANDO SILVEIRA XIMENES**

**DESIGN DE DIFUSOR AERODINÂMICO COMPACTO  
PARA UMA TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA**

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  
2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Ximenes, Fernando Silveira  
Design de difusor aerodinâmico compacto para uma  
turbina eólica de pequena escala / Fernando  
Silveira Ximenes. -- 2018.  
183 f.  
Orientador: Luis 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, 2018.

1. Design. 2. Difusor Aerodinâmico. 3. Energia  
Eólica. 4. Turbina eólica de pequena escala. 5. Túnel  
de vento. I. Cândido, Luis Henrique Alves, orient.  
II. Título.

**FERNANDO SILVEIRA XIMENES**

**DESIGN DE DIFUSOR AERODINÂMICO COMPACTO PARA UMA  
TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA**

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, 02 de maio de 2018

---

**Prof. Dr. Régio Pierre da Silva**

Coordenador do Programa de Pós Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. Luís Henrique Alves Cândido**

Orientador

PgDesign - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Prof. Dr. Régio Pierre da Silva**

PgDesign - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco**

PgDesign - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Prof. Dra. Mariana Pohlmann de Oliveira**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico esta dissertação à memória de minha mãe,  
que partiu antes desta ser finalizada.

*Requiescat in pace.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores, colegas e amigos do LdSM, em especial à colega de orientação Suzane Miritz, e também, ao professor Dr. Fábio Pinto da Silva.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Design (PgDesign), em especial, aos membros das bancas de qualificação e defesa, Prof. Dr. Régio Pierre da Silva, Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco e Prof. Dr<sup>a</sup>. Mariana Pohlmann de Oliveira.

Agradeço aos amigos da graduação em Design da UFRGS, em especial para, Aline Kauffmann, Maria Victória Pasini e Jemvoni Wu pela ajuda, alegria e bons momentos que ficarão guardados com carinho.

Aos amigos da Maquetaria e Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura da UFRGS, em especial para Osmario dos Santos Ribeiro (Seu Osmario), pelo suporte e amizade durante a execução desta pesquisa.

Um agradecimento especial à Eloisa Almeida, da secretaria do PgDesign, pela amizade e apoio sempre que precisei.

Um agradecimento *ab imo pectore* ao colega e amigo *avis rara* Samuel Benison da Costa Campos, que torce sempre pelo meu sucesso acadêmico e pessoal.

Uma menção honrosa ao meu irmão de coração Marcelo Cezar da Silva, que sempre esteve presente nos momentos mais alegres e difíceis durante esta minha trajetória.

Agradecimentos desenhísticos para a inquieta Fernanda Fonseca Serrate e ao guru Daniel Quintana Sperb pela amizade, lealdade e parceria de ambos durante todos estes anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido pela confiança e liberdade criativa para a execução desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que através do apoio financeiro, deu suporte à minha pesquisa.

De forma geral, um agradecimento fraterno à todos os amigos, professores e colegas que dividiram comigo o seu conhecimento e amizade, não caberia aqui o nome de todos que foram importantes, mas a lembrança destes estarão em um lugar onde nunca serão esquecidos, estarão para sempre no coração.

Por fim, à todos, *pace et sapere*.

*“The answer, my friend, is blowing in the wind”*

Bob Dylan

## RESUMO

XIMENES, Fernando S. **Design de difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de pequena escala**. Porto Alegre, 2018. 183 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, 2018

Este trabalho tem como proposta desenvolver um difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de pequena escala, objetivando alcançar um melhor *start* rotacional (menor torque de partida para rotacionar) em baixas velocidades de vento. Um difusor é uma estrutura em forma de aro envolta ao rotor da turbina eólica, sua função é amplificar a captação e aceleração do vento, explorando os efeitos aerodinâmicos das zonas de vórtices de baixa pressão na saída do difusor. O estudo concentrar-se-á na manipulação da geometria dos difusores, analisando como seu design impacta no seu comportamento aerodinâmico impacta na capacidade do difusor equacionar as zonas de alta e baixa pressão ao longo de sua estrutura, essa relação é determinante para o efeito aerodinâmico que acelera o escoamento de ar, resultando em um *start* rotacional em baixas velocidade de vento. O ponto de partida para este trabalho são os estudos desenvolvidos por Ohya *et al.* (2010) sobre difusores compactos-flangeados (*compact-type brimmed diffuser*) para turbinas eólicas, denominado *Wind-lens Technology*. Para alcançar os objetivos, esta pesquisa vai utilizar simulações por CFD com *software* de túnel de vento virtual e ensaios experimentais em túnel de vento físico para avaliar o comportamento dinâmico (turbina + difusor). Foram desenvolvidas dezenove geometrias a partir de uma área construtiva padronizada para o design de difusores. Desenvolveu-se também, a partir dos resultados encontrados, um MFI (microseparador de fluxo interno), que consiste em uma estrutura adicional com função de potencializar as zonas de vórtices (baixa pressão) no plano de saída do escoamento de ar dos difusores. Os resultados mostraram que a manipulação da geometria do difusor produziu resultados promissores em comparação com o modelo de referência, alcançando em algumas geometrias de difusores um melhor *start* rotacional. O MFI mostrou-se eficaz para potencializar as zonas de baixa pressão e melhorou o *start* rotacional. Ao final, definiu-se dois modelos de difusores e suas respectivas versões com MFI como as melhores opções para o *start* rotacional.

**Palavras-chave:** Design; difusor aerodinâmico; turbina eólica de pequena escala; túnel de vento.

## ABSTRACT

XIMENES, Fernando S. (2018). **Compact-type diffuser design for small-scale wind turbine**. Master Thesis. Federal University of Rio Grande do Sul-UFRGS, School of Engineering, Faculty of Architecture, Graduate Program in Design, Porto Alegre, Brazil, 2018

This work aims to develop a compact wind turbine for a turbine and a small scale, aiming at a better rotational start at low wind speeds (lower starting torque to rotate). A diffuser is a rim-shaped structure wrapped around the wind turbine rotor, its function is to amplify the wind uptake and acceleration, exploiting the aerodynamic effects of the low-pressure vortex zones at the diffuser outlet. The study will focus on the manipulation of the diffuser geometry, analyzing how its design impacts on its aerodynamic behavior, especially on the diffuser's ability to equate the high and low pressure zones along its structure, this relation is decisive for the aerodynamic effect that accelerates the air flow, resulting in a rotational start at low wind speeds. The basis for this work are studies developed by Ohya *et al.* (2010) on compact-flanged diffusers for wind turbines, called Wind-lens Technology. To achieve the objectives, this research will use CFD simulations with virtual wind tunnel software and experimental tests in physical wind tunnel to evaluate the dynamic behavior (turbine + diffuser). Nineteen geometries were developed from a standardized design area for the design of diffusers. An MFI (internal flow microseparator) has also been developed, which is an additional structure whose function is to potentiate the low pressure zones of the diffusers. The results showed that the manipulation of the diffuser geometry produced promising results in comparison to the reference model, reaching in some conditions superior results in RPM and initial start. The MFI proved to be effective in boosting the low pressure zones and improved the initial start. At the end, two models of diffusers and their respective versions with MFI were defined as the best options for the initial start.

**Keywords:** Design; aerodynamic diffuser; small-scale wind turbine; wind tunnel.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Turbina eólica do tipo DAWT. ....	17
<b>Figura 2</b> - Evolução das turbinas eólicas (diâmetro do rotor e potência instalada)...	27
<b>Figura 3</b> - Tipos de turbinas eólicas por orientação do eixo do rotor. ....	29
<b>Figura 4</b> - Modelos de TEEV mais conhecidos.....	30
<b>Figura 5</b> - Componentes de uma turbina eólica.....	31
<b>Figura 6</b> - Rao's Micro Windmill e Adwen AD-180.....	33
<b>Figura 7</b> - Turbina DAWT da empresa Olgin e detalhe estrutural do difusor. ....	35
<b>Figura 8</b> - Representação esquemática dos tipos mais conhecidos de difusores. ...	36
<b>Figura 9</b> - Funcionamento aerodinâmico de um difusor. ....	37
<b>Figura 10</b> - Difusor flangeado ( <i>flanged diffuser</i> ). ....	38
<b>Figura 11</b> - Funcionamento aerodinâmico de um difusor flangeado.....	39
<b>Figura 12</b> - Diferença entre difusores e a razão entre seus tamanhos. ....	40
<b>Figura 13</b> - Difusor compacto-flangeado <i>Wind-Lens</i> . ....	40
<b>Figura 14</b> - Exemplo de pós-processamento CFD.....	43
<b>Figura 15</b> - Seções típicas de um túnel de vento.....	45
<b>Figura 16</b> - Área de trabalho do Flow Design. ....	47
<b>Figura 17</b> - Classificação da pesquisa.....	50
<b>Figura 18</b> - Diagrama da metodologia básica da pesquisa.....	51
<b>Figura 19</b> - Relação entre objetivos da pesquisa e métodos de trabalho. ....	52
<b>Figura 20</b> - Diagrama básico do processo de desenvolvimento da pesquisa.....	57
<b>Figura 21</b> - Perfis seccionais de difusores <i>Wind-Lens</i> .....	60
<b>Figura 22</b> - Configurações técnicas de um difusor <i>Wind-Lens</i> . ....	60
<b>Figura 23</b> - Perfis NACA 6409 e NACA 1412. ....	62
<b>Figura 24</b> - Configurações técnicas de um perfil NACA e de um rotor padrão. ....	62
<b>Figura 25</b> - Variáveis selecionadas.....	64
<b>Figura 26</b> - Perfil geométrico do difusor Modelo 1. ....	67
<b>Figura 27</b> - Retângulo harmônico Penton.....	68
<b>Figura 28</b> - Parâmetros de configuração da área de construção da geometria. ....	69
<b>Figura 29</b> - Geometrias de difusores desenvolvidas para esta pesquisa. ....	70
<b>Figura 30</b> - Tipologia geral das geometrias desenvolvidas.....	71
<b>Figura 31</b> - Modelagem tridimensional de uma geometria de difusor. ....	72
<b>Figura 32</b> - Esquema visual da configuração 2D do túnel de vento virtual. ....	74
<b>Figura 33</b> - Simulação 2D no plano de pressão no difusor Modelo 1. ....	75
<b>Figura 34</b> - Gráfico de resultados das simulações nas alternativas geradas.....	76
<b>Figura 35</b> - Geometrias selecionadas.....	77
<b>Figura 36</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 2. ....	78

<b>Figura 37</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 3. ....	79
<b>Figura 38</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 5. ....	80
<b>Figura 39</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 6. ....	81
<b>Figura 40</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 7. ....	82
<b>Figura 41</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 8. ....	82
<b>Figura 42</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 11. ....	83
<b>Figura 43</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 15. ....	84
<b>Figura 44</b> - Simulação de pressão no difusor Modelo 16. ....	85
<b>Figura 45</b> - Configuração do MFI com perfil horizontal. ....	89
<b>Figura 46</b> - Configuração do MFI vertical. ....	89
<b>Figura 47</b> - Configuração do MFI semi-circular. ....	90
<b>Figura 48</b> - Geometrias selecionadas com MFI aplicado. ....	91
<b>Figura 49</b> - Simulação de pressão com difusor modelo 6 com MFI-H. ....	92
<b>Figura 50</b> - Simulação de pressão com difusor modelo 6 com MFI-V. ....	93
<b>Figura 51</b> - Simulação de pressão com difusor modelo 6 com MFI-D. ....	94
<b>Figura 52</b> - Simulação de pressão com difusor modelo 11 com MFI-H. ....	95
<b>Figura 53</b> - Simulação de pressão com difusor modelo 11 com MFI-V. ....	96
<b>Figura 54</b> - Simulação de pressão com difusor modelo 11 com MFI-D. ....	97
<b>Figura 55</b> - Componentes da TEPE-01. ....	102
<b>Figura 56</b> - Detalhe do encaixe do suporte e do difusor na Turbina-01. ....	103
<b>Figura 57</b> - Detalhe do encaixe do suporte e do difusor na TEPE-01. ....	104
<b>Figura 58</b> - Detalhes técnicos adicionais para prototipação dos difusores. ....	105
<b>Figura 59</b> - Configurações utilizadas no <i>software</i> CLONEGEN 3D. ....	106
<b>Figura 60</b> - Impressão 3D do difusor Modelo 3. ....	107
<b>Figura 61</b> - TEPE-01 e os difusores manufacturados em impressora 3D. ....	107
<b>Figura 62</b> - Túnel de vento do LdSM-UFRGS. ....	108
<b>Figura 63</b> - Anemômetro digital e tacômetro utilizado nos experimentos. ....	109
<b>Figura 64</b> - Configuração da seção de testes do túnel de vento. ....	110
<b>Figura 65</b> - TEPE-01 posicionada na seção de testes do túnel de vento. ....	111

## LISTA DE QUADROS

**Quadro 1** - Classificação das turbinas eólicas de pequena escala por autor. ....34

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classes de tamanho de turbinas eólicas. ....	31
<b>Tabela 2</b> - Valores de configuração para um difusor <i>Wind-Lens</i> . ....	61
<b>Tabela 3</b> - Valores de configuração para um difusor <i>Wind-Lens</i> de referência. ....	66
<b>Tabela 4</b> - Comparativos de pressão em Pascal (Pa).....	86
<b>Tabela 5</b> - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 1. ....	87
<b>Tabela 6</b> - Comparativos de pressão em Pascal (Pa) em relação ao Modelo 6. ....	98
<b>Tabela 7</b> - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 6. ....	98
<b>Tabela 8</b> - Comparativos de pressão em Pascal (Pa) em relação ao Modelo 11. ....	99
<b>Tabela 9</b> - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 11. ....	99
<b>Tabela 10</b> - Comparativos de pressão em Pascal (Pa) em relação ao Modelo 1. ...	100
<b>Tabela 11</b> - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 1. ....	100
<b>Tabela 12</b> - Valores do <i>start</i> rotacional nos difusores sem MFI. ....	112
<b>Tabela 13</b> - Valores do <i>start</i> rotacional nos difusores com MFI. ....	112
<b>Tabela 14</b> - Variação percentual do <i>start</i> rotacional dos difusores sem MFI. ....	113
<b>Tabela 15</b> - Variação percentual do <i>start</i> rotacional dos difusores com MFI. ....	114
<b>Tabela 16</b> - Valores das RPM nos difusores sem MFI.....	114
<b>Tabela 17</b> - Valores das RPM nos difusores com MFI.....	115
<b>Tabela 18</b> - Variação percentual das RPM nos difusores sem MFI. (continua) ....	115
<b>Tabela 19</b> - Variação percentual das RPM nos difusores sem MFI. (conclusão)....	116
<b>Tabela 20</b> - Variação percentual das RPM nos difusores com MFI. ....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CAD</b>	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
<b>CAE</b>	<i>Computer-Aided Engineering</i> (Engenharia Assistida por Computador)
<b>CAM</b>	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> (Manufatura Assistida por Computador)
<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (fluidodinâmica computacional)
<b>DAWT</b>	<i>Diffuser Augmented Wind Turbine</i> (Turbina eólica aumentada por difusor)
<b>FFF</b>	<i>Fused Filament Fabrication</i> (fabricação por filamento fundido)
<b>GW</b>	Gigawatts (1 GW = $1 \times 10^9$ watts = 1 bilhão de watts)
<b>HAWT</b>	<i>Horizontal-axis wind turbine</i> (turbina eólica de eixo horizontal)
<b>kW</b>	Kilowatts (1 kW = $1 \times 10^3$ watts = 1 mil de watts)
<b>MW</b>	Megawatts (1 MW = $1 \times 10^6$ watts = 1 milhão de watts)
<b>PW</b>	Petawatts (1 PW = $1 \times 10^{15}$ watts = 1 quatrilhão de watts)
<b>RPM</b>	Rotações por minuto
<b>TEEH</b>	Turbina eólica de eixo horizontal
<b>TEEV</b>	Turbina eólica de eixo vertical
<b>TEPE</b>	Turbina eólica de pequena escala.
<b>TW</b>	Terawatts (1 TW = $1 \times 10^{12}$ watts = 1 trilhão de watts)
<b>VAWT</b>	<i>Vertical-axis wind turbine</i> (turbina eólica de eixo vertical)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	18
1.2. PROBLEMA DE PESQUISA.....	19
1.3. HIPÓTESE DA PESQUISA .....	19
1.4. OBJETIVOS.....	20
<b>1.4.1. Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
<b>1.4.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
1.5. JUSTIFICATIVA.....	20
1.6. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	23
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA.....</b>	<b>24</b>
2.1. ENERGIA EÓLICA.....	24
2.2. TURBINAS EÓLICAS .....	26
<b>2.2.1. Turbinas eólicas de pequena escala.....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.2. Turbinas eólicas potencializadas por difusor .....</b>	<b>35</b>
<b>2.3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) .....</b>	<b>41</b>
2.4. TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO.....	44
<b>2.4.1. Túnel de Vento Físico.....</b>	<b>44</b>
<b>2.4.2. Túnel de Vento Virtual.....</b>	<b>46</b>
<b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>49</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	49
3.2. ETAPAS DA PESQUISA .....	50
<b>4. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA .....</b>	<b>56</b>
4.1. PROBLEMATIZAÇÃO .....	58
4.2. ESTUDOS DE REFERÊNCIA.....	58
<b>4.2.1. Difusores <i>Wind-Lens Technology</i>.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.2. Perfis aerodinâmicos de pás .....</b>	<b>61</b>
4.3. RESTRIÇÕES DE PROJETO.....	63
4.4. DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO .....	63
4.5. ESCALA DE PROJETO .....	65
4.6. GEOMETRIA DE REFERÊNCIA <i>WIND-LENS</i> .....	66
4.7. ÁREA CONSTRUTIVA .....	67
4.8. GEOMETRIZAÇÃO .....	69

4.9. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL 3D.....	71
4.10. SIMULAÇÕES EM TÚNEL DE VENTO VIRTUAL.....	72
<b>4.10.1. Resultados e análises das simulações.....</b>	<b>77</b>
4.11. MICROSEPARADOR DE FLUXO.....	88
<b>4.11.1. Resultados e análises das simulações nos difusores com MFI.....</b>	<b>91</b>
4.12. TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA .....	101
4.13. PROTOTIPAGEM 3D .....	104
4.14. ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO FÍSICO.....	108
<b>4.14.1. Configuração do ensaio em túnel de vento físico .....</b>	<b>108</b>
<b>4.14.2. Resultados no túnel de vento.....</b>	<b>111</b>
<b>4.14.3. Discussão dos resultados .....</b>	<b>117</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>120</b>
5.1. DIFUSORES FINAIS SELECIONADOS .....	125
5.2. PRODUÇÃO ACADÊMICA E CIENTÍFICA COMPLEMENTAR.....	125
5.3. CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA.....	126
5.4. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	127
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>128</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>140</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>145</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>166</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>170</b>
<b>APÊNDICE G.....</b>	<b>174</b>
<b>APÊNDICE H .....</b>	<b>176</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>179</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez da produção de energia a partir de fontes convencionais, o esgotamento dos combustíveis fósseis, as emissões de gases de efeito estufa, a perda de florestas, terra, água doce e biodiversidade são os principais pilares das diretrizes e protocolos sobre mudanças climáticas (BRASIL, 2004a, 2004b; UNCED, 1992a, 1992b; UNCHE, 1972; UNCSD, 2012; UNFCCC, 1997, 2015). Enfrentar as necessidades energéticas mundiais futuras e, ao mesmo tempo, abordar as questões sobre a mudança climática levam a uma maior tensão e discussão sobre as fontes de energia convencionais.

Tecnologias energéticas sustentáveis e com baixas emissões de carbono vão ter um papel crucial na revolução energética necessária para que uma mudança em direção à sustentabilidade ocorra (GREENPEACE BRASIL, 2013, 2016; IEA, 2013). Para isso, a utilização de fontes alternativas como a solar, a biomassa, o vento tem aumentado, pois a exploração dessas fontes de energia podem contribuir na redução dos gases do efeito de estufa e garantir o fornecimento de energia (BENLEVI, 2014). Nesse cenário, o vento desponta como a mais avançada das "novas" tecnologias de energia renovável (IEA, 2013), pois é uma fonte de energia limpa, inesgotável e ambientalmente amigável que pode fornecer uma alternativa aos combustíveis fósseis, ajudando na melhoria da qualidade do ar, na redução dos gases de efeito estufa e na diversificação do fornecimento global de eletricidade (TONG, 2010).

Quando discutem-se questões sobre energia eólica, o foco e o pensamento são muitas vezes direcionados para projetos de grande escala, como a instalação de extensos parques eólicos *onshore*<sup>1</sup> e *offshore*<sup>2</sup> com turbinas de grande porte. Para Tummala *et al.* (2016) grandes parques eólicos não são a melhor opção para a produção de energia renovável, devido aos impactos que estes trazem aos locais

---

<sup>1</sup> Correspondem às instalações posicionadas na plataforma continental, em terra firme.

<sup>2</sup> Correspondem às instalações posicionadas no mar, geralmente ao longo da costa marítima ou em alto mar.

onde são instalados e apontam as turbinas eólicas de pequena escala<sup>3</sup> como melhor alternativa sustentável.

O Brasil possui o maior potencial de energia renovável por quilometro quadrado do mundo (LEITÃO, 2015) e a energia eólica é a fonte que mais cresce na matriz energética nacional (GREENPEACE BRASIL, 2010; EPE, 2014; CGEE, 2015; WWF-BRASIL, 2015), responsável por 24% do crescimento da energia elétrica do Brasil (EPE, 2014; CGEE, 2015), com projeções de superar os 100 GW<sup>4</sup> instalados em 2050 (GREENPEACE BRASIL, 2013, 2016). No entanto, o segmento de pequeno porte no Brasil ainda é embrionário, não totalmente conhecido e explorado (GIANNINI *et al.*, 2013). Sua contribuição para a capacidade de geração de energia elétrica no país ainda é baixa, sendo ainda menor a sua participação na oferta de energia (SIMAS; PACCA, 2013).

No desenvolvimento da energia eólica, alguns desafios tecnológicos ainda permanecem abertos. No âmbito da energia eólica de pequena escala, um desses desafios é o desenvolvimento de sistemas que possam produzir uma maior potência e flexibilidade aerodinâmica, mesmo em áreas onde a velocidade do vento é baixa e suscetível a turbulências (KANNAN *et al.*, 2013). Em ventos de baixa velocidade, segundo Kishore e Prys (2013), o número de Reynolds<sup>5</sup> é drasticamente reduzido o que impacta nas propriedades aerodinâmicas das pás, principalmente na razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto, reduzindo o desempenho de uma turbina eólica de pequena escala.

Um importante desafio é iniciar o sistema de rotor das turbinas em baixas velocidades de vento, pois nestas situações os rotores dependem unicamente do torque aerodinâmico produzido pelo vento que atua sobre as pás. Esse torque precisa ser suficiente para superar a fricção com as engrenagens mecânicas e com o gerador

---

<sup>3</sup> Nomeclatura definida por Kishore *et al.* (2013) para as turbinas eólicas com diâmetro de rotor entre 10 cm até 100 cm. Classificação das turbinas eólicas serão melhor abordadas no capítulo: 2.2 Turbinas Eólicas

<sup>4</sup> Valor em Gigawatt (1GW =  $1 \times 10^{15}$  watts = 1 bilhão de watts). O valor de 100GW correspondem a 100 bilhões de watts.

<sup>5</sup> O Número de Reynolds é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos, que 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).

elétrico, essa velocidade mínima para superar esse torque é chamada de *start* rotacional.

A potência do vento é proporcional ao cubo de sua velocidade e uma pequena elevação na sua aceleração proporcionará um grande aumento da geração de energia. Explorar essa relação é um caminho para melhorar a performance na inicialização a baixas velocidades e, conseqüentemente, produzir mais potência de saída. Nesse sentido, algumas tecnologias foram testadas com o objetivo de aumentar a eficiência das turbinas eólicas, sendo proposto por alguns pesquisadores (FOREMAN *et al.*, 1978; IGRA, 1977, 1981; ABE; OHYA, 2004; ABE *et al.*, 2005; MATSUSHIMA *et al.*, 2006; OHYA *et al.*, 2008, 2010) a utilização de um difusor ou duto em volta do rotor para melhorar a aerodinâmica e potência de saída de uma turbina eólica. Esta tecnologia é conhecida como *Diffuser Augmented Wind Turbine* (Turbina Eólica Aumentada por Difusor), ou pelo acrônimo DAWT. A figura 1 mostra uma turbina eólica do tipo DAWT.

**Figura 1** - Turbina eólica do tipo DAWT.



Fonte: Dreamstime<sup>6</sup>

Alguma pesquisa (INOUE *et al.*, 2002; OHYA *et al.*, 2002, 2004, 2008; ABE; OHYA, 2004; ABE *et al.*, 2005), foram realizadas na Universidade de Kyushu no Japão

<sup>6</sup> <https://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photos-residential-wind-turbines-image16541638>

com difusores modificados ou difusores flangeados (*flanged diffusers*) e apontaram novos caminhos a serem explorados no desenvolvimento de difusores desta natureza. A grande contribuição destas pesquisas foi o uso de flange (aba) em volta do difusor, que potencializou o efeito de baixa pressão no plano de saída do difusor, e conseqüentemente, maior aceleração do escoamento de ar. Esse conceito foi posteriormente evoluído, desenvolvendo difusores compactos de perfil flangeado (*compact-type brimmed diffuser*), denominado *Wind-Lens Technology*<sup>7</sup> (OHYA *et al.*, 2010).

O presente estudo busca estabelecer um difusor aerodinâmico compacto de para uma turbina eólica de pequena escala. Um dos objetivos é melhorar a eficiência aerodinâmica – melhor *start* rotacional e mais rotações por minuto (RPM) – das turbinas eólicas de pequena escala, principalmente àquelas 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. Outro aspecto relevante deste estudo é produzir e disponibilizar informações técnico-científicas com a finalidade de auxiliar a área de design no projeto de turbinas eólicas de pequena escala.

### 1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA

A literatura sobre difusores para turbinas eólicas de pequena escala possui um amplo e variado conjunto de aspectos que são estudados. Desta forma, é elementar definir o objeto de estudo e o escopo desse trabalho. Portanto, delimita-se este trabalho ao desenvolvimento de um difusor aerodinâmico compacto de alta performance para turbinas eólicas de pequena escala, explorando a geometria do difusor como elemento principal para uma melhor eficiência aerodinâmica de turbinas eólicas de pequena escala.

A geometria é essencial na capacidade do difusor equacionar as zonas de alta e baixa pressão ao longo de sua estrutura, essa relação é determinante para acelerar o escoamento de ar pela turbina. Essa aceleração impacta em dois parâmetros de

---

<sup>7</sup> Não existe ainda uma tradução estabelecida para o português, para fins de compreensão leia-se Tecnologia Lente de Vento.

performance de uma turbina eólica, a velocidade do *start* rotacional e as RPM. A pesquisa contextualiza-se na geometria do difusor e sua contribuição na performance aerodinâmica de um difusor aerodinâmico para uma turbina eólica de pequena escala, principalmente em situações onde a velocidade de vento é baixa ou suscetível a turbulências, como por exemplo, aplicações de energia eólica em ambientes urbanos.

Este trabalho terá como referência principal os estudos desenvolvidos por Ohya *et al.* (2010) sobre difusores compacto-flangeados (*compact-type brimmed diffuser*), denominado *Wind-lens Technology*. Este é um importante e atual estudo sobre difusores do tipo compacto para turbinas eólicas e alguns conceitos por ele estabelecidos servirão de base para o desenvolvimento deste estudo.

## 1.2. PROBLEMA DE PESQUISA

A aerodinâmica é uma das áreas mais sensíveis no design de turbinas eólicas. A busca por novas formas para melhorar a eficiência e eficácia das turbinas eólicas é um desafio recorrente na inovação desses produtos, nesse sentido o problema de pesquisa desta dissertação pode ser apresentado pelo seguinte enunciado:

Como otimizar a geometria de um difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de eixo horizontal de pequena escala, visando o seu *start* rotacional em baixas velocidade de vento?

## 1.3. HIPÓTESE DA PESQUISA

Um difusor aerodinâmico com uma geometria otimizada, aplicado em uma turbina eólica de pequena escala, pode contribuir para um melhor desempenho em regimes de ventos fracos ou turbulentos, isso porque, a geometria é essencial na capacidade do difusor equacionar as zonas de alta e baixa pressão ao longo de sua estrutura, essa relação é determinante para o efeito aerodinâmico que acelera o escoamento de ar, resultando em um *start* rotacional em baixas velocidade de vento.

## 1.4. OBJETIVOS

A seguir apresenta-se o objetivo geral deste estudo, como também, os seus objetivos específicos.

### 1.4.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral, estabelecer uma geometria de difusor aerodinâmico compacto para aplicação em turbinas eólicas de pequena escala de eixo horizontal.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- a) Estabelecer parâmetros projetuais para o design da geometria do difusor;
- b) Analisar o comportamento aerodinâmico;
- c) Desenvolver e prototipar difusores para ensaios experimentais;
- d) Analisar, comparar e validar os resultados obtidos.

## 1.5. JUSTIFICATIVA

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. Segundo Sirigu *et al.* (2016), turbinas eólicas de pequena escala apresentam vantagens em relação às de grande porte: são, na maioria das vezes, de fácil transporte, instalação, manutenção e podem ter uma distribuição geográfica extremamente ampla, pois não exigem condições climáticas e geográficas especiais para trabalhar eficazmente e apresentam-se como uma alternativa cada vez mais acessível para os consumidores que querem reduzir o custo de suas faturas de energia.

O desenvolvimento recente no campo da eletrônica permitiu reduzir drasticamente os requisitos de energia dos dispositivos eletrônicos portáteis e sem fio, o que viabilizou o desenvolvimento de aplicações de energia eólica de pequena escala autossustentáveis para dispositivos eletrônicos dessa natureza (KISHORE *et al.* 2013; KISHORE; PRIYA. 2013). Ademais, a maioria da pesquisas relacionadas à energia

eólica está concentrada principalmente para turbinas eólicas de médio e grande porte, além disso, sendo que as turbinas eólicas de pequena escala têm um comportamento aerodinâmico e condições operacionais diferentes do que as turbinas eólicas de grande escala e média escala. Isso propicia a pesquisa e o desenvolvimento de conhecimento e soluções projetuais em energia eólica voltadas para a pequena e micro escala.

Difusores *Wind-Lens* permitiram compactar o tamanho de difusores sem perder o efeito aerodinâmico de aceleração do vento, permitindo ampliar as possibilidades de uso para difusores desse tipo, como por exemplo, em turbinas eólicas de pequena escala em ambientes com ventos instáveis e turbulentos.

Os estudos de Ohya *et al.* (2010) aprofundaram-se em compreender o comportamento dos vórtices de baixa pressão produzidos e o coeficiente de potência produzido por difusores flangeados do tipo compacto, trabalhando somente com uma geometria do tipo convexa baseada em uma curva cicloide para o difusor do tipo *Wind-Lens*, variando apenas na curvatura e comprimento dessa geometria. Recentemente, um novo estudo (OKA *et al.*, 2016) centrou-se em desenvolver um novo método de design para difusores *Wind-Lens*, o objetivo deste estudo era determinar qual a curvatura cicloide produziria melhor coeficiente de potência e estabelecer um método de projeto para construção de uma curvatura otimizada para difusores. Entretanto neste estudo (2016) a geometria utilizada foi a estabelecida por Ohya *et al.* (2010), sem haver mudanças na sua forma básica ou explorados novas formas na sua geometria.

Segundo Kosasih e Tondelli (2012), a capacidade do difusor de reduzir a pressão de saída é determinante 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, esse aumento de aceleração impacta drasticamente o momento denominado *start* rotacional, que se define como a menor velocidade de vento necessária para a turbina começar a rotacionar, característica que não tem sido abordada nos estudos de difusores consultados para esta pesquisa. A pesquisa de novas geometrias aplicadas a difusores desta natureza poderá trazer novos conhecimentos e avanços para este tipo de tecnologia.

A inovação tecnológica é a grande ferramenta para o crescimento econômico, para os ganhos de eficiência e de competitividade no mundo. Nessas condições, os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) e Minas e Energia (MME) estabeleceram os principais desafios na área de energia eólica: fomentar o desenvolvimento tecnológico, aumentar o conhecimento científico e alavancar o setor industrial eólico (CGEE, 2015). Em suma, “há uma necessidade urgente em acelerar o desenvolvimento de tecnologias energéticas avançadas, a fim de fazer face aos desafios globais da energia limpa, das alterações climáticas e do desenvolvimento sustentável” (IEA, 2013, p. 9, *tradução nossa*<sup>8</sup>).

Ademais, a produção acadêmica em Design ajuda a consolidá-lo como um campo de produção de conhecimento científico, tecnológico, industrial e social que contribui para o fortalecimento do potencial criativo/inovador do Brasil. Um desses fortalecimentos é através do aumento do número de patentes válidas, a qual é considerado um importante indicador para mensurar o grau de inovação de um país, além de fortalecer a tríade estratégica que une ensino, pesquisa e extensão.

Por fim, a contribuição e justificativa para a realização desta pesquisa é o conhecimento produzido, por meio da atuação e integração projetual com saberes e áreas distintas, mais especificamente, design e engenharia, pois projetos ambiciosos como o apresentado neste estudo, necessitam da participação de diferentes “tipos de design” no seu desenvolvimento, especialmente o *engineering design* (engenharia de produto, ou simplesmente, engenharia) e o *industrial design* (design industrial, ou simplesmente, design). A aproximação entre estas áreas contribui para o melhor desempenho da pesquisa e do projeto, pois traz novas perspectivas que otimizam o processo, com potencial para a geração da inovação.

---

<sup>8</sup> **Do original em inglês:** “*There is a pressing need to accelerate the development of advanced energy technologies in order to address the global challenges of clean energy, climate change and sustainable development*”.

## 1.6. ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação está orientada, metodologicamente, em três etapas e sua estrutura foi organizada em cinco capítulos, resumidamente descritos a seguir:

No capítulo um, apresentou-se a introdução e a delimitação do tema, o problema de pesquisa, a hipótese, os objetivos e a justificativa deste trabalho.

No capítulo dois, inicia-se a fundamentação teórica. Nesta fase teoriza-se sobre a energia eólica e seus aspectos técnicos, sobre turbinas eólicas, turbinas eólicas de pequena escala e turbinas eólica potencializadas por difusor, sobre fluidodinâmica computacional (CFD) e sobre as tecnologias e ferramentas de simulação, com destaque para túnel de vento virtual e físico.

No capítulo três, apresenta-se o desenho metodológico desta pesquisa. Neste capítulo caracteriza-se o tipo de pesquisa, estabelece-se as etapas e fases e os procedimentos que serão adotados para a execução da presente pesquisa

No capítulo quatro, acontece o desenvolvimento da presente pesquisa, dividida em três momentos. No primeiro momento apresentam-se a problematização, contextualização e todos os conhecimentos científicos e técnicos pertinentes ao projeto dos difusores. No segundo momento são geradas as geometrias dos difusores e as simulações em túnel de vento virtual. No terceiro momento acontecem os ensaios em túnel de vento físico.

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

Por fim, listam-se as referências utilizadas nesta pesquisa bem como disponibiliza os apêndices elaborados nesta pesquisa.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa é realizado a busca de dados, informações, teorias e conhecimento científico sobre os assuntos pertinentes a pesquisa. É onde procura-se reunir e compreender os conhecimentos necessários para fundamentar e conectar com as outras fases e etapas da pesquisa. A fundamentação teórica desenrolar-se a partir da consulta de livros, artigos científicos, dissertações e teses.

### 2.1. ENERGIA EÓLICA

Energia eólica é a energia cinética contida em uma massa de ar em movimento. Esta massa de ar em movimento, denominada vento, é um fenômeno resultante da interação da energia solar com a Terra, ou seja, é o resultado do processo de aquecimento diferenciado da atmosfera (CUSTÓDIO, 2013), além disso, efeitos naturais como a rotação da terra (força inercial de Coriolis) (CORIOLIS, 1832, 1835; PERSSON, 1998), continentalidade, maritimidade, latitude, altitude e a rugosidade do solo influenciam na formação e intensidade dos ventos (LINACRE; GEERTS, 1997; MARIN *et al.*, 2008).

A Terra recebe em média 174 PW<sup>9</sup> (174 quatrilhões de watts) de radiação solar na zona superior da atmosfera, dessa radiação, cerca de 30% (52,2 PW) é refletida de volta para o espaço, enquanto o restante (121,8 PW) é absorvido pelo planeta (SMIL, 1991). Aproximadamente, 2% (2,4 PW) da energia solar absorvida é convertida em energia cinética (ventos) (DUTRA, 2008). Comparando com os dados apresentados no relatório anual sobre energia das Nações Unidas para o ano de 2013 (UN, 2013), esse valor representa apenas 0,24% da potência anual instalada (5800 GW<sup>10</sup>) nas centrais elétricas do mundo. Desta pequena fração, pouco mais de 5% (302 GW<sup>11</sup>) são provenientes da energia eólica. Estes dados visam mensurar o quão abundante é a energia disponível nos ventos.

---

<sup>9</sup> Valor em Petawatts (1 PW =  $1 \times 10^{15}$  watts = 1 quatrilhão de watts). O valor de 174 PW corresponde a 174 quatrilhões de watts.

<sup>10</sup> Valor em Gigawatts ( $1 \times 10^9$  watts = 1 bilhão de watts). O valor de 5800 GW corresponde a 5,8 bilhões de watts. Um GW é um milionésimo do Petawatt (0,000001 PW).

<sup>11</sup> Valor exato de 302,385 GW (0,000302385 PW).

Na década de 1970, com a primeira crise do preço do petróleo<sup>12</sup>, o interesse pelo poder do vento ganhou força (ACKERMANN; SÖDER, 2000; ŞAHIN, 2004; LÓPEZ, 2011). Como resultado, segundo Şahin (2004), os países ocidentais, principais afetados pelas crise, procuraram fontes alternativas de energia, como a energia eólica, solar, biomassa e, etc. Neste contexto, o objetivo passou a ser de utilizar a energia eólica para fornecer energia elétrica em vez de energia mecânica, como afirmam Ackermann e Söder (2000).

Conforme Greenpeace (2015), nas duas últimas décadas foi a que mais cresceu em comparação as outras fontes na geração de eletricidade e tem atraído boa parte dos investimentos no setor das energias renováveis. Para comparação, nos últimos dez anos (2005-2015), a capacidade de energia eólica instalada no mundo foi de 59 GW<sup>13</sup> (GWEC, 2006) para 433 GW (REN21, 2016). No cenário brasileiro esses valores ficaram em 28 MW (0,024 GW) (GWEC, 2006) para 8,7 GW (REN21, 2016).

A energia eólica tem se apresentado como uma das tecnologias de energia renovável mais promissoras e opção preferida no planejamento energético de governos que buscam diversificar suas fontes de energia, reduzir emissões de CO<sub>2</sub>, criar novas indústrias e proporcionar novas oportunidades de emprego e renda (DAI *et al.*, 2015). Entretanto, alguns estudos (SAIDUR *et al.*, 2011; LEUNG & YANG, 2012; DAI *et al.*, 2015; WANG & WANG, 2015) apontam para os potenciais impactos sociais e ambientais a longo prazo devido à instalação e operação das turbinas eólicas que, embora menores, não podem ser ignorados. Dentre esses impactos, destacam-se segundo Barbosa Filho e Azevedo (2013):

- (i) IMPACTOS SOBRE O MEIO BIÓTICO: impactos na fauna e na flora local durante a fase de construção e durante a permanência do empreendimento e/ou sua exploração; colisões de aves contra a estrutura da turbina eólica;
- (ii) IMPACTOS SOBRE O MEIO FÍSICO: degradação devido ao processo de desmatamento, de topografia e de terraplenagem; introdução de material

---

<sup>12</sup> MONTBRIAL, Thierry de. The Oil Crisis and International Relations since October 1973. **Energy: The Countdown**. Oxford: Pergamon, 1979. cap. 2, p. 66. ISBN: 978-0-08-024225-5

<sup>13</sup> Valor em Gigawatts ( $1 \times 10^9$  watts = 1 bilhão de watts). Um Gigawatt é igual a um milionésimo de Petawatt (0,000001 PW).

sedimentar para impermeabilização e compactação do solo; alteração do nível hidrostático do lençol freático;

- (iii) IMPACTOS SOBRE MEIO SOCIOECONÔMICO: emissão de ruídos (mecânicos, aerodinâmicos e de baixa frequência); impacto visual causado pelo altura e diâmetro das turbinas eólicas; interferências eletromagnéticas e efeito estroboscópico dos aerogeradores (sombreamento intermitente causado pela rotação da turbina);
- (iv) IMPACTOS SOBRE O CLIMA: a circulação padrão do ar é modificada em grandes parques eólicos, o que pode alterar localmente a temperatura, o regime de chuvas e de ventos, gerando microclimas.

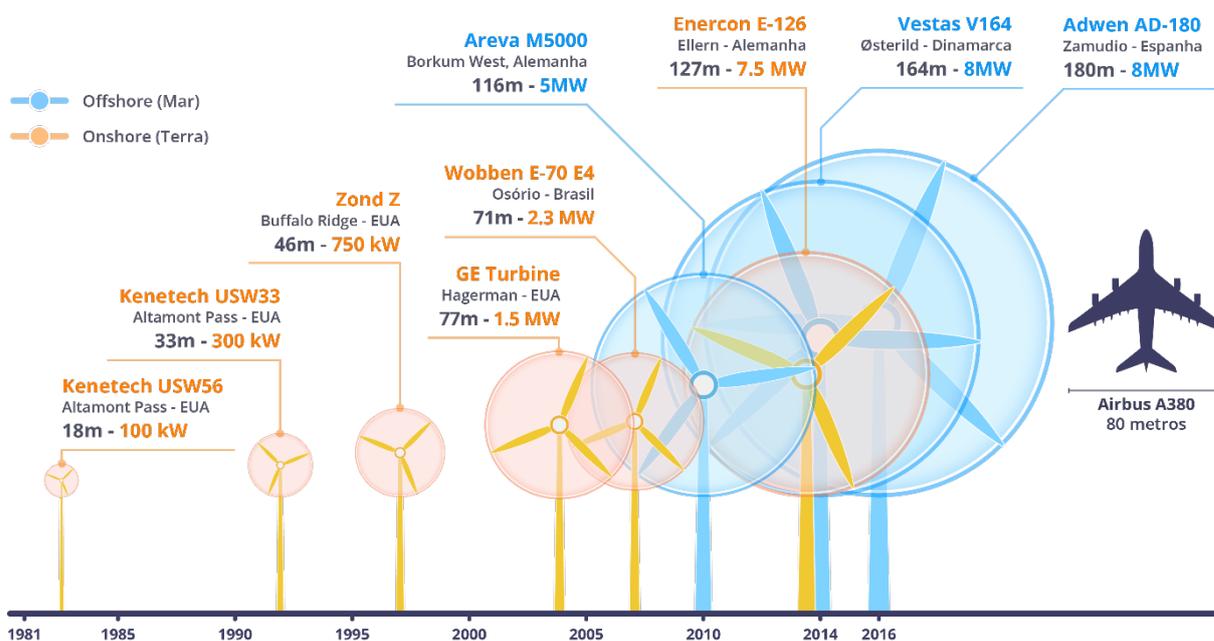
Assim, diante dessas questões, conceitos alternativos em energia eólica, como a microgeração pode ser uma oportunidade para o desenvolvimento de soluções inovadoras em produção de energia descentralizadas com emissões zero e com baixo impacto ambiental, físico e socioeconômico.

## 2.2. TURBINAS EÓLICAS

A extração da energia dos ventos são realizadas por máquinas desenhadas para esta finalidade, a turbinas eólicas, que fazem a conversão da energia cinética de translação (vento) em potência mecânica de eixo (torque x rotação), a qual é convertida em eletricidade através de um gerador elétrico (LÓPEZ, 2011). Segundo Martins *et al.* (2008, p. 1304.2), em paralelo ao crescimento acelerado da energia eólica nas últimas décadas, houve também a evolução da capacidade instalada e a evolução tecnológica dos aerogeradores, no que tange o diâmetro do rotor e a potência instalada.

Desde 1980, os avanços na aerodinâmica, dinâmica estrutural e 'micrometeorologia' contribuíram para um aumento anual de 5% no rendimento energético das turbinas". Desde os anos 80, os avanços na aerodinâmica, dinâmica estrutural e micrometeorologia contribuíram para um aumento anual de 5% no rendimento energético das turbinas eólicas (HERBERT *et al.*, 2007). A figura 2 mostra a evolução das turbinas eólicas ao longo dos últimos anos.

**Figura 2** - Evolução das turbinas eólicas (diâmetro do rotor e potência instalada).



Fonte: Adaptado de SBCEI (2013), TWP (2018) e Wobben (2018).

Segundo Herbert *et al.* (2007), a tecnologia das turbinas eólicas tem uma identidade técnica singular e exigências únicas quanto aos métodos usados para seu design. A evolução do design e da tecnologia nas últimas décadas tem proporcionado um amadurecimento da energia eólica frente as outras fontes renováveis. Para Şahin (2004), esse progresso pode ser descrito como uma cadeia contínua de melhorias incrementais com base na experiência e na pesquisa. Esses avanços permitiram o desenvolvimento de materiais mais leves, novas formas construtivas e de aprendizagem tecnológica, contribuindo para turbinas eólicas com melhor desempenho, mais potência instalada, menores emissões de ruídos, melhor infraestrutura operacional e mais competitividade na relação custo-benefício.

O desenvolvimento e evolução tecnológica das turbinas eólicas é corroborada pelos rigorosos padrões e normas técnicas estabelecidas. Ackermann (2000), defende a importância dos padrões e normas para energia eólica, pois estes são importantes para assegurar a qualidade do projeto, como também para padronizar testes de desempenho, medições acústicas e meteorológicas em locais em potencial para instalação de turbinas eólicas.

Muitos países desenvolveram seus próprios conjuntos de normas e padrões para a energia eólica, no entanto, a tendência é harmonizar internacionalmente os padrões mundiais neste segmento. Nesse sentido a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission - IEC*), organização internacional que visa estabelecer normas, definições e especificações técnico/operacionais para tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas, sendo alguns documentos da IEC desenvolvidos juntamente com a Organização Internacional para Padronização (ISO).

A IEC estabelece, através do Comitê Técnico 88 (IEC TC88), os requisitos, definições e especificações de projeto, técnico/operacionais, de segurança, de medição e procedimentos de testes para turbinas eólicas. São 23 documentos normativos até então publicados, dentre estas podemos destacar a IEC 61400-2:2013, que trata sobre turbinas eólicas de pequeno porte.

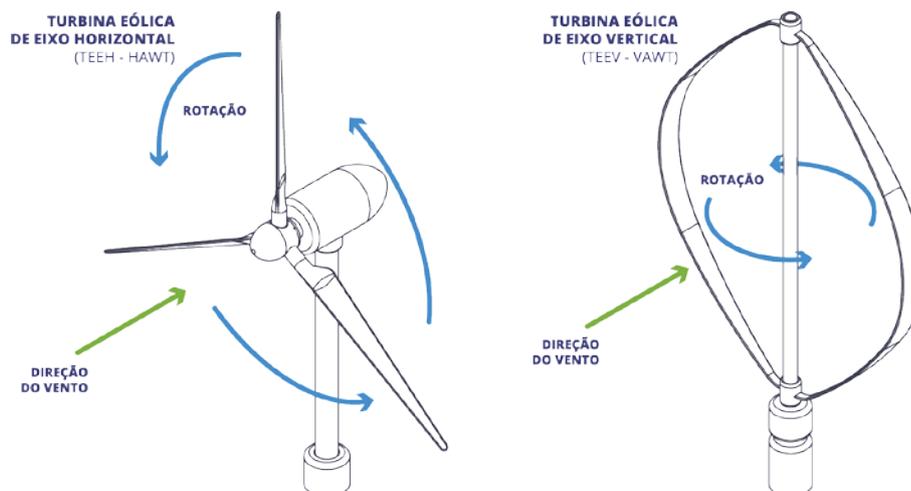
Segundo Kishore *et al.* (2014), as turbinas eólicas são classificadas segundo três critérios principais: (i) com base na orientação do eixo de rotação (vertical ou horizontal), (ii) com base nas forças aerodinâmicas (sustentação ou arrasto) que atuam na turbina eólica, e (iii) com base na capacidade de geração de energia (micro, pequena, média ou grande).

Com base no eixo de rotação existem dois grupos de turbinas eólicas (LÓPEZ, 2011; CUSTÓDIO, 2013; KISHORE *et al.*, 2014):

- (i) Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), ou do acrônimo em inglês, *horizontal-axis wind turbine* (HAWT);
- (ii) Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV), ou do acrônimo em inglês, *vertical-axis wind turbine* (VAWT).

A figura 3 mostra exemplos de turbinas eólicas segundo esta classificação.

**Figura 3** - Tipos de turbinas eólicas por orientação do eixo do rotor.



Fonte: Adaptado de Custódio (2013).

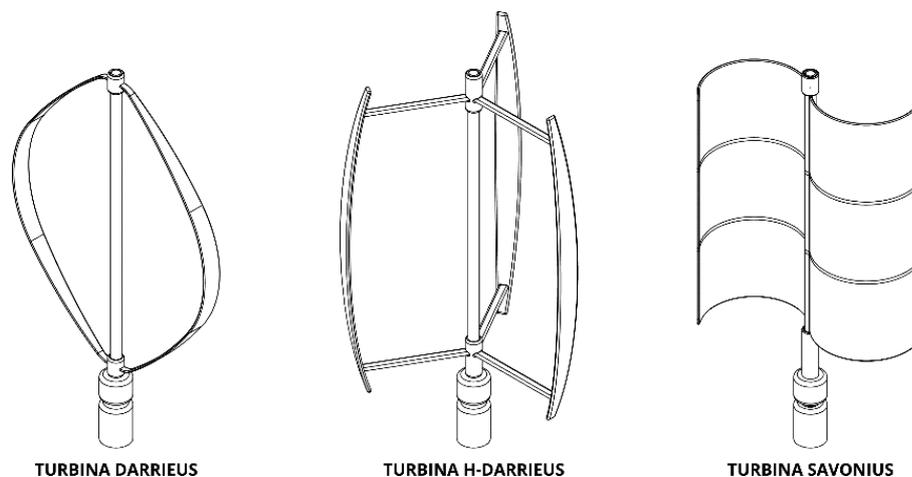
Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) são turbinas eólicas cujo eixo mantém-se paralelo à direção do vento. A dinâmica de funcionamento destas turbinas está no princípio de sustentação do perfil aerodinâmico das pás (*lift forces*), similar às asas dos aviões (CUSTÓDIO, 2013; OTEO, 2014). É o tipo de configuração que proporciona um melhor aproveitamento do potencial energético do vento.

As TEEH normalmente tem três pás, sendo nas turbinas de grande porte a configuração padrão, pois segundo Burton et. al. (2011) e López (2011), essa configuração fornece uma melhor estabilidade e desempenho aerodinâmico, menor esforços mecânicos, menos ruídos de operação e maior vida útil, levando à diminuição do custo global por MWh gerado.

As turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) são turbinas eólicas cujo o eixo de rotação é perpendicular ao solo. TEEV são menos populares devido seu rendimento baixo para geração de energia, pois segundo López (2011), seu desenho não permite girar em altas velocidades. As TEEV restringem-se aos sistemas de baixa potência e a instalações em áreas urbanas, pois tem baixa produção de ruídos e ótimo aproveitamento dos ventos turbulentos (TIBOLA, 2009).

Segundo López, (2011) e Custódio (2013), três tipos de TEEV são mais comuns: (i) Darrieus, (ii) H-Darrieus e (iii) Savonius. A figura 4 mostra exemplos de turbinas eólicas segundo esta classificação.

**Figura 4** - Modelos de TEEV mais conhecidos.

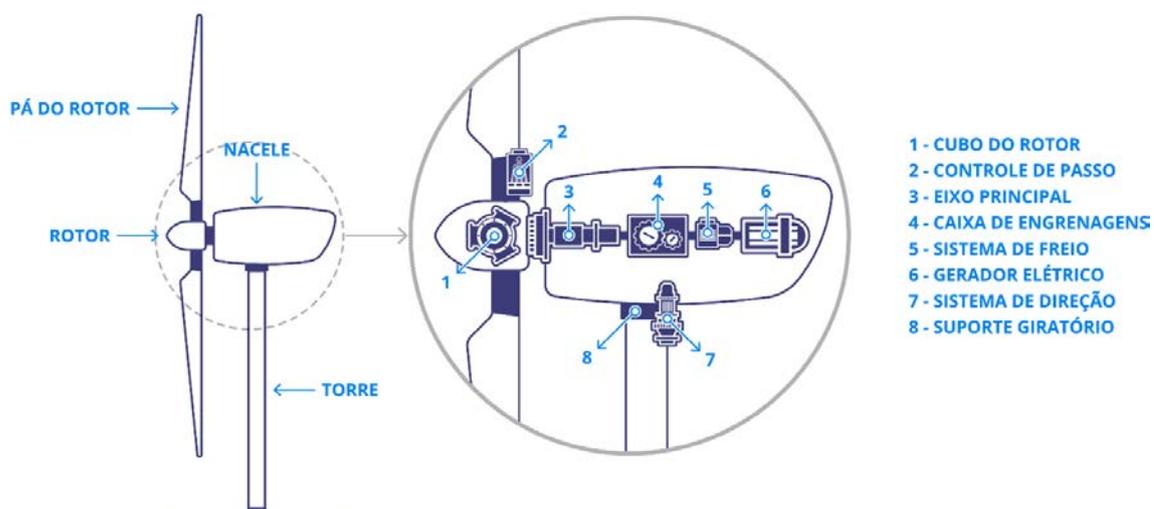


Fonte: Adaptado de López (2011) e Custódio (2013).

Os componentes de uma turbina eólica variam conforme o tipo e a aplicação da turbina. Turbinas de grande porte são mais complexas e tem componentes específicos aos locais onde são instaladas. Os componentes base de uma turbina eólica são (LÓPEZ, 2011; CUSTÓDIO, 2013):

- 1) Torre;
- 2) Rotor e pás;
- 3) Nacele;
- 4) Caixa de engrenagens;
- 5) Sistema de freios;
- 6) Gerador elétrico;
- 7) Sistema de direção;
- 8) Suporte giratório.

A figura 5 mostra os componentes base e sua posição na turbina eólica.

**Figura 5** - Componentes de uma turbina eólica.

Fonte: Adaptado de López (2011) e Custódio (2013).

O tamanho de uma turbina eólica depende sobretudo da potência desejada. Assim, o diâmetro do rotor, ou mais especificamente, a área varrida pelo rotor da turbina eólica é a característica mais relevante. Gipe (2009) e Kishore *et al.* (2013) sustentam que não há regras bem definidas sobre o que constitui uma turbina eólica de pequeno ou grande porte, a designação das medidas são um tanto arbitrarias. Gipe (2009), importante e pioneiro autor no setor de energias renováveis, propõe sua classificação para turbinas eólicas em seis grupos e levando em consideração três aspectos principais (rotor, área varrida e potência), conforme detalhado pela tabela 1.

**Tabela 1** - Classes de tamanho de turbinas eólicas.

CLASSIFICAÇÃO	ROTOR (metros)	ÁREA VARRIDA (m <sup>2</sup> )	POTÊNCIA PADRÃO
<b>Micro</b>	0,5 – 1,25	0,2 – 1,2	10 W – 250 W
<b>Mini</b>	1,25 – 3	1,2 – 7,1	250 W - 1,4 kW <sup>14</sup>
<b>Domésticas</b>	3 – 10	7 - 79	1,4 kW – 16 kW
<b>Pequeno Porte</b>	10 – 20	79 – 314	25 kW – 100 kW
<b>Médio Porte</b>	20 – 50	314 – 1963	100 kW – 1 MW <sup>15</sup>
<b>Grande Porte</b>	50 – 100 <sup>+</sup>	1963 – 7854 <sup>+</sup>	1 MW – 3 MW <sup>+</sup>

Fonte: Adaptado de Gipe (2009).

<sup>14</sup> Valor em Kilowatts (1kW = 1 mil watts).

<sup>15</sup> Valor em Megawatts (1MW = 1 milhão de watts). O valor de 1 MW corresponde a 1000 kW.

A tecnologia e design de turbinas eólica já é bem conhecido e estabelecido, porém esse conhecimento está majoritariamente, segundo Kishore *et al.* (2014), relacionados as turbinas eólicas de médio e grande porte, porém as turbinas eólicas de pequena escala têm um comportamento aerodinâmico e condições operacionais bastante diferentes do que as turbinas de grande escala.

Outro aspecto a considerar sobre turbinas de médio e grande porte é que, para Tummala *et al.* (2016), a instalação de parques eólicos com turbinas de grande porte não são a melhor opção sustentável para a produção de energia renovável, devido aos impactos que estes trazem aos locais onde são instalados. Por isso é importante a pesquisa sobre turbinas eólicas de pequena escala, bem como, suas particularidades e potencialidades.

### **2.2.1. Turbinas eólicas de pequena escala**

Uma das maneiras mais práticas e estabelecidas de micro e minigeração é a partir de turbinas eólicas de pequena escala. Além disso, turbinas eólicas de pequena escala são de fácil transporte, instalação, manutenção e podem ter uma distribuição geográfica extremamente ampla, pois não exigem condições climáticas e geográficas especiais para trabalhar eficazmente (SIRIGU *et al.*, 2016).

Segundo Cândido e Garay (2015), a evolução da tecnologia eólica, no que tange tamanho e diâmetro do rotor, trabalha em dois caminhos paralelos, um vai ao encontro do processo de miniaturização de produtos, representado pela *Rao's Micro-Windmill Technology* (UTA, 2014) com rotor de 1,8 mm de diâmetro e o outro ao encontro do desenvolvimento de turbinas maiores e com maior potência nominal, representado pelo gigante aerogerador *offshore* Adwen AD-180 (ADWEN, 2016) com rotor de 180 metros e 8 MW de potência instalada. Essa diferença de tamanho - mil vezes - entre as turbinas eólicas são demonstrados na figura 6.

**Figura 6** - Rao's Micro Windmill e Adwen AD-180.



Fonte: Adaptado de Adwen (2016) e Turner (2014).

A IEC 61400-2 (IEC, 2013) estabelece que qualquer turbina eólica com uma área de rotor varrida abaixo de  $200 \text{ m}^2$  é uma turbina eólica de pequeno porte, isso equivale a uma potência nominal de aproximadamente 50 kW ou um diâmetro de rotor de  $\pm 16$  metros. Entretanto essa classificação não é suficiente para atender a evolução tecnológica das turbinas eólicas, no que tange a diversidade de tamanhos e aplicações.

Como apontou anteriormente Kishore *et al.* (2013), não existe uma nomenclatura bem definida na literatura para categorizar as turbinas eólicas com base no seu tamanho, com isso muitos autores aprofundaram a classificação para uma turbina eólica de pequena escala em mais categorias e conforme seus próprios parâmetros e aplicações.

A IEC (2013) classificam o tamanho da turbina a partir da área varrida pelo rotor, Gipe (2009) e Kishore *et al.* (2013, 2014), definem turbinas eólicas baseadas no diâmetro do rotor.

A ANEEL (2016) a partir das Resoluções Normativas ANEEL nº 482/2012 (ANEEL, 2012) e ANEEL nº 687/2015 (ANEEL, 2015) estabelece o conceito de micro e minigeração distribuídas de energia à partir de fontes renováveis, como a solar e a eólica:

- a) Microgeração Distribuída: sistemas geradores com potência até 75 kW;
- b) Minigeração Distribuída: sistemas geradores com potência superior a 75 kW e até 3 MW para a fontes hídricas, ou menor ou igual a 5 MW para as demais fontes.

Essa classificação baseada na potência nominal instalada, considera tanto turbinas instaladas isoladamente, como em conjunto. O quadro 1 apresenta um resumo das classificações das turbinas eólicas de pequena escala segundo os critérios definidos por cada autor.

**Quadro 1** - Classificação das turbinas eólicas de pequena escala por autor.

AUTOR	CLASSIFICAÇÃO PARA TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA (TEPE)			
IEC 61400-2	<b>Pequeno Porte</b> (área varrida abaixo de 200 m <sup>2</sup> , equilavente a um rotor ~ 16 m)			
Paul GIPE	<b>Microturbina</b> (0,5 – 1,25 m)	<b>Miniturbina</b> (1,25 – 3 m)	<b>Turbina doméstica</b> (3 – 10 m)	<b>Pequeno Porte</b> (10 – 20 m)
Ravi A. KISHORE <i>et al.</i>	<b>Micro-escala</b> (menor que 10 cm)		<b>Pequena escala</b> (10 cm a 100 cm)	
ANEEL	<b>Microgeração Distribuída</b> (potência igual ou até 75 kW)		<b>Minigeração Distribuída</b> (potência superior a 75 kW até 5 MW)	

Fonte: Adaptado de Gipe (2009), IEC (2013), Kishore *et al.* (2013, 2014) e ANEEL (2016)

Um problema relacionado às turbinas eólicas de pequena escala em relação às grandes turbinas, é que são localizadas onde o vento é normalmente fraco, turbulento e instável em termos de direção e velocidade, devido à presença de obstáculos, tais como, árvores, elevações, construções e outras obstruções adjacentes (CLAUSEN; WOOD, 2000; WANG *et al.*, 2008). Esta diferença nas condições de operação das turbinas eólicas de grande e pequena escala afeta diretamente seus comportamentos aerodinâmicos (KISHORE *et al.*, 2013).

Definimos e adotamos para esta pesquisa, com objetivo de padronizar uma classificação, o termo turbina eólica de pequena escala (KISHORE *et al.*, 2013, 2014) para turbinas eólicas com diâmetro de rotor entre 10 cm a 100 cm. A turbina eólica de testes, como também os difusores aerodinâmicos projetados e desenvolvidos nesta pesquisa se enquadram nesta classificação adotada.

Do ponto de vista tecnológico, um dos desafios é o desenvolvimento de sistemas de possam produzir uma maior potência e flexibilidade aerodinâmica, mesmo em áreas onde a velocidade do vento é baixa e suscetível a turbulências

(KANNAN *et al.*, 2013). Somado a isso, o desafio de otimizar a performance no sistema de inicialização a baixas velocidades (*start* rotacional), especialmente para as turbinas eólicas de pequena escala. Assim, a pesquisa de novos conceitos e ideias que melhorem a eficiência dessas turbinas eólicas consistem em uma grande oportunidade projetual para a área do Design, no que tange a produção de conhecimento projetual e científico.

### 2.2.2. Turbinas eólicas potencializadas por difusor

Explorar a relação entre a potencia do vento com o cubo de sua velocidade é um caminho conhecido para melhorar a performance das turbinas eólicas. Uma das tecnologias mais indicadas para tal finalidade é por meio da utilização de um difusor ou duto em volta do rotor para melhorar a aerodinâmica e potência de saída de uma turbina eólica. Esta tecnologia ficou conhecida como *Diffuser Augmented Wind Turbine* (Turbina Eólica Aumentada por Difusor), ou pelo acrônimo DAWT. A figura 7 mostra uma turbina eólica do tipo DAWT.

**Figura 7** - Turbina DAWT da empresa Olgin e detalhe estrutural do difusor.



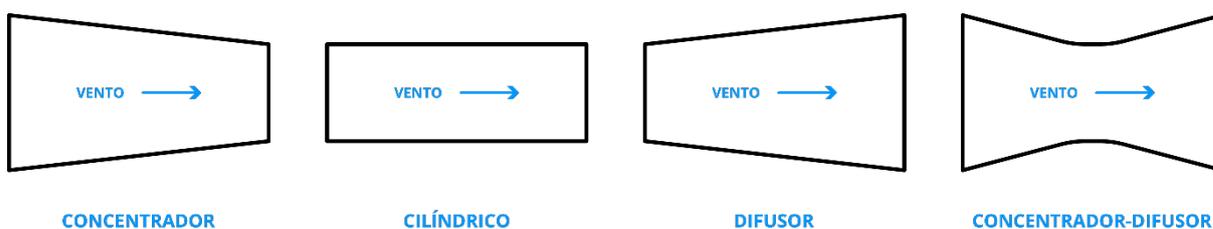
Fonte: Olgin (2017).

Um difusor DAWT funciona acelerando a velocidade do vento que se aproxima da turbina eólica, controlando a expansão do escoamento de ar, numa relação convergente (entrada) e divergente (saída). A taxa de fluxo de massa de ar que passa através da turbina é aumentada em virtude da pressão subatmosférica significativa no plano de saída do difusor, devido a expansão controlada do fluxo de massas de ar

(FOREMAN *et al.*, 1978; IGRA, 1981; ABE *et al.*, 2005; OHYA *et al.* 2008, 2010). Os difusores são estruturas ocas que são dispostas em volta do rotor.

A tipologia dos difusores pode é normalmente dividida em quatro tipos: (i) concentrador, (ii) cilíndrico, (iii) difusor e (iv) concentrador-difusor. A figura 8 mostra a representação esquemática dos tipos mais conhecidos de difusores.

**Figura 8** - Representação esquemática dos tipos mais conhecidos de difusores.

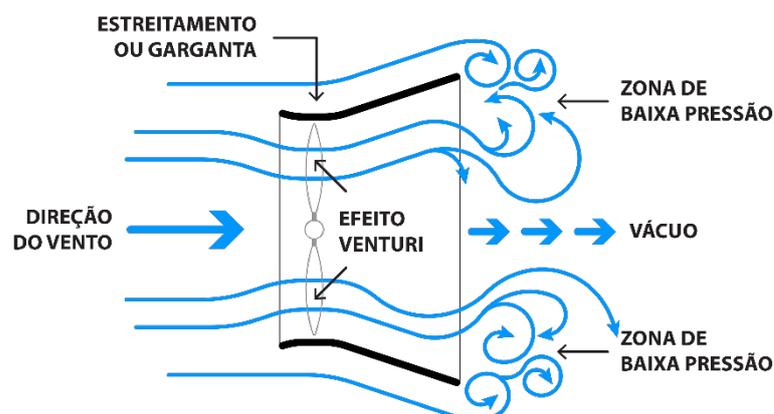


Fonte: Adaptado de Ohya *et al.* (2008).

O funcionamento aerodinâmico de uma turbina DAWT está associada ao Efeito Venturi ou efeito túnel. Este efeito ocorre quando um fluido em movimento constante dentro de um duto uniforme comprimi-se momentaneamente ao encontrar uma zona de estreitamento, também chamada de garganta, diminuindo sua pressão e resultando em um aumentando da velocidade do fluido após atravessar esse estreitamento. Este efeito, demonstrado em 1797, recebe o nome do físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822), e é explicado pela dinâmica dos fluidos através do princípio de Bernoulli que o publicou em seu livro *Hydrodynamica* em 1738, ao explicar 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).

Em resumo, o efeito Venturi está relacionado ao princípio de Bernoulli, ao princípio de continuidade de massa e ao teorema da conservação de energia. A figura 9 mostra o funcionamento aerodinâmico de uma turbina DAWT.

**Figura 9** - Funcionamento aerodinâmico de um difusor.



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

O estudo e o desenvolvimento de difusores (DAWT's) não são recentes, se estendem por um período de mais de 50 anos. Inicialmente Lilley e Rainbird (1956) realizaram experimentos com “moinhos de vento canalizados” (*ducted windmills*). Estudos posteriores (OMAN; FOREMAN, 1973; FOREMAN *et al.*, 1978; GILBERT *et al.*, 1978; FLETCHER, 1981; IGRA, 1977, 1981; GILBERT; FOREMAN, 1979, 1983) buscaram aprofundar o conhecimento teórico e maximizar o poder extraído das turbinas DAWT's.

Esses estudos foram muito influenciados pela primeira crise do preço do petróleo nos anos 70, que fomentou o interesse em formas alternativas de geração de energia. As pesquisas sobre DAWT's reduziram drasticamente nos anos seguintes, em parte devido a tecnologia não ser considerada rentável em relação às turbinas eólicas convencionais naquele momento (LIU; SHIGEO, 2015).

Após duas décadas, novos estudos (INOUE *et al.*, 2002; OHYA *et al.*, 2002) sobre turbinas DAWT's renovaram a discussão sobre este conceito. Estes estudos foram iniciados pelas pesquisas do Prof. Masahiro Inoue, pesquisador do Departamento de Engenharia e Prof. Yuji Ohya, pesquisador do Instituto de Mecânica Aplicada, ambos da Universidade de Kyushu no Japão, sobre difusores flangeados (*flanged diffusers*).

Estudos realizados na Universidade de Kyushu no Japão (INOUE *et al.*, 2002; OHYA *et al.*, 2002, 2004; ABE; OHYA, 2004, 2008; ABE *et al.*, 2005) procuraram investigar o uso de difusores flangeados (*flanged diffusers*). Abe e Ohya (2004)

investigaram através de simulações por fluidodinâmica computacional, ou CFD<sup>16</sup>, os campos de fluxos em torno de difusores flangeados para desenvolver turbinas eólicas de pequena escala.

A figura 10 mostra um difusor flangeado desenvolvido por Abe e Ohya (2004).

**Figura 10** - Difusor flangeado (*flanged diffuser*).



Fonte: Abe *et al.* (2005).

A adição de um flange, ou aba, na borda de saída do difusor da turbina eólica aumentou significativamente a potência, torque e a velocidade de rotação da turbina. Segundo Abe *et al.* (2005), a adição de um flange no plano de saída do difusor proporciona 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 resulta em um efeito aerodinâmico de sucção, trazendo mais escoamento de ar pelo difusor. Devido a este efeito, o escoamento de ar que entra no difusor pode ser eficazmente concentrado e acelerado em comparação com um difusor sem adição de flange.

A concentração e aceleração verificadas em um difusor flangeado são ocasionadas pelos vórtices proeminentes induzidos na saída do difusor, normalmente

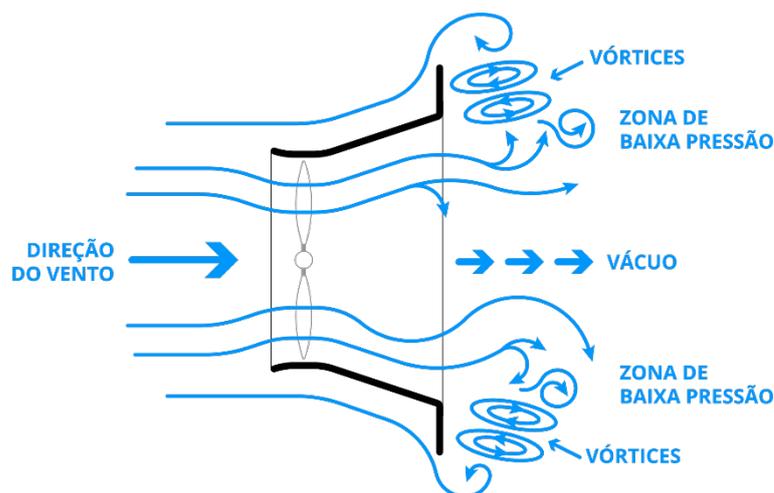
---

<sup>16</sup> Acrônimo em inglês de *Computational Fluid Dynamics*.

o aumento da velocidade do vento fica entre 1,6 a 2,4 vezes em relação a uma turbina sem difusor (OHYA *et al.*, 2008).

A figura 11 mostra o funcionamento aerodinâmico de um difusor flangeado.

**Figura 11** - Funcionamento aerodinâmico de um difusor flangeado.



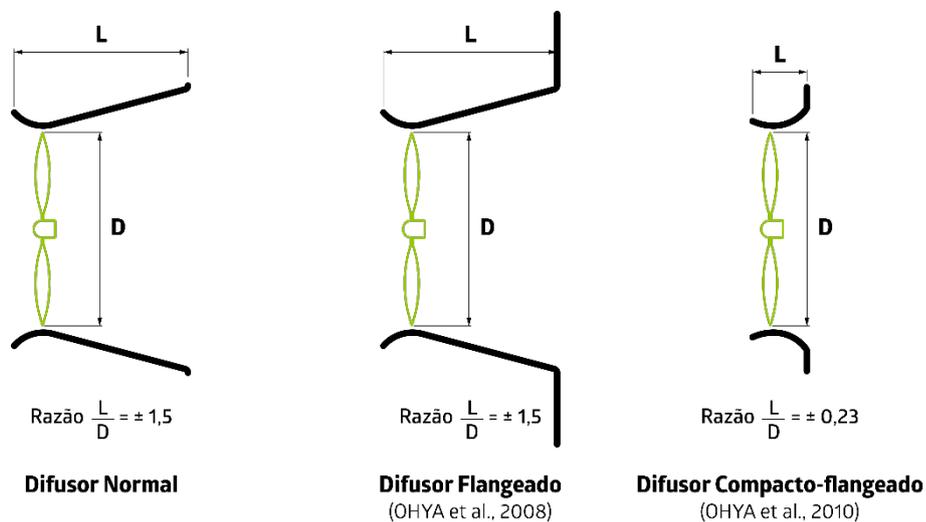
Fonte: Adaptado de Abe e Ohya (2004).

Nos estudos sobre turbinas DAWT, majoritariamente, houve um foco na concentração de energia eólica em um difusor com um grande ângulo aberto e uma camada limite controlada ao longo da superfície interna do difusor. Apesar dos resultados positivos em relação ao aumento de velocidade, difusores flangeados eram grandes e impactavam no peso estrutural da turbina eólica e aumentavam a carga do vento.

Nesse sentido, visando minimizar esses impactos, foram iniciados por Ohya *et al.* (2010) estudos sobre difusores flangeados modificados de tamanho reduzido. Os autores buscavam reduzir o tamanho do difusor, sem perder os efeitos aerodinâmicos de aumento de potência e velocidade dos difusores flangeados comuns. Desenvolveram então, um difusor compacto-flangeado (*compact-type brimmed diffuser*), denominado *Wind-Lens Technology*. Esse difusor compacto (*Wind-Lens*) tem um perfil geométrico convexo na sua parte interior e um flange na borda de saída do difusor menor. Um difusor *Wind-Lens* tem um comprimento 85% menor em relação ao um difusor flangeado normal.

A figura 12 mostra a diferença de tamanho entre os difusores abordados neste estudo e a razão média entre comprimento (L) e o diâmetro do rotor (D).

**Figura 12** - Diferença entre difusores e a razão entre seus tamanhos.



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

Ohya *et al.* (2010) verificou que um formato compacto de difusor com seção convexa e borda de saída flangeada permitia uma aumento considerável na potência de saída, em torno de 4 a 5 vezes em comparação com uma turbina eólica convencional. Estas turbinas são capazes de gerar uma quantidade significativa de energia, mesmo em áreas com ventos de baixa velocidade e turbulentos. A figura 13 mostra um difusor compacto-flangeado *Wind-Lens*.

**Figura 13** - Difusor compacto-flangeado *Wind-Lens*.



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

O desenvolvimento de um difusor flangeado de tamanho compacto permitiu reduzir significativamente a complexidade estrutural necessária para acoplar em uma turbina eólica. Também reduziu os custos relacionados, equalizando a balança do custo-benefício para turbinas eólicas desta natureza. Um ponto negativo que ainda permanece é a limitação do uso de difusores à turbinas eólicas de pequeno e média escala, pois o uso em turbinas maiores desequilibraria a relação custo benefício, como também, um incremento estrutural considerável.

### 2.3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Devido ao alto custo experimental dos túneis de vento físico, projetistas buscaram desenvolver novas formas de realizar seus testes. Nesse sentido, em alternativa aos testes experimentais e com a melhora da capacidade computacional disponível nos computadores nas últimas décadas permitiu um aumento exponencial de desempenho em sistemas de apoio computacional orientados ao projeto (CAD<sup>17</sup>, CAM<sup>18</sup>, CAE<sup>19</sup>) e nos sistemas de simulação virtual orientados à mecânica dos fluídos, a Fluidodinâmica Computacional ou mais conhecida como CFD, do acrônimo em inglês, *Computational Fluid Dynamics*.

A Fluidodinâmica Computacional, consiste em um conjunto de ferramentas e técnicas usadas na análise de sistemas envolvendo escoamentos de fluídos, transferências de calor e massa e outros fenômenos associados através de simulações numéricas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A abordagem CFD surgiu por volta dos anos 1970 combinando a física, os métodos numéricos e a informática com o intuito de simular o fluxo de fluídos de forma virtual (DATE, 2005).

Seu uso em projetos de design, arquitetura e engenharia possibilita conhecimentos qualificados em diversas etapas do projeto e permitem uma maior flexibilidade das condições experimentais, já que ensaios experimentais em túnel de vento físico, especialmente em grande escala, frequentemente têm um alto custo e

---

<sup>17</sup> Acrônimo em inglês de *Computer-Aided Design* (Desenho Assistido por Computador).

<sup>18</sup> Acrônimo em inglês de *Computer-Aided Manufacturing* (Manufatura Assistida por Computador).

<sup>19</sup> Acrônimo em inglês de *Computer-Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador).

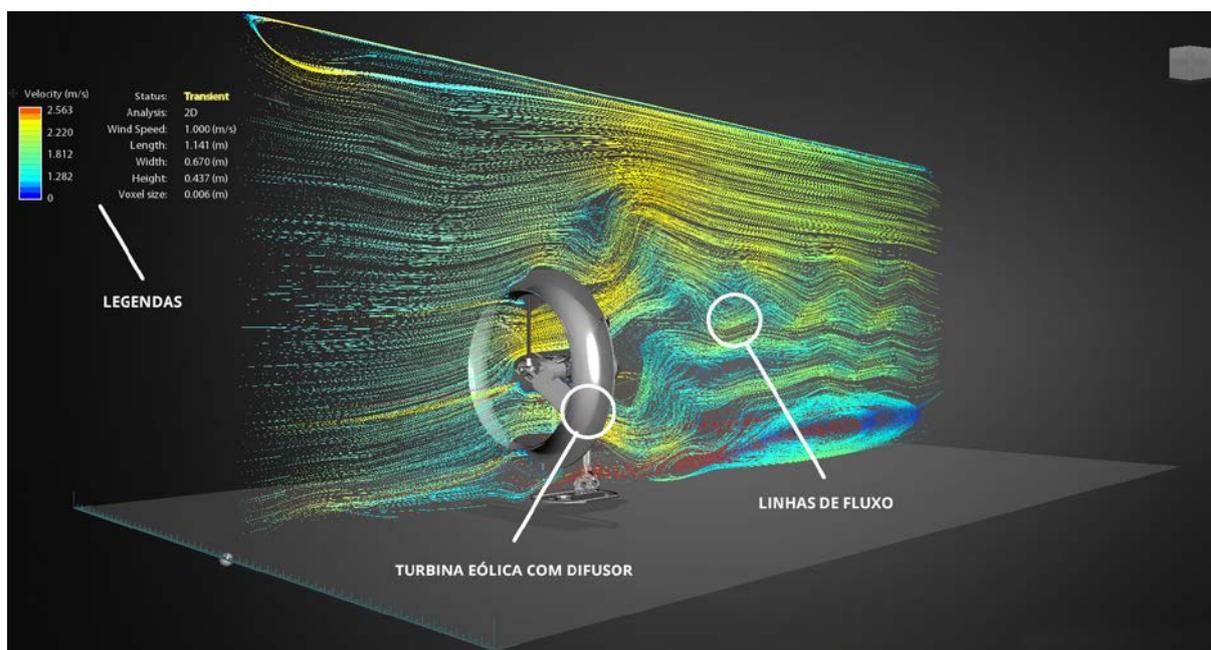
demandam recursos humanos, financeiros e, além disso, influenciam no tempo de desenvolvimento do projeto.

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

A fase de Pré-processamento corresponde à introdução de todos os parâmetros do problema. Esta fase compreende as seguintes ações: (i) modelação da geometria, (ii) criação da malha, (iii) seleção dos fenômenos a serem modelados, (iv) definição das propriedades do fluído e (v) especificação das condições de simulação.

O Solver é o responsável pela aplicação das técnicas numéricas da solução e aplicação dos algoritmos para resolução dos problemas simulados. De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007) a base do Solver executam as seguintes ações: (i) integração das equações que regem o fluxo do fluído sobre todo o volume de controle do domínio, (ii) discretização, ou seja, conversão de equações integrais em sistemas de equações algébricas e (iii) solução das equações de forma iterativa.

O Pós-processamento é quando ocorre a visualização dos resultados obtidos na fase anterior, é a parte visual e gráfica do processo CFD, permitindo: (i) visualização da geometria e da malha, (ii) gráficos de vetores, linhas e contornos, (iii) gráficos de superfície 2D e 3D e (iv) visualização de linhas de fluxo e trajetórias de partículas. A figura 14 mostra um resultado de um pós-processamento CFD.

**Figura 14** - Exemplo de pós-processamento CFD.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A possibilidade de realizar simulações e testes com o intuito de legitimar as hipóteses e alternativas que se pretende desenvolver, antes mesmo da etapa de prototipagem, garante a economia de tempo e diminuição de custos. No entanto, os softwares CFD exigem grande capacidade de memória, espaço em disco e poder de processamento, e têm requisitos de hardware mais altos e específicos. Outra desvantagem são as complexas equações que governam as rotinas CFD para o processamento de simulações desta natureza.

O uso dessas ferramentas não é intuitivo para boa parte dos designers cuja intenção é apenas uma verificação rápida de suas alternativas iniciais de projeto. Outro problema é a grande quantidade de dados e informações que são geradas, pois essas informações tornam-se desnecessárias em etapas iniciais do projeto, onde designers e projetistas desejam apenas testar e validar rapidamente ideias no início do ciclo de desenvolvimento.

Para profissionais de áreas como o Design, onde o uso da abordagem CFD é restrito, devido à complexidade de uso anteriormente mencionada, começam a surgir no mercado alternativas de *softwares* mais intuitivos e fáceis de usar, visando expandir o uso da tecnologia e proporcionar para outras áreas a gama de

possibilidades que aplicações CFD permitem. Um dessas alternativas é o *software* comercial Autodesk Flow Design, que será melhor abordado no capítulo seguinte.

## 2.4. TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

### 2.4.1. Túnel de Vento Físico

As características operacionais de um túnel de vento dependerão da finalidade para qual o túnel de vento será destinado. Barlow *et al.* (1999) elenca túneis de ventos com diferentes finalidades, como por exemplo, aeronáutica, automobilística, acústica, construção civil.

Um túnel de vento pode ser classificado sobre diferentes aspectos. Com base na velocidade do fluxo (BARLOW *et al.*, 1999):

- (i) Subsônico: Velocidade máxima do fluxo de ar até 135 m/s ( $Ma^{20}$  0,4);
- (ii) Transônicos: de Ma 0,4 a 340 m/s (Ma 1);
- (iii) Supersônicos: de Ma 1 a 1715 m/s (Ma 5);
- (iv) Hipersônico: de Ma 5 a 5145 m/s (Ma 15).

Com base na forma (CATTAFESTA *et al.*, 2010):

- (i) Circuito Fechado: possuem uma massa de ar fixa, sem abertura externa e circulam o fluxo em um loop através dos vários componentes do túnel de vento. O fluxo é mais linear e uniforme do que no tipo aberto;
- (ii) Circuito Aberto: possuem as extremidades abertas, por onde entra e sai o escoamento de ar. Têm custos de fabricação geralmente menores e ocupam menos espaço. Uma desvantagem é que, para uma determinada velocidade, requer mais energia para a operação (BARLOW *et al.*, 1999).

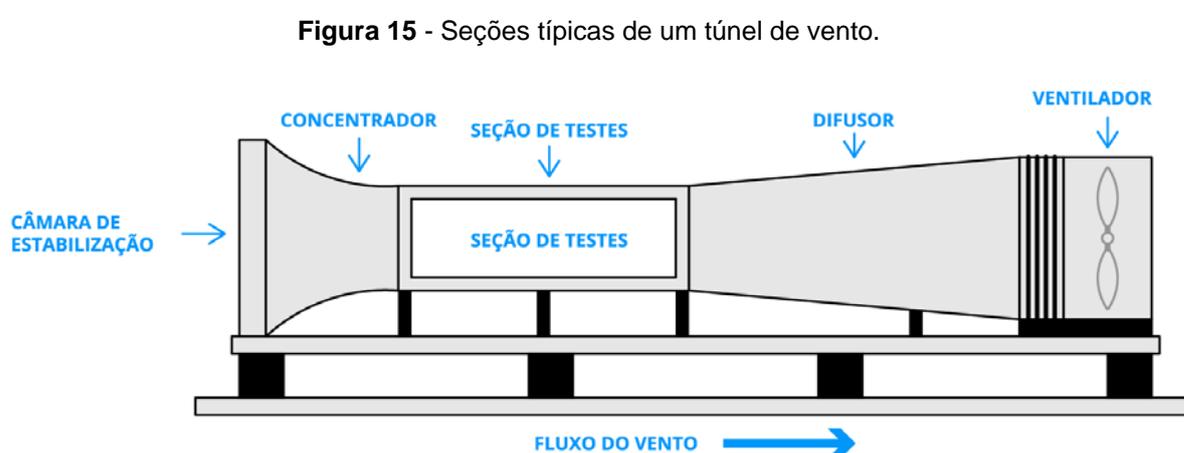
---

<sup>20</sup> O Número de Mach (Ma) é uma medida adimensional de velocidade. É definida como a velocidade do som. Não existe um valor absoluto, a velocidade varia de acordo com o meio onde ela se propaga. No ar, em condições normais de pressão e ao nível do mar a uma temperatura de 20° C, as ondas sonoras se propagam a 340,29 m/s ou 1.225,044 km/h.

Túneis de vento de circuito aberto são divididos em duas categorias (BARLOW *et al.*, 1999):

- (i) Túnel Aspirador (*suckdown*): o ventilador é instalado após a seção de testes. O ar entra com turbulência significativa.
- (ii) Túnel Ventilador: o ventilador é instalado antes da seção de testes. A turbulência é menor.

A figura 15 apresenta as seções típicas de um túnel de vento de circuito aberto do tipo aspirador (*suckdown*).



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

A eficiência aerodinâmica é um fator-chave para projetos que irão interagir com escoamentos de fluídos, quanto antes houver a otimização da performance aerodinâmica mais agilidade e economia de recursos serão alcançados no desenvolvimento projetual. Nesse sentido, uma das mais recorrentes e importantes formas de aferição desse desempenho tem sido “através de ensaios em túnel de vento, com a utilização de modelos reduzidos, configuram-se como a melhor ferramenta disponível para projetos desta natureza” (NÚÑEZ *et al.*, 2012, p.21).

Nesta pesquisa a utilização de ensaios em túnel de vento físico serão o instrumento principal para validar os resultados obtidos nas simulações por CFD, por meio do uso de um simulador de túnel de vento virtual. Ensaios em túnel de vento tem por objetivo caracterizar os resultados quando técnicas teóricas e/ou computacionais

são inadequadas ou insuficientes, devido à complexidade do problema ou à falta de recursos computacionais adequados para a solução do problema simulado.

Nesta pesquisa foi utilizado um túnel de vento subsônico do tipo aspirador (*suckdown*) de circuito aberto, localizado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) do Departamento de Materiais (DEMAT) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EE-UFRGS), local onde esta pesquisa se desenvolveu.

#### **2.4.2. Túnel de Vento Virtual**

Cada vez mais projetistas, engenheiros e designers buscam maneiras mais eficientes, rápidas e econômicas para avaliar os conceitos e soluções projetuais em etapas iniciais do projeto. Essas preocupações são estrategicamente relevantes na atualidade, pois ciclos de inovação cada vez mais rápidos e curtos forçam projetistas a avaliar de forma rápida e econômica várias alternativas projetuais, otimizando o custo e o desempenho dos seus projetos.

*Softwares* de simulação se baseiam na Fluidodinâmica Computacional (CFD), anteriormente abordada nesta pesquisa, porém essas soluções necessitam de conhecimento avançado e domínio de cálculos complexos para executar uma simulação CFD, o que necessita muitas vezes de profissionais especializados em calcular e configurar uma simulação CFD em um *software* comercial.

Nesse sentido, com objetivo de simplificar algumas rotinas de CFD e expandir o uso para outras áreas como o Design, é que empresas começam a desenvolver soluções CFD mais descomplicadas, ou seja, com uma interface de usuário intuitiva e configurações pré-definidas, permitindo simular objetos com rapidez e qualidade.

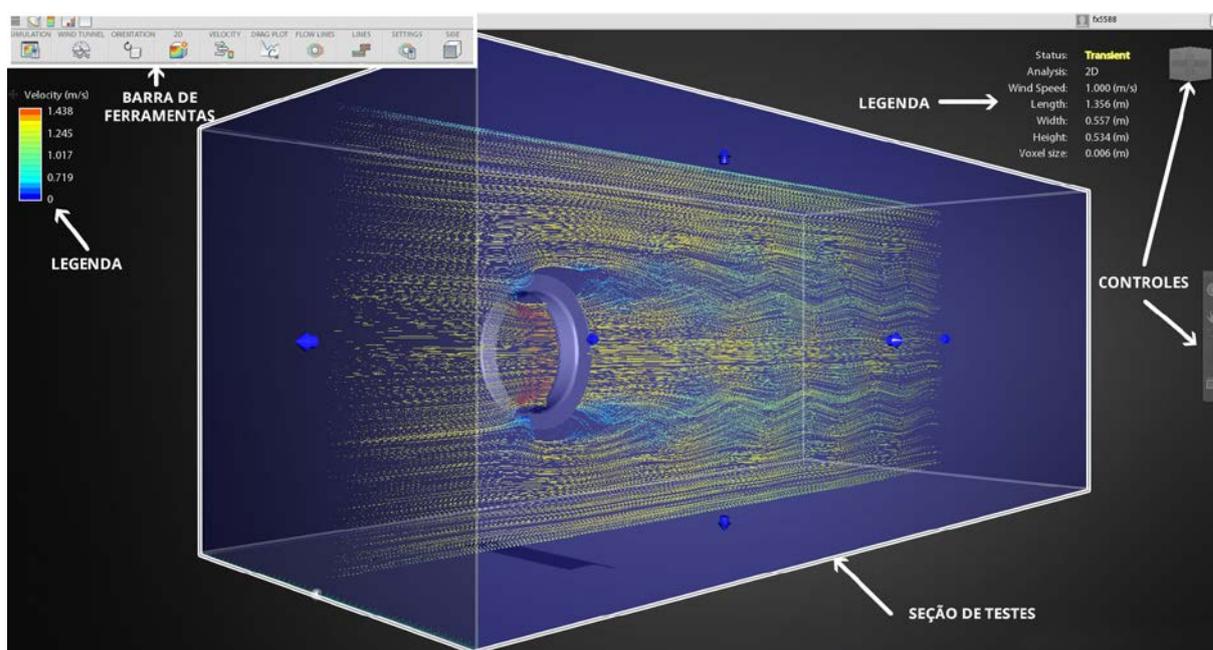
A Autodesk, empresa de software de design, engenharia e conteúdo digital, desenvolveu uma solução comercial *easy-to-use* para simulações CFD, o Autodesk Flow Design. Este software simula um túnel de vento virtual para visualizar o escoamento de ar em torno de edifícios, veículos, edifícios, produtos de consumo e outros objetos. Possui suporte para muitos tipos de arquivos CAD, reduzindo o

trabalho de preparação de geometria, o que permite obter resultados e insights projetuais rápidos ao explorar diferentes condições de simulação (AUTODESK, 2017).

O Flow Design compartilha muitas similaridades com outras aplicações de CFD, mas é uma solução CFD bem mais intuitiva, apropriada para designers e projetistas que não necessitam ou não dispõem de tempo projetual para aprender e operar um solução CFD completa. Ele oferece uma interface de usuário intuitiva assim como integração à softwares CAD. A tecnologia de malhas automáticas (*automatic meshing technology*) permite uma tolerância às imperfeições na geometria dos modelos a serem simulados, resultando em rápido processamento e visualização.

O Flow Design executa um Solver de fluxo transiente incompressível por meio de método dos volumes finitos. A turbulência é resolvida usando um modelo Smagorinsky - LES (*Smagorinsky Large Eddy Simulation*) na Simulação de Grandes Escalas (AUTODESK, 2017). As etapas de pré-processamento, solver e pós-processamento são executadas automaticamente por configurações pré-definidas pelo software, o que permite entregar resultados tão rapidamente quanto possível e permitir que designers explorem os efeitos das mudanças de condições, sem ter de criar novos modelos, desenvolver estudos separados ou armazenar grandes quantidades de dados. A figura 16 mostra a área de trabalho do Flow Design.

Figura 16 - Área de trabalho do Flow Design.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Flow Design foi desenvolvido para ajudar os projetistas a entender e explorar o comportamento do fluxo no início do processo de projeto, fornecendo um túnel de vento virtual na área de trabalho que modela o escoamento de ar em edifícios, automóveis, equipamentos esportivos ou outros produtos de consumo. Ele permite que os projetistas vejam rapidamente como o escoamento de ar e o vento interagem com seus modelos em várias velocidades e direções do vento, além de fornecer estimativas de velocidade, pressão e resistência aerodinâmica. Essa simplicidade no uso propicia a designers e projetistas beneficiar-se desta tecnologia em seus projetos, sem precisar investir tempo projetual com complexos códigos de programação e cálculos matemáticos.

A simulação computacional por meio da fluidodinâmica computacional (CFD) tem sido utilizada em alguns estudos (ABE; OHYA, 2004; ABE *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2008) para modelar o design do difusor. Este *software* será adotado nesta pesquisa como solução CFD padrão para realizar as simulações computacionais com as soluções desenhadas.

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

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

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Seguindo os critérios de classificação de Prodanov e Freitas (2013) para uma pesquisa científica, podemos classificar o presente estudo, do ponto de vista de sua natureza, como uma Pesquisa Básica, pois objetiva gerar conhecimentos projetuais novos e úteis sobre design para projetos de turbina eólica de pequena escala, sem prever por enquanto uma aplicação imediata da tecnologia.

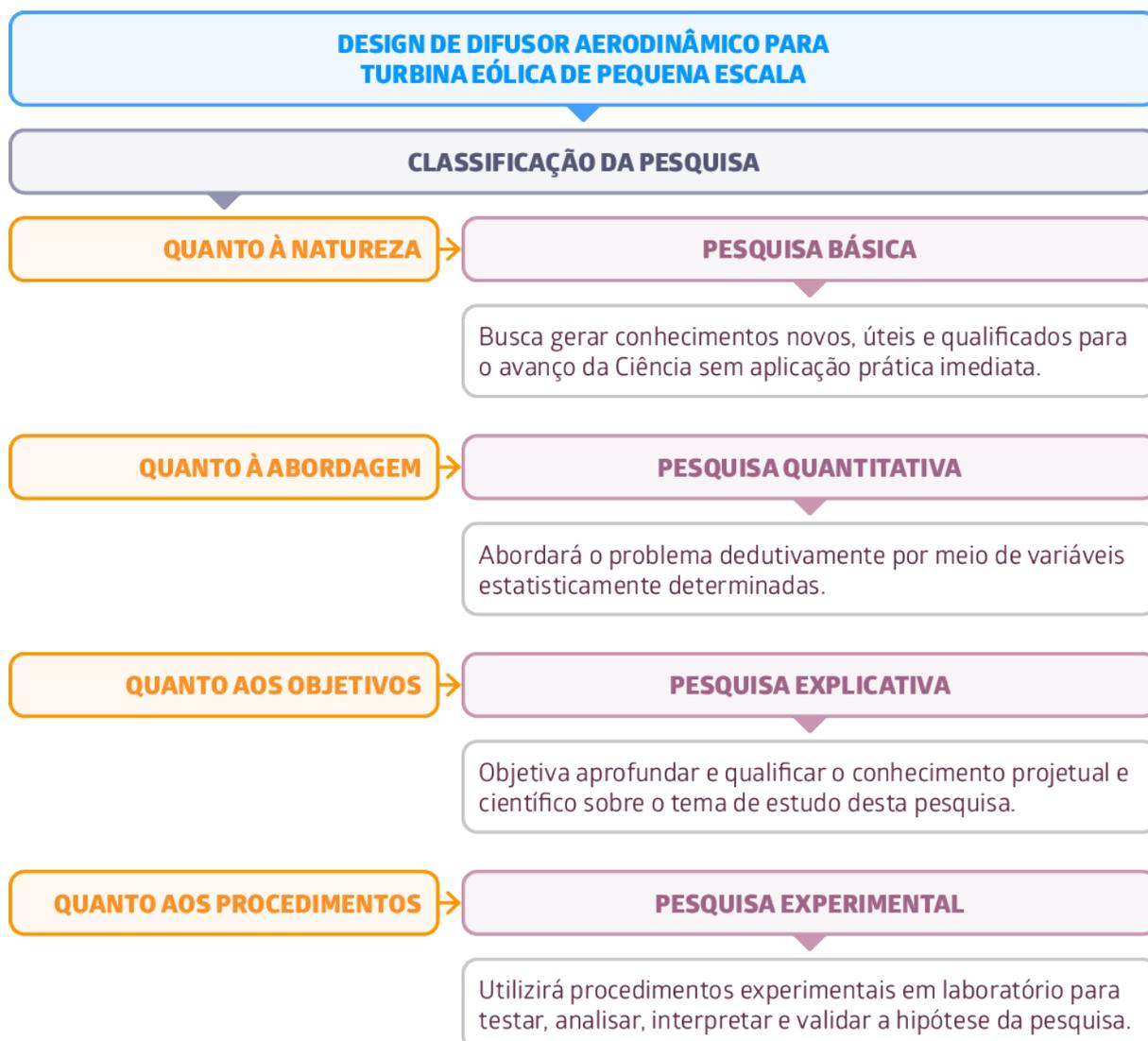
Sob o ponto de vista da abordagem do problema, esta pesquisa tem caráter Quantitativo, pois busca por meio de procedimentos experimentais colher dados estatísticos de um fenômeno e responder a hipótese pela análise das relações entre as variáveis testadas.

Sob o ponto de vista dos objetivos, esta pesquisa tem objetivo Explicativo, pois visa conectar as ideias para compreender as causas e efeitos de determinado fenômeno ou anomalia para poder explicar o que está acontecendo, além de aprofundar e qualificar o conhecimento projetual e científico sobre o tema de estudo desta pesquisa.

Quanto aos procedimentos técnicos, ou seja, a forma pela qual obtemos os dados necessários para o delineamento da pesquisa, esta delinea-se como uma Pesquisa Experimental, pois neste estudo são algumas variáveis relacionadas com o fenômeno estudado para testar e validar, em um ambiente controlado em laboratório, a hipótese a ser validada.

A figura 17 mostra um desenho esquemático da classificação desta pesquisa.

Figura 17 - Classificação da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Prodanov e Freitas (2013).

Este estudo se utilizará de técnicas padronizadas para a coleta e análise de dados, dentre as quais destacam-se o uso de simulação por fluidodinâmica computacional (CFD) e testes em túnel de vento físico.

### 3.2. ETAPAS DA PESQUISA

Na metodologia de trabalho proposta para a presente pesquisa, procurou-se dividir em duas fases (Fase informacional e Fase Projetual), a primeira visando o estudo e à compreensão da temática, problemas e objetivos da pesquisa e a segunda

direcionada às etapas projetuais para aplicação prática dos conhecimentos apreendidos à solução do problemas estabelecidos para esta pesquisa.

As duas fases são compostas por seis etapas distintas (Identificação, Preparação, Ideação, Elaboração, Avaliação e Conclusão). A partir das seis etapas metodológicas apresentadas, tipificam-se os procedimentos que serão adotados para alcançar os objetivos a qual a pesquisa se propõe. A figura 18 mostra um diagrama da metodologia básica da pesquisa.

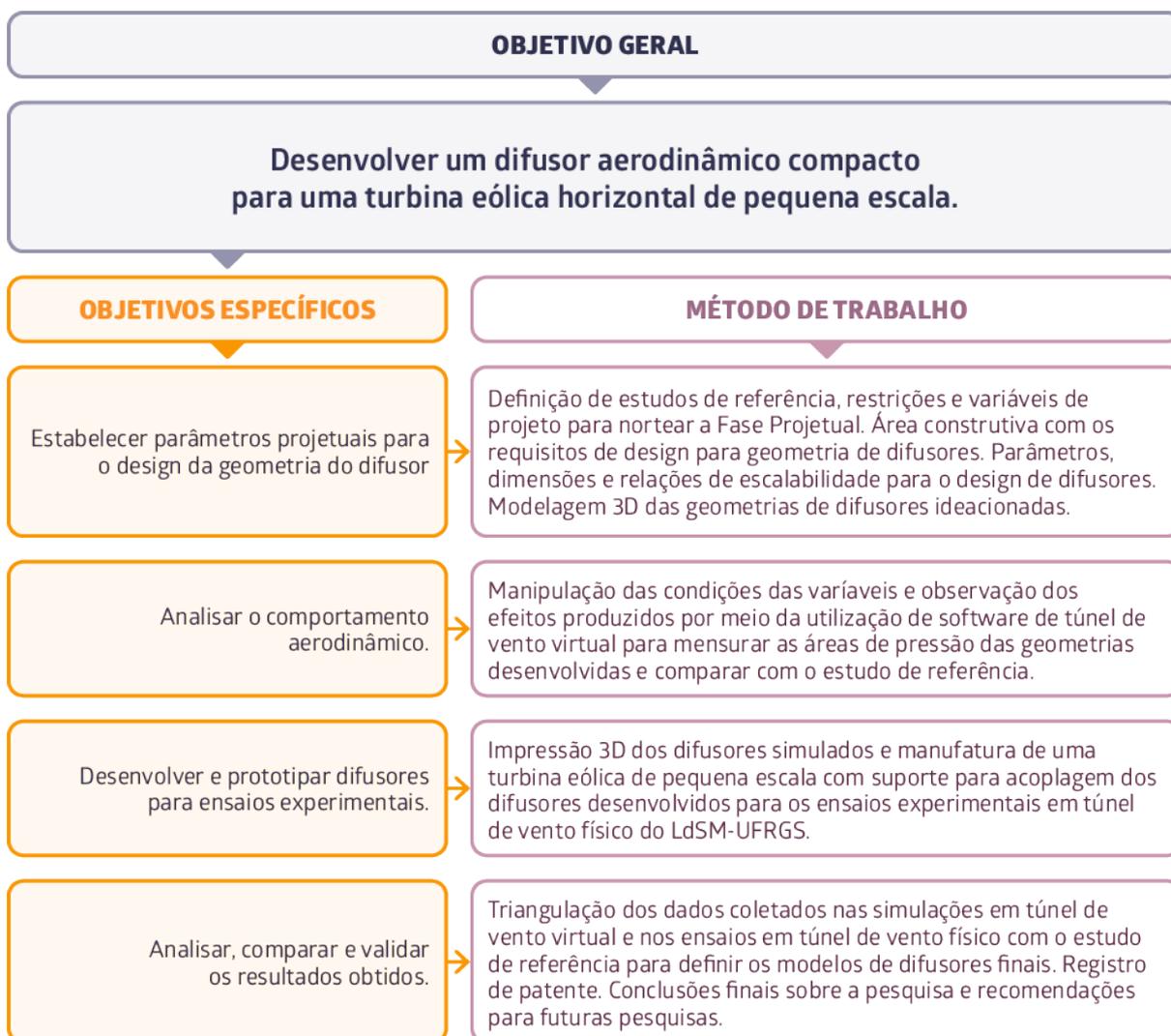
**Figura 18** - Diagrama da metodologia básica da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da premissa proposta por Lakatos & Marconi (2003), que relaciona diretamente os objetivos definidos para a pesquisa com os procedimentos metodológicos a serem adotados, desenvolveu-se um esquema relacionando os objetivos da pesquisa com seus métodos de trabalho correspondentes. A figura 19 apresenta a relação entre os objetivos da pesquisa e os métodos de trabalho.

**Figura 19** - Relação entre objetivos da pesquisa e métodos de trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para alcançar o primeiro objetivo específico buscou-se estabelecer parâmetros para o design das geometrias dos difusores. Para isso, definiu-se estudos que serviram de referência para guiar a execução deste e dos objetivos específicos estabelecidos restantes.

Foram estabelecidos os estudos de Ohya *et al.* (2010) sobre difusores compactos-flangeados (*Wind-Lens Technology*) como tecnologia e referencial conceitual e teórico para o design de novos difusores. Utilizou-se também os estudos de Oliveira (2017), para selecionar os perfis aerodinâmicos de pás utilizados na turbina eólica desenvolvida para ser usada com os difusores na etapa de ensaios em túnel de vento físico. Os estudos de Oliveira (2017) fazem parte de uma sequência de

pesquisas desenvolvidas pelo Prof. 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). Estabeleceu-se também as restrições e as variáveis do objeto de estudo consideradas e avaliadas para esta pesquisa.

A partir disto, propôs-se uma área construtiva padronizada para o design da geometria para difusores aerodinâmicos. Esta área construtiva permitiu desenvolver as geometrias que foram testadas e avaliadas nas simulações CFD em túnel de vento virtual e nos ensaios em túnel de vento físico. Esta área construtiva foi baseada nos parâmetros e dimensões do difusor *Wind-Lens* encontradas nas pesquisas de Ohya *et al.* (2010) e Takahashi *et al.* (2012) e na escala de projeto definida para este estudo. As geometrias ideacionadas em perfis seccionais bidimensionais (2D) foram modeladas tridimensionalmente (3D) em *software* comercial CAD SolidWorks para a etapa de simulação por CFD.

Para alcançar o segundo objetivo específico, simulou-se as geometrias de difusores desenvolvidas no *software freeware*<sup>21</sup> CFD de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design. Este *software* é um simulador de túnel de vento otimizado para avaliação rápida do escoamento de ar em fases iniciais de projeto. As simulações em túnel de vento virtual são a primeira etapa de avaliação das variáveis estabelecidas. O objetivo das simulações foi analisar as diferentes zonas de baixa pressão produzidas pela geometria do difusor, como também verificar a intensidade dos vórtices produzidos no seu plano de saída. Aquelas geometrias que tiverem um resultado igual ou superior ao modelo de referência de Ohya *et al.* (2010) foram selecionadas para a etapa posterior, os ensaios em túnel de vento físico.

Para alcançar o terceiro objetivo específico, prototipou-se em impressora 3D os difusores selecionados e modelados nas etapas anteriores para os ensaios em túnel de vento físico. Além disso, projetou-se e prototipou-se uma turbina eólica de pequena escala (TEPE), seguindo a nomenclatura estabelecida por Kishore *et al.* (2013, 2014),

---

<sup>21</sup> *Freeware* ou *software* gratuito é qualquer programa de computador cuja utilização não implica no pagamento de licenças de uso ou *royalties*. Um programa *freeware* não é necessariamente um *software* livre, pois pode não ter código aberto e pode conter licenças restritivas, limitando o uso comercial, a redistribuição não autorizada, a modificação não autorizada ou outros tipos de restrições.

para dar suporte aos difusores nos ensaios experimentais. Esta turbina eólica foi projetada de acordo as dimensões do túnel de vento localizado no LdSM-UFRGS e seu projeto permitiu o acoplamento dos difusores desenvolvidos. A TEPE utilizou o perfil aerodinâmico de pás desenvolvida por Oliveira (2017). Para o projeto da TEPE foi utilizado modelagem tridimensional CAD (*computer-aided design*) e prototipagem por meio de impressão 3D via FFF<sup>22</sup> (*fused filament fabrication* - fabricação por filamento fundido), corte laser e usinagem por torneamento mecânico. Os equipamentos para a prototipagem encontram-se localizados na Oficina de Modelos, Protótipos e Maquetes da Faculdade de Arquitetura da UFRGS (FA-UFRGS).

Para os ensaios experimentais, utilizou-se o túnel de vento subsônico de circuito aberto do tipo aspirador (*suckdown*). Os ensaios em túnel de vento físico tem por finalidade mostrar o comportamento dinâmico da turbina eólica com um difusor acoplado. Estes ensaios experimentais permitiram identificar quais geometrias aceleraram mais o escoamento de ar, e conseqüentemente, melhoraram o *start* rotacional da turbina eólica de pequena escala.

A geometria do difusor é a variável independente e as zonas de vórtices de baixa pressão produzidas no plano de saída do difusor é a variável dependente. A análise estatística e a coleta de dados foi realizada em duas etapas.

A primeira etapa de coleta e análise de dados aconteceu na simulação computacional. Os dados foram coletados a partir das informações de simulação por planos de pressão e tensão disponibilizadas pelo software CFD de túnel de vento virtual Flow Design. O software mostrou na tela de simulação um gráfico de cores com as variações de pressão, do maior valor de pressão (alta pressão) ao menor valor de pressão (baixa pressão). Os dados estatísticos mostrados nesse gráfico foram quantificadas e comparadas de forma visual com as áreas de alta e baixa pressão mostradas pelo software através de zonas coloridas. A intensidade da zona de baixa pressão no plano de saída do difusor foi considerado um índice da probabilidade da geometria do difusor produzir vórtices que aceleram o escoamento de ar pela TEPE.

---

<sup>22</sup> Também conhecida como FDM (*Fused Deposition Modeling*, em português, Modelagem por depósito de material fundido), esta terminologia é uma marca registrada da empresa Stratysys Inc., pioneira no desenvolvimento da tecnologia. Porém, a impressão 3D ganhou popularidade entre os fabricantes e criou-se a terminologia FFF (*fused filament fabrication* - fabricação por filamento fundido) para que os desenvolvedores pudessem discutir a tecnologia sem medo de infringir a marca registrada.

Esses dados numéricos e visuais foram comparados com o difusor de referência de Ohya *et al.* (2010).

A segunda etapa será nos ensaios experimentais em túnel de vento físico, onde os dados serão quantificados por meio da análise das rotações por minuto (RPM) verificadas nos experimentos e da velocidade de vento necessária para o *start* rotacional. A velocidade do vento será mensurada por um anemômetro digital e as rotações por minuto serão quantificadas através do uso de um tacômetro digital.

A análise das variáveis nos ensaios de túnel de vento do LdSM-UFRGS deu-se de forma indireta, pelas análises comparativas das RPM produzidas e da velocidade de vento necessária para o *start* rotacional. Estes dados coletados foram indicativos indiretos que a geometria do difusor produziu zonas de vórtices de baixa pressão que potencializaram o efeito aerodinâmico de aspiração, fazendo o escoamento de ar acelerar mais na sua passagem pelo difusor.

Os dados coletados nas simulações em túnel de vento virtual e os dados coletados com os ensaios experimentais em túnel de vento físico foram triangulados com os dados apresentados pela geometria de difusor de referência, tanto na simulação computacional quanto nos ensaios em túnel de vento físico. Essa triangulação permitiu alcançar o quarto e último objetivo, analisar, comparar e validar os resultados obtidos e selecionar as alternativas de difusores de melhor desempenho, chegando às conclusões finais e recomendações para futuras pesquisas.

Paralelamente a execução das etapas, serão realizadas os registros de patente e de desenho industrial das geometrias selecionadas junto a Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico (SEDETEC) da UFRGS, órgão da universidade responsável pelos assuntos relativos à propriedade intelectual e transferência de tecnologia, envolvendo a interação da Universidade com Empresas e Instituições Públicas. Também será produzido um artigo a partir de um excerto do desenvolvimento da pesquisa e submetido para avaliação em um periódico (*journal*) de referência na área relacionada ao objeto de estudo do presente trabalho.

#### 4. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Este capítulo é a transição da fase informacional para a Fase Projetual da pesquisa, a ser dividido em quatro momentos. Estes três momentos projetuais correspondem as etapas de Ideação (3), Elaboração (4) e Avaliação (5), estabelecidas na metodologia de trabalho proposta para a presente pesquisa, ficando a última etapa Conclusão (6) para o próximo capítulo.

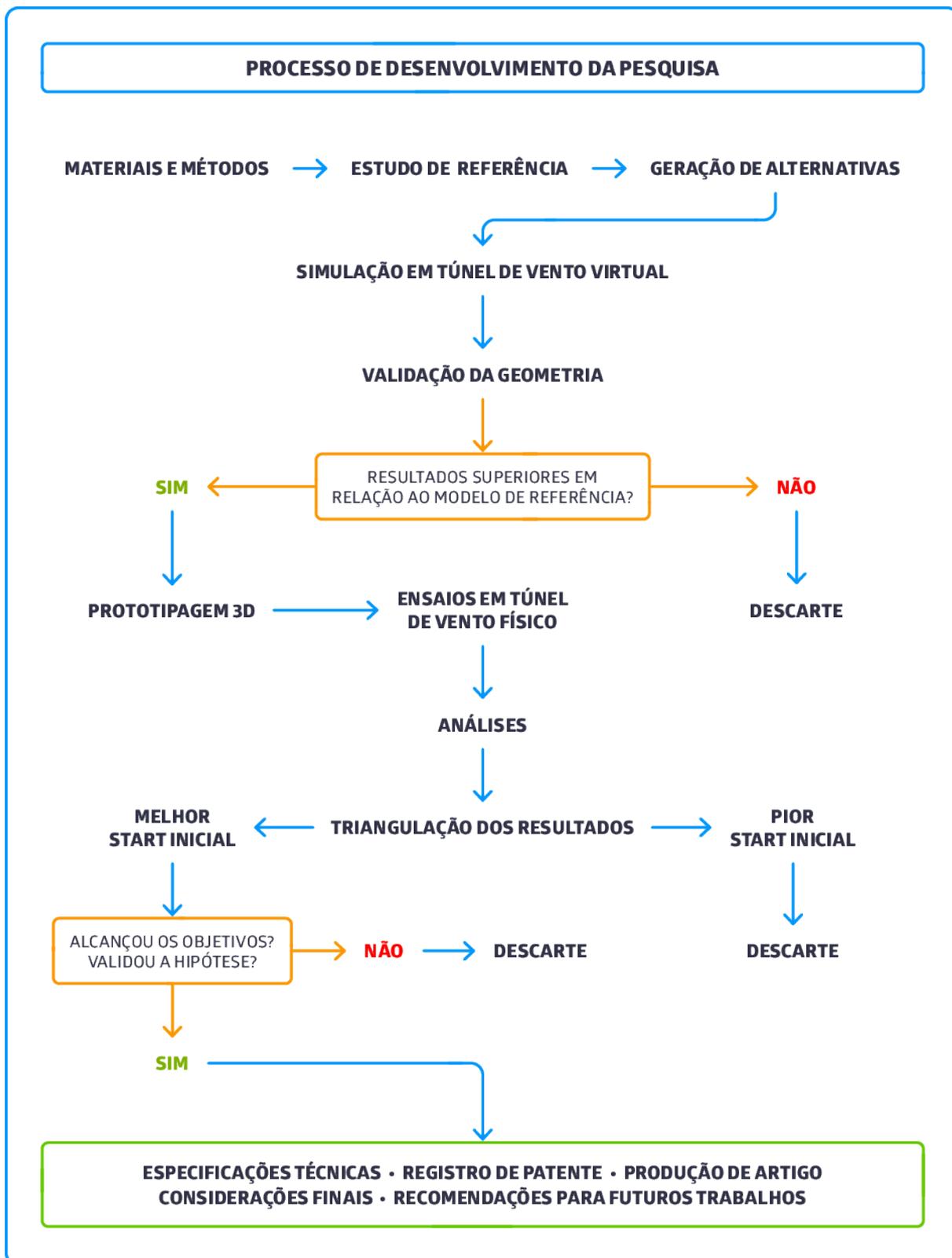
No primeiro momento acontece a Problematização, onde são traçadas as metas gerais do projeto e apresentados todos os conhecimentos científicos e técnicos pertinentes e necessários que guiarão projetualmente a pesquisa. A problematização serve como uma introdução ao projeto.

No segundo momento são realizados as simulações em túnel de vento virtual. É a primeira parte de validação projetual. As geometrias geradas serão simuladas e avaliadas para o próximo momento projetual, os ensaios em túnel de vento físico.

No terceiro momento acontece os ensaios em túnel de vento físico, onde as geometrias selecionadas na simulação computacional são prototipadas em impressora 3D e testadas para analisar o comportamento dinâmico da turbina eólica com um difusor acoplado.

Na figura 20, são apresentadas por meio de um esquema visual simplificado o processo a ser executado na Fase Projetual até a conclusão da pesquisa.

**Figura 20** - Diagrama básico do processo de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1. PROBLEMATIZAÇÃO

Por meio das perguntas Bonsipianas (BONSIEPE, 1984), estrutura-se e também conhece-se um pouco mais sobre o desafio projetual preconizado pelo problema da pesquisa, o porquê dele ter sido escolhido e de que modo será solucionado.

##### **O quê?**

Um difusor aerodinâmico do tipo compacto-flangeado, baseado no conceito de Ohya *et al.* (2010), para uma turbina eólica de eixo horizontal de pequena escala, buscando o seu *start* rotacional em baixas velocidade de vento.

##### **Por quê?**

Difusores *Wind-Lens* permitiram compactar o tamanho de difusores sem perder o efeito aerodinâmico de aceleração do vento, o que ampliou as possibilidades de uso de difusores desse tipo, como por exemplo, em turbinas eólicas de pequena escala em ambientes com ventos instáveis e turbulentos.

##### **Como?**

Manipulando a geometria do difusor e observando seus impactos no efeito aerodinâmico de aceleração do vento, utilizando como instrumentos de projeto a simulação computacional por meio de túnel de vento virtual e ensaios em túnel de vento físico para selecionar a geometria de difusor que rotacione a turbina eólica com a menor velocidade de vento.

#### 4.2. ESTUDOS DE REFERÊNCIA

Nesta parte são apresentados os dois estudos de referência que guiarão projetualmente esta parte da pesquisa. Estes estudos estabelecem alguns referenciais conceituais e tecnológicos para o projeto dos difusores.

#### 4.2.1. Difusores *Wind-Lens Technology*

Como ponto de partida desta dissertação, utilizou-se os estudos realizados por Ohya *et al.* (2010) sobre difusores compacto-flangeados para turbinas eólicas (*compact-type brimmed diffuser*), denominados *Wind-Lens Technology*.

Estes difusores apresentam uma potência de saída melhor do que difusores flangeados padrão, anteriormente pesquisados por Ohya *et al.* (2002, 2004, 2008), Abe e Ohya (2004) e Abe *et al.* (2004). Difusores *Wind-Lens*, conforme Ohya *et al.* (2010) e Takahashi *et al.* (2012), mostram-se melhores para aplicações em turbinas eólica de pequena e média escala devido ao seu formato compacto e simplificado estruturalmente.

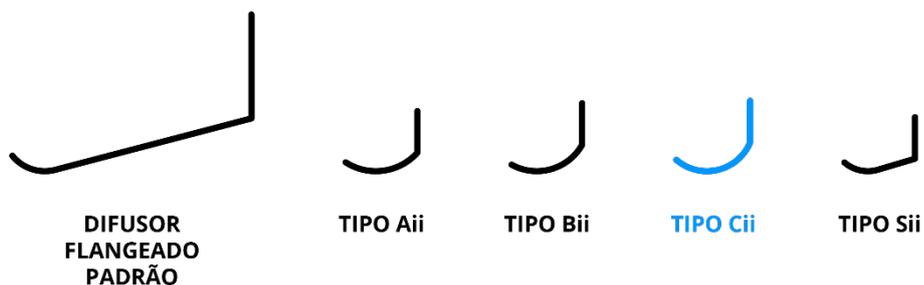
Ohya *et al.* (2010) desenvolveram quatro tipos de difusores com diferentes geometrias, denominados Tipos: (i) Aii-, (ii) Bii-, (iii) Cii- e (iv) Sii. Os três primeiros modelos possuem curvas cicloides e diferentes alturas de flange, enquanto o último modelo é uma forma compacta de um difusor flangeado padrão.

As simulações numéricas e ensaios em túnel de vento demonstraram que as geometrias baseadas em curva cicloide apresentaram melhores resultados. Posteriormente foram realizados testes com diferentes comprimentos, para encontrar a melhor razão entre comprimento (L) e diâmetro do rotor (D). O Tipo Cii com razão  $L/D=0,221$  foi o perfil que apresentou melhores resultados na relação comprimento do difusor versus potência de saída.

O perfil Cii Type foi utilizado como modelo *Wind-Lens* referência em estudos posteriores (TOSHIMITSU *et al.*, 2012; GÖLTENBOTT *et al.*, 2016; OHYA *et al.*, 2017).

A figura 21 mostra os perfis seccionais dos difusores desenvolvidos e o perfil seccional de referência (Tipo Cii) selecionado.

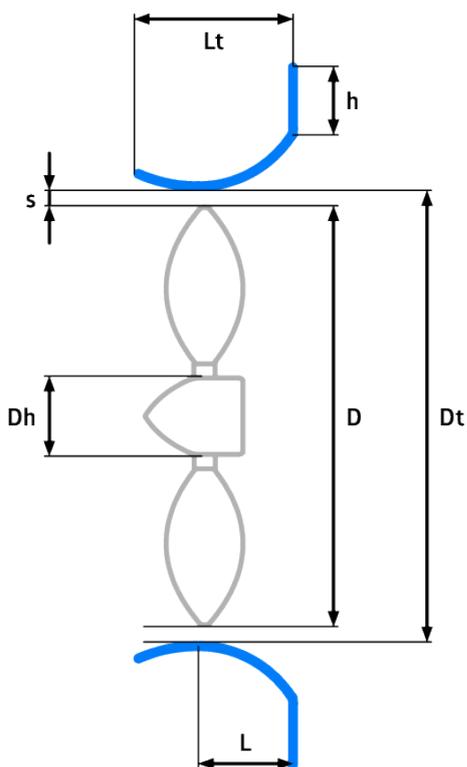
**Figura 21** - Perfis seccionais de difusores *Wind-Lens*.



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

As configurações técnicas de uma turbina *Wind-Lens* são apresentadas na figura 22.

**Figura 22** - Configurações técnicas de um difusor *Wind-Lens*.



Fonte: Adaptado de Ohya *et al.* (2010) e Takahashi *et al.* (2012).

A tabela 2 apresenta os parâmetros e valores das configurações técnicas de uma turbina com difusor *Wind-Lens*.

**Tabela 2** - Valores de configuração para um difusor *Wind-Lens*.

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Tipo de pá	-	NACA ou MEL
Diâmetro interno do difusor	$D_t$	2560 mm
Diâmetro do rotor	$D$	2500 mm
Diâmetro da nacele	$D_h$	360 mm
Comprimento do difusor	$L$	351 mm
Comprimento Total (concentrador + difusor)	$L_t$	576 mm
Altura do flange	$H$	256 mm
Afastamento da ponta	$S$	30 mm

Fonte: Takahashi *et al.* (2012).

As contribuições deste estudo estão no estabelecimento do conceito de difusor compacto, visto que a partir das configurações e parâmetros determinados anteriormente se consegue construir um Difusor *Wind-Lens* Tipo Cii, que será o modelo de difusor compacto-flangeado que guiará conceitualmente o desenvolvimento proposto por este trabalho.

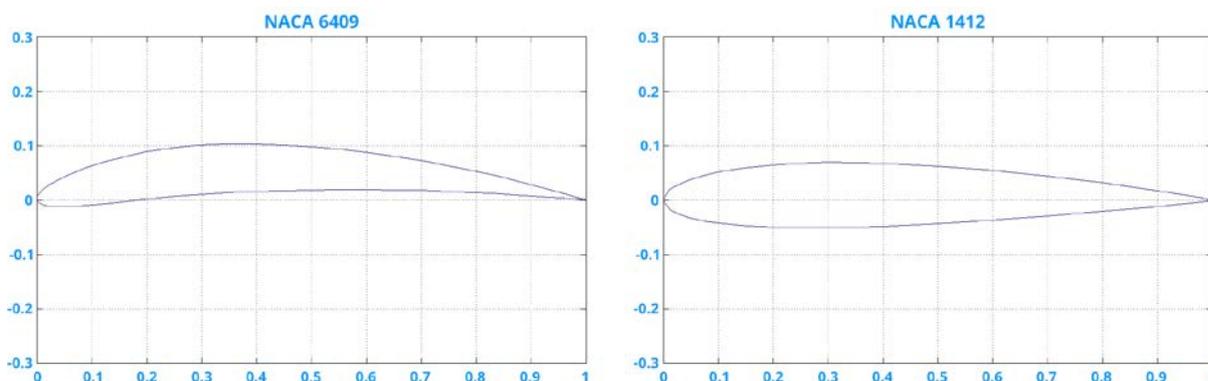
#### 4.2.2. Perfis aerodinâmicos de pás

Outro estudo de referência adotado por esta pesquisa são os propostos por Oliveira (2017) sobre design de pás para aerogeradores de eixo horizontal orientado à microenergia. Este trabalho analisou ângulos de passo e de perfis de pás para microturbinas eólicas submetidos a diferentes velocidades de vento, buscando conhecer e mensurar aspectos projetuais em design que influenciam a melhor eficiência de uma turbina eólica de pequena escala.

A contribuição deste trabalho para esta pesquisa foi na definição e configuração de quais perfis aerodinâmicos de pás que seriam utilizados na turbina eólica de pequena escala de testes a ser projetada para os experimentos com difusores aerodinâmicos. Os perfis adotados nesta pesquisa foram: NACA 6409 e NACA 1412. Estes perfis foram os que melhor resultados apresentaram nas RPM e no seu *start* rotacional.

A figura 23 mostra os perfis seccionais NACA seleccionados do estudo de Oliveira (2017).

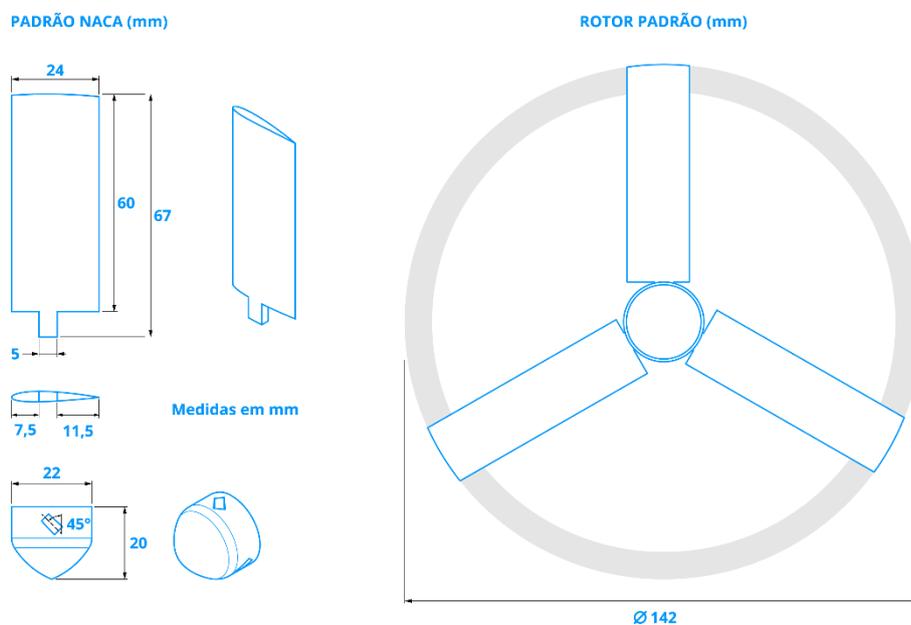
**Figura 23** - Perfis NACA 6409 e NACA 1412.



Fonte: Adaptado de UIUC (2016).

A figura 24 mostra as configurações técnicas de um perfil NACA e de um rotor padrão adotados como referência para esta pesquisa.

**Figura 24** - Configurações técnicas de um perfil NACA e de um rotor padrão.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2017).

#### 4.3. RESTRIÇÕES DE PROJETO

Para o projeto do difusores aerodinâmicos alguma restrições serão consideradas e são listadas descritas a seguir:

- 1) Desenvolver as geometrias dentro do conceito de difusor compacto-flangeado ou *Wind-Lens* proposto por Ohya *et al.* (2010), referência conceitual e tecnológica deste estudo;
- 2) Utilizar os perfis aerodinâmicos de pás propostos por Oliveira (2017) para desenvolver o rotor padrão a ser utilizado como referência construtiva para a turbina eólica de pequena escala para testes e para servir como medida de referência para cálculo da escala utilizada para projeção, prototipagem e testes dos difusores;
- 3) Considerar as dimensões da seção de testes do túnel de vento físico do LdSM/UFRGS onde serão realizados os testes aerodinâmicos, para desenvolvimento dos difusores e da turbina eólica de pequena escala.

#### 4.4. DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO

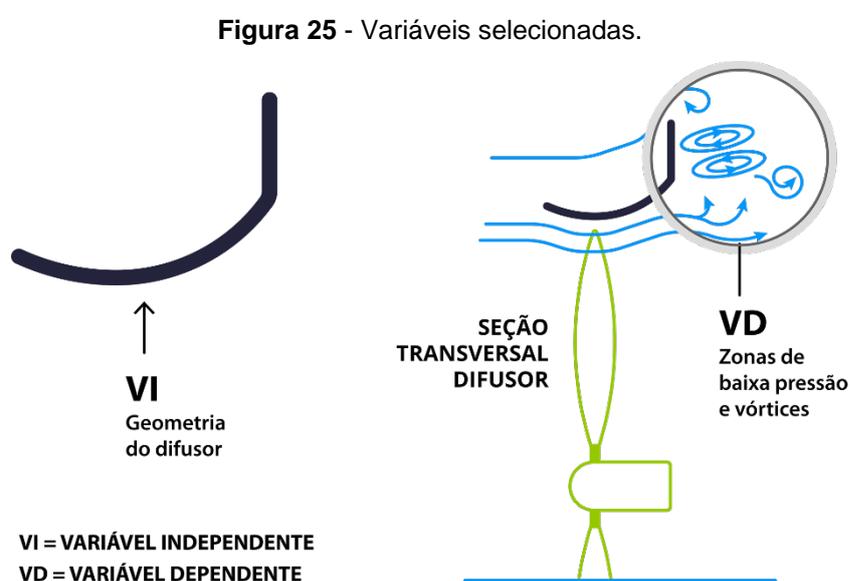
Como está pesquisa caracteriza-se como uma pesquisa experimental e já definido um objeto de estudo, devemos selecionar as variáveis que serão capazes de influenciar o objeto de estudos, como também as formas de controle e de observação que as variáveis produzem no objeto.

Variáveis são, segundo Prodanov e Freitas (2013), características observáveis do fenômeno a ser estudado e possuem correlação entre si. Sendo está, uma pesquisa quantitativa, as variáveis deste estudo são características que podem ser quantificadas estatisticamente. Uma pesquisa pode ter, pelo menos, duas variáveis: uma independente e uma dependente (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Para esta pesquisa definimos como variável independente a geometria do difusor (VI) e como variável dependente as zonas de baixa pressão produzidas por esta geometria no plano de saída do difusor. As variável VI será aquela diretamente manipulada, isso se dará através do design de diferentes geometrias.

A capacidade da geometria de reduzir a pressão no plano de saída do difusor é determinante para ocorrer o efeito aerodinâmico que resulta no aumento do escoamento de ar pela turbina eólica e a intensidade desse efeito depende da geometria do difusor (KOSASIH; TONDELLI, 2012). Portanto, as zonas de baixa pressão responsáveis pela aceleração do fluxo de passante pela turbina eólica são as variáveis dependentes (VD) desta pesquisa.

A figura 25 mostra um desenho esquemático com as variáveis selecionadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tratamento estatístico da variável independente (VI) será pela manipulação do design da geometria do difusor e simulação computacional CFD, já para a variável dependente (VD) o tratamento será feito de duas formas, por meio de simulações computacionais os dados serão quantificados visualmente e numericamente com as informações de pressão e tensão disponibilizadas pelo *software* CFD de túnel de vento virtual Flow Design. Nas simulações em túnel de vento físico os dados serão quantificados de forma indireta, por meio da análise das rotações por minuto (RPM) verificadas nos experimentos e da velocidade de vento necessária para o *start* rotacional.

Essa verificação indireta explica-se pela relação que um maior valor das RPM corresponde a uma maior velocidade do escoamento de ar pela turbina eólica, o que

corresponde a uma maior intensidade da zona de baixa pressão e do efeito aspirador na parte posterior do difusor, ocasionado maior escoamento de ar.

Essa maior aceleração do escoamento de ar implica diretamente na redução da velocidade de vento necessária para o *start* rotacional, pois a geometria do difusor multiplica a velocidade do escoamento de ar pelo rotor da turbina eólica até ser suficiente para superar a fricção com as engrenagens mecânicas e começar a rotacionar as pás. Esse aumento na velocidade de saída do ar no difusor está diretamente relacionado aos objetivos desta pesquisa.

#### 4.5. ESCALA DE PROJETO

Os difusores serão reproduzidos em escala reduzida em relação ao modelo utilizado no estudo de Takahashi *et al.* (2012). Cabe destacar que o modelo de estudo utilizado, serviu como referencial geométrico e conceitual, neste sentido, não será realizado nenhum estudo comparativo em razão das diferentes escalas.

A escala padrão foi calculada a partir de dois parâmetros de referência: (i) a dimensão D (dimensão do rotor) do modelo *Wind-Lens* de Takahashi *et al.* (2012) com (ii) a dimensão do rotor padrão proposto por Oliveira (2017). Esta escala calculada também levou em consideração as especificações técnicas da seção de testes do túnel de vento físico do LdSM-UFRGS.

O cálculo da escala é demonstrado na equação (3).

$$E = 1/x = D_t/D_o \quad (3)$$

Onde:

E = Escala;

x = Fator de ampliação ou redução da escala;

D<sub>t</sub> = Dimensão do rotor de (TAKAHASHI *et al.*, 2012) (2500 mm);

D<sub>o</sub> = Dimensão do rotor padrão (OLIVEIRA, 2017) (142 mm).

Assim o cálculo da escala fica solucionado a seguir:

$$E = 1:x = 2500/142 = 17,6056338028169 \text{ (17,6060)}$$

A escala foi definida para 1:17,6060.

#### 4.6. GEOMETRIA DE REFERÊNCIA *WIND-LENS*

O perfil geométrico do difusor *Wind-Lens* (OHYA *et al.* 2010) foi escolhido como modelo de referência. Esta geometria serviu como guia para as demais alternativas desenvolvidas. Este foi denominado difusor Modelo 1.

A geometria do difusor Modelo 1 foi projetada e escalonada a partir das dimensões do difusor *Wind-Lens* disponíveis no estudo de Takahashi *et al.* (2012) que seguiu as especificações do difusor *Wind-Lens* de Ohya *et al.* (2010).

A tabela 3 mostra as dimensões e os valores escalonados e arredondados considerados neste estudo.

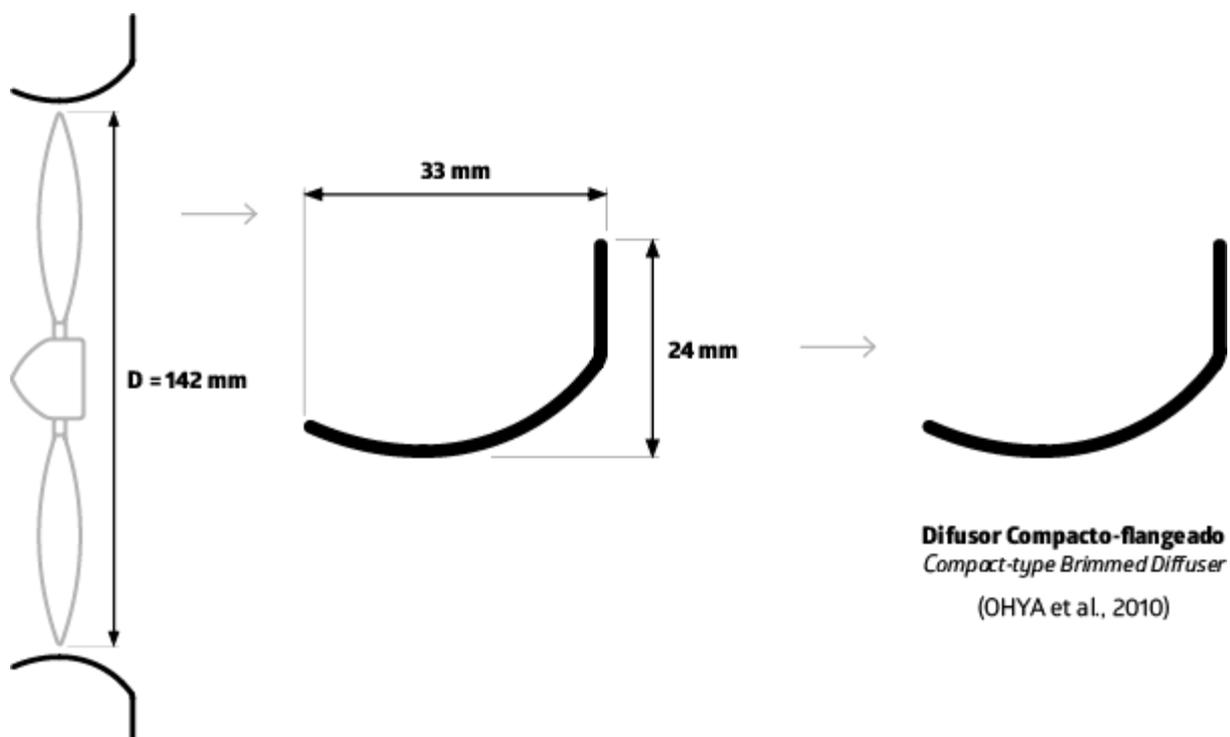
**Tabela 3** - Valores de configuração para um difusor *Wind-Lens* de referência.

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR ORIGINAL	VALOR EM ESCALA
Tipo de pá	-	NACA ou MEL	NACA 6409
Diâmetro interno do difusor	$D_t$	2560 mm	145,40 (146) mm
Diâmetro do rotor	$D$	2500 mm	142 mm
Diâmetro da nacele	$D_h$	360 mm	20,45 (22) mm
Comprimento do difusor	$L$	351 mm	19,94 (20) mm
Comprimento Total (concentrador + difusor)	$L_t$	576 mm	32,72 (33) mm
Altura do flange	$h$	256 mm	14,54 ( $\pm 13,5$ ) mm
Altura do difusor	$H$	426 mm	24,20 (24) mm
Afastamento da ponta	$s$	30 mm	1,70 (2) mm

Fonte: Adaptado de Takahashi *et al.* (2012).

A figura 26 mostra o perfil geométrico do Modelo 1 adotado como geometria de referência para este estudo.

Figura 26 - Perfil geométrico do difusor Modelo 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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 também modelado tridimensionalmente em *software* 3D para servir de referência na etapa de modelagem tridimensional 3D. O Apêndice A mostra o detalhamento completo da geometria de difusor de referência.

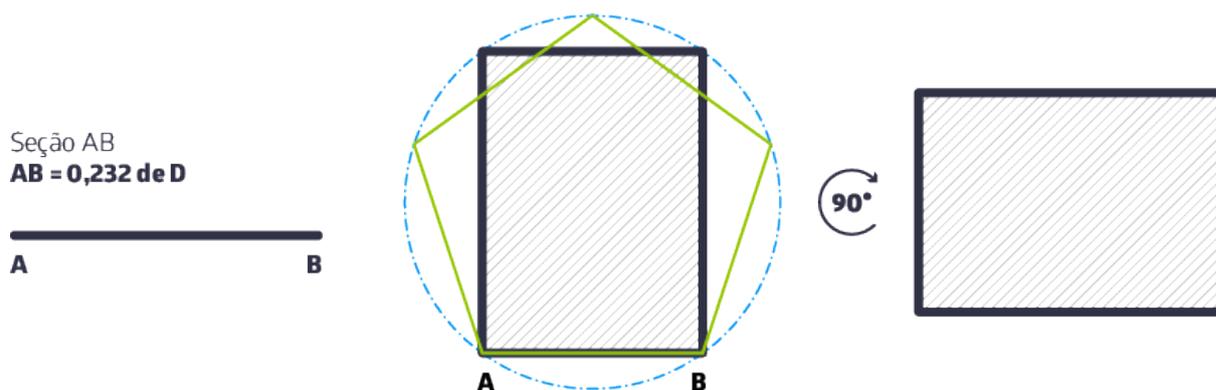
#### 4.7. ÁREA CONSTRUTIVA

Os difusores compacto-flangeados desenvolvidos por Ohya *et al.* (2010) não apresentam uma área construtiva padronizada o suficiente para garantir a sua reprodutibilidade e escalabilidade. Portanto, propôs-se uma padronização dessa área construtiva, baseada nos parâmetros e dimensões do difusor *Wind-Lens* encontradas nas pesquisas de Ohya *et al.* (2010) e Takahashi *et al.* (2012) e na escala de projeto definida para este estudo.

A área construtiva será definida a partir do retângulo harmônico Penton, que é um dos 12 Orthogons de Wersin (1956). Sua relação com as dimensões  $L$  (*length*) e  $H$

(*height*) da área construtiva é de 1,376. Estas dimensões estabelecidas são próximas as encontradas no difusor desenvolvido por Ohya *et al.* (2010). A figura 27 mostra um esquema simplificado de construção de um retângulo harmônico Penton, as especificações completas de construção podem ser encontradas no apêndice B.

**Figura 27** - Retângulo harmônico Penton.



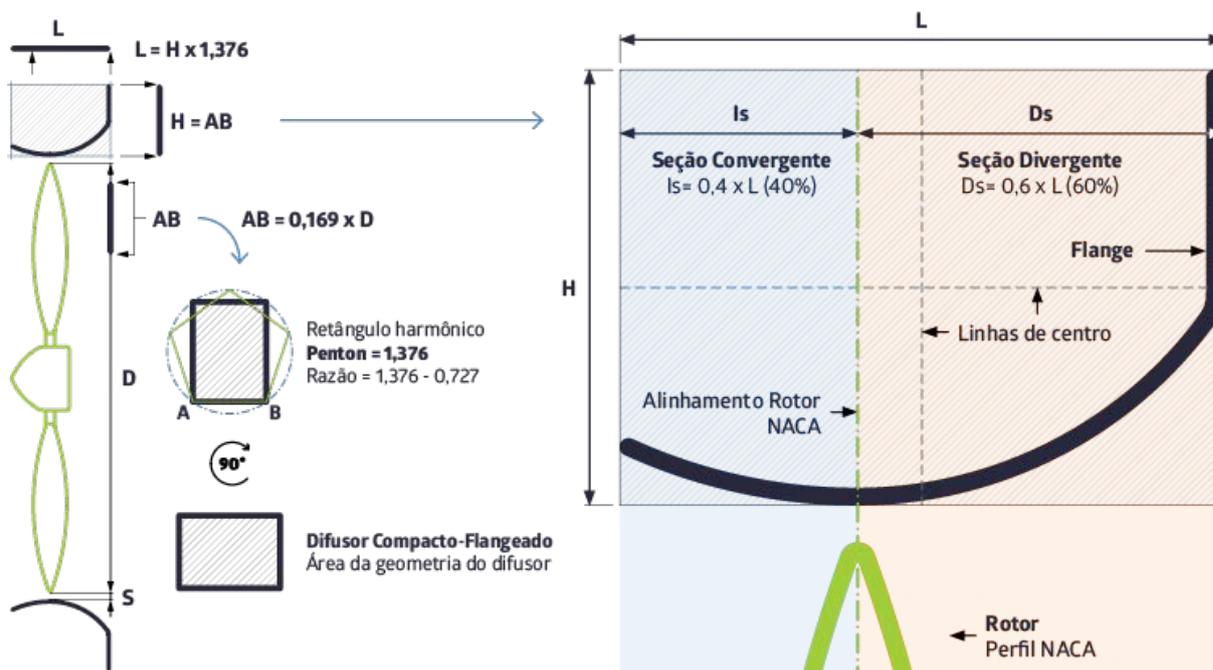
Fonte: Elaborado pelo autor.

A área de construção é dividida em duas partes, a parte de entrada e concentração do vento (seção convergente), representando 40% da largura total do difusor ( $L$ ) e a área de saída e difusão do vento (seção divergente), representando 60% de  $L$ . A altura do flange ( $H_b$ ) oscila em 10% do diâmetro do rotor ( $D$ ). O rotor e as pás ficam alinhados entre as áreas de entrada e saída da área do difusor.

O diâmetro do rotor ( $D$ ) é a medida inicial para a construção do difusor. Neste estudo utilizamos um diâmetro de rotor de 142 mm. Essa é a medida do rotor da turbina eólica de pequena escala utilizada nos experimentos em túnel de vento físico, então a partir desta medida se estabelece os parâmetros de configuração dos difusores.

A figura 28 mostra um esquema resumido da configuração área construtiva padrão para o design da geometria dos difusores. O detalhamento completo da área construtiva padronizada encontram-se no apêndice C.

**Figura 28** - Parâmetros de configuração da área de construção da geometria.



Fonte: Elaborado pelo autor.

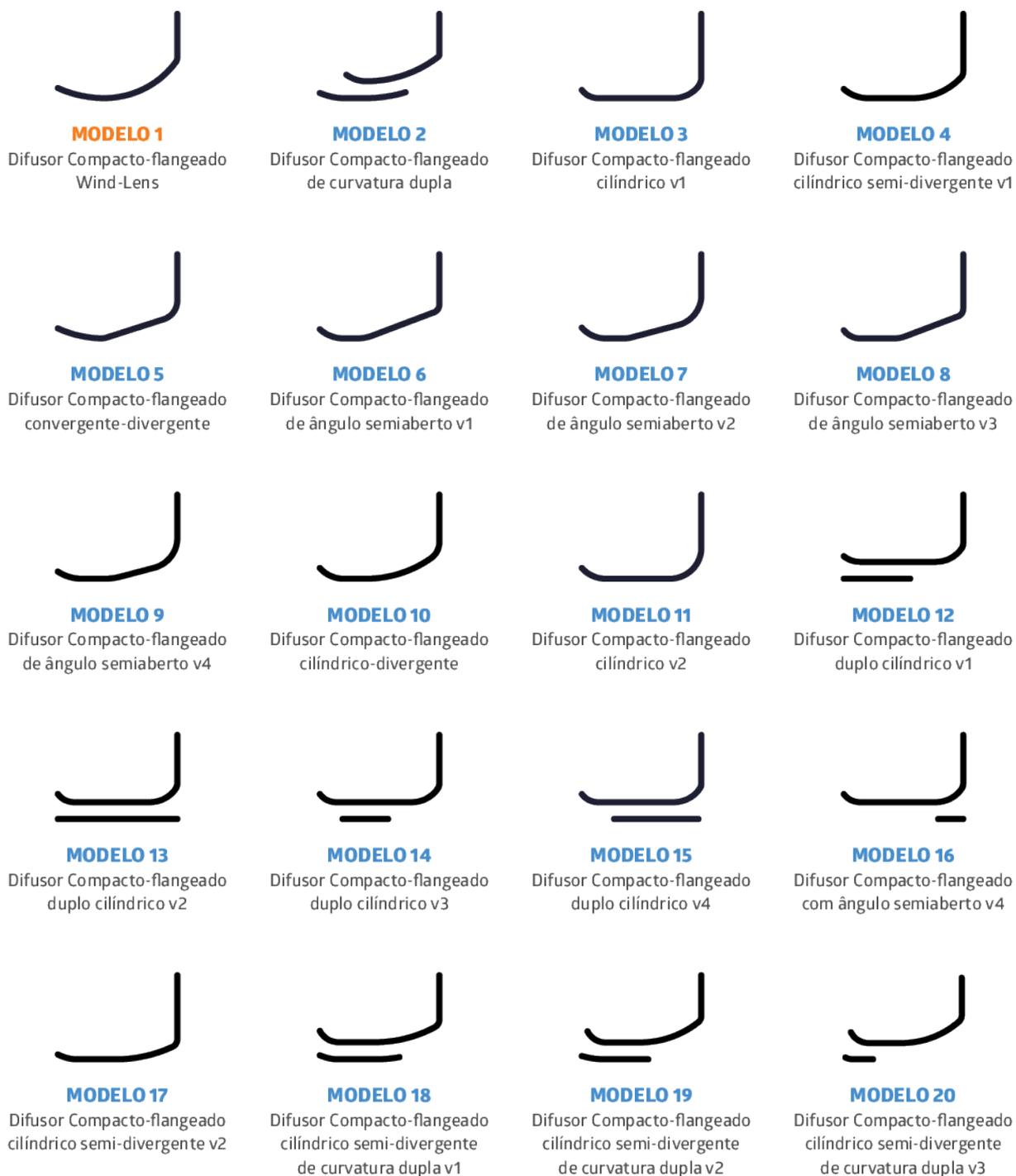
Nos difusores *Wind-Lens* desenvolvidos por Ohya *et al.* (2010), a altura do flange corresponde a 10% do diâmetro do rotor ( $D$ ), nos difusores desenvolvidos para esta pesquisa a altura do flange é variável, pois é diretamente influenciada pela geometria das seções convergente de entrada e divergente de saída.

#### 4.8. GEOMETRIZAÇÃO

Definida a área construtiva padronizada, procedeu-se à geometrização das alternativas. Foram geometrizadas 19 alternativas. A figura 29 apresenta as geometrias consideradas para este estudo.

O apêndice D apresenta, em maiores detalhes, a geometrização do Modelo 1 *Wind-Lens* de Ohya *et al.* (2010) e das 19 alternativas desenvolvidas para este estudo.

**Figura 29** - Geometrias de difusores desenvolvidas para esta pesquisa.

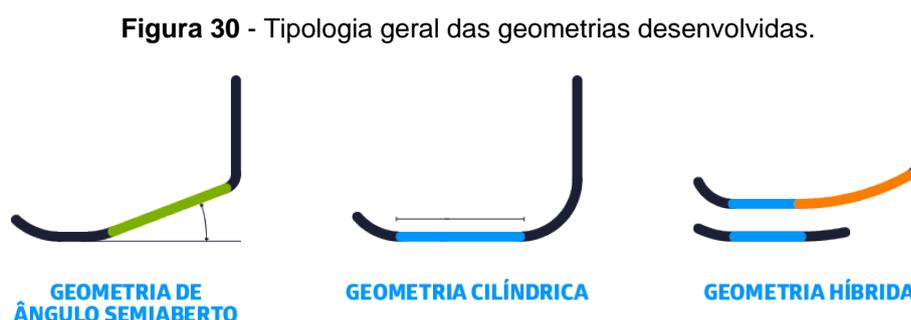


Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram desenvolvidas três tipologias formais de geometrias:

- 1) Geometria de Ângulo Semiaberto: Estas geometrias caracterizam-se por ter em sua forma um grande ângulo semiaberto<sup>23</sup> de difusão. Encontrada nos Modelos 5, 6, 7, 8 e 9;
- 2) Geometria Cilíndrica: Estas geometrias caracterizam-se por possuir uma grande seção cilíndrica em sua forma básica. Encontrada nos modelos 3, 4, 11, 12, 13, 14, 15 e 16;
- 3) Geometria Híbrida: Estas geometrias caracterizam-se por não possuir um elemento predominante que caracterize sua geometria, como uma seção cilíndrica ou ângulo semiaberto. Encontrada no modelos 2, 10, 17 e 18.

A figura 30 apresenta a tipologia geral das geometrias desenvolvidas, mostrando os elementos predominantes de cada tipo estabelecido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Definidas as geometrias segue-se para a próxima etapa, que é a modelagem tridimensional, necessária para a preparação dos difusores para a primeira etapa de avaliação, a simulação computacional em túnel de vento virtual.

#### 4.9. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL 3D

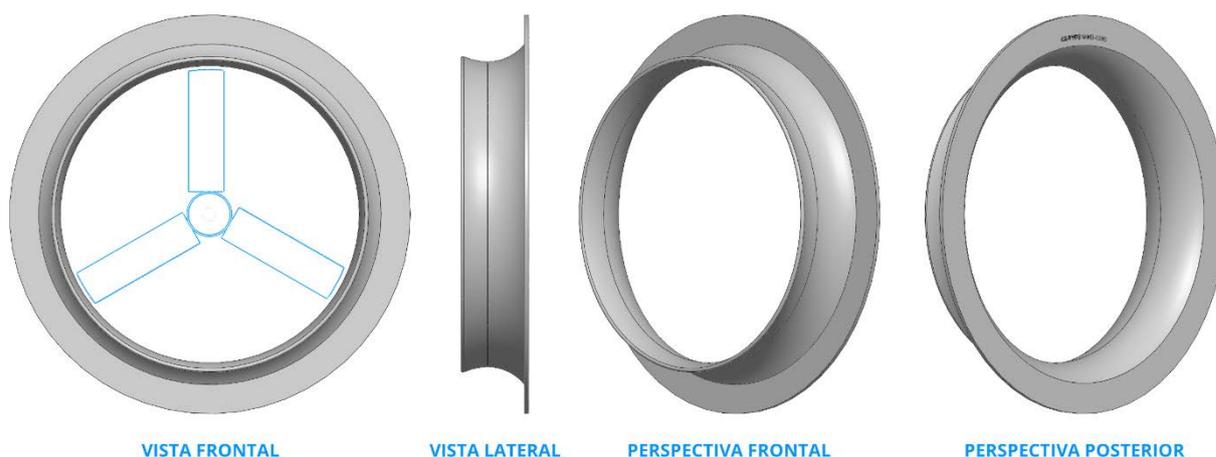
Para a modelagem tridimensional (3D) dos difusores geometrizados foi usado o software comercial CAD (*computer-aided design*) *SolidWorks*. Todos os difusores foram modelados usando o software *SolidWorks* versão 2016. A modelagem 3D dos perfis de difusores selecionados foi necessária para a posterior simulação no túnel de

<sup>23</sup> Esta nomenclatura é muito utilizada nos trabalhos de Ohya *et al.* (2010) para descrever o ângulo de abertura no plano de saída do difusor. Este ângulo varia entre 5° a 24° graus em média.

vento virtual e a prototipagem em impressora 3D para os ensaios em túnel de vento físico.

A figura 31 mostra o resultado da modelagem tridimensional realizada em uma geometria de difusor.

**Figura 31** - Modelagem tridimensional de uma geometria de difusor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os difusores foram modelados com espessura de 1,5 mm e foram exportados para o formato de arquivos STL (*Standard Triangle Language*). Este formato de arquivo é suportado por muitos outros pacotes de *software*, sendo amplamente utilizado para prototipagem rápida, impressão em 3D e manufatura auxiliada por computador (CAM).

O formato STL descreve apenas a geometria da superfície de um objeto tridimensional sem qualquer representação de cor, textura ou outros atributos comuns de outros formatos CAD. É o formato padrão de entrada do *software* de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design para as simulações por CFD.

#### 4.10. SIMULAÇÕES EM TÚNEL DE VENTO VIRTUAL

As simulações em túnel de vento virtual são a primeira etapa de avaliação das variáveis estabelecidas. O objetivo das simulações é analisar as diferentes zonas de

baixa pressão produzidas pela geometria do difusor, como também verificar a intensidade dos vórtices produzidos no seu plano de saída.

Nos difusores desenvolvidos foram realizadas apenas simulações bidimensionais por pressão, o que permitiu visualizar as zonas de alta e baixa pressão, como também, a intensidade da baixa pressão ocasionada pelos vórtices no plano de saída do difusor. A intensidade dos vórtices está ligado a capacidade do difusor multiplicar o escoamento de ar passante pela turbina eólica, acelerando o vento.

As configurações das simulações realizadas pelo túnel de vento virtual são as seguintes:

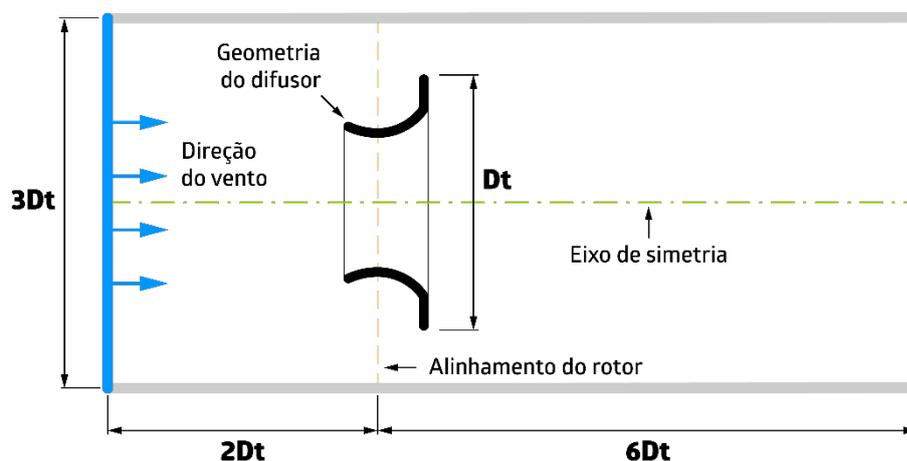
- a) **Design:** Os modelos de difusores foram modelados em software paramétrico 3D, considerando as dimensões da turbina eólica de pequena escala onde seriam acoplados para os testes em túnel de vento físico;
- b) **Resolução da malha:** Foram executadas simulações para obter dados de Pressão (Pa) com configuração de tamanho de malha (resolução) máxima disponibilizada pelo software (400);
- c) **Velocidade do vento:** A velocidade foi definida em 4 m/s (14,4 km/h);
- d) **Dimensões da seção de testes:** O túnel de vento virtual tem comprimento 8 vezes o diâmetro externo do difusor ( $D_t$ ). Os comprimentos de entrada e de saída do difusor tem 2 e 6 vezes o diâmetro  $D_t$ , respectivamente;
- e) **Dados para análise:** Uma captura de tela (*screenshot*<sup>24</sup>) da simulação foi realizada após cinco minutos do início da simulação de cada difusor.

A figura 32 mostra um esquema visual da configuração da seção de testes do túnel de vento virtual.

---

<sup>24</sup> Consiste na ação de registrar, através de uma “fotografia instantânea”, uma imagem presente na tela de um computador, celular ou outro dispositivo eletrônico.

**Figura 32** - Esquema visual da configuração 2D do túnel de vento virtual.



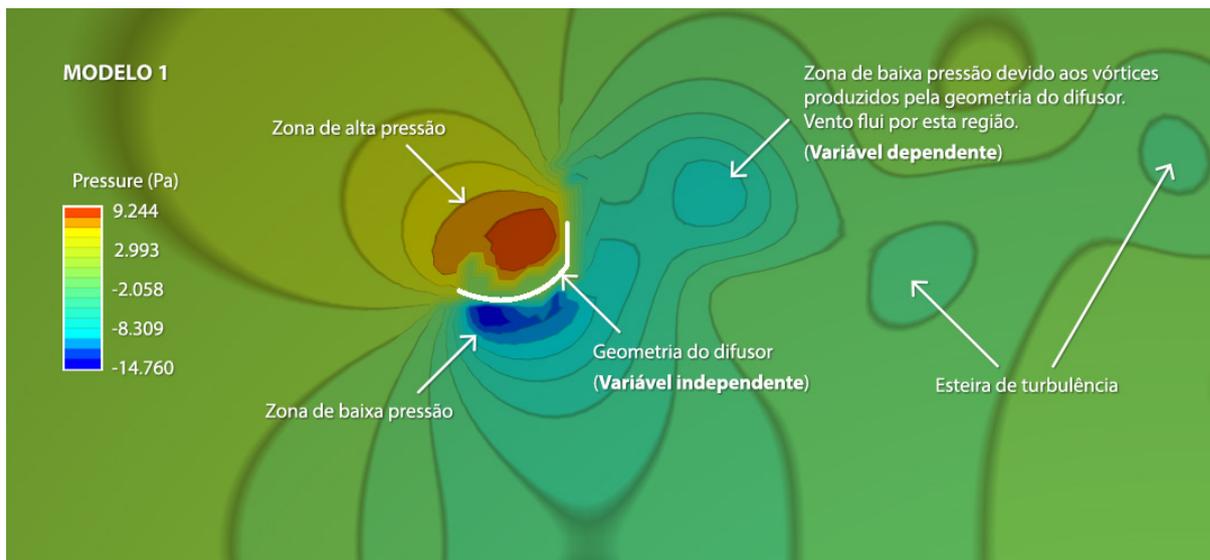
Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação na geometria do Modelo 1, baseado no difusor *Wind-Lens* de Ohya *et al.* (2010) forneceu dados para comparar com as outras geometrias simuladas. Como o eixo da geometria do difusor é simétrica, a simulação restringiu-se aos planos bidimensionais de Pressão para mostrar a distribuição da pressão ao longo do fluxo. Isso foi útil para entender onde o vento invade o modelo (alta pressão) e onde ele acelera (baixa pressão). Essas informações permitiram fazer uma triagem de quais geometrias atendiam os critérios de seleção para as etapas seguintes.

Os critérios para a seleção das geometrias de difusores desenvolvidas era apresentar, na simulação bidimensional de pressão, um resultado similar ou superior ao difusor de referência Modelo 1 *Wind-Lens*, aceitando uma tolerância de 2% nos valores numéricos relativos a pressão apresentados pelo Flow Design.

A figura 33 mostra a simulação bidimensional (2D) no plano de pressão realizada no túnel de vento virtual no difusor de referência (Modelo 1) e os principais elementos considerados na simulação.

**Figura 33** - Simulação 2D no plano de pressão no difusor Modelo 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação no Modelo 1 apresentou no plano de saída do difusor uma zona de vórtices de baixa pressão com intensidade de  $-8,309$  Pa, não alcançando o pico máximo de baixa pressão mostrado na escala cromática da legenda.

No plano de entrada do difusor na parte interna, apresenta uma zona de baixa pressão proeminente, atingindo o pico máximo de baixa pressão, essa zona de baixa pressão no plano de entrada tem relação indireta com as zonas de vórtices no plano de saída, pois ela acelera inicialmente o escoamento de ar que é posteriormente multiplicado pela baixa pressão da zona de vórtices. No plano de entrada do difusor na parte externa há uma zona de alta pressão, ela é ocasionada principalmente pelo flange (aba) na saída do difusor. O flange é responsável pela grande separação do fluxo que produz os vórtices de baixa pressão.

Estabelecido os parâmetros de análise no Modelo 1, simulou-se as 19 alternativas de geometrias estabelecidas na Ideação, sendo que 6 alcançaram resultado superior ou igual ao modelo de referência e 10 alternativas tiveram resultados abaixo do modelo de referência e foram descartadas. Os difusores Modelo 3, 15 e 16 tiveram resultados inferiores ao modelo de referência, mas foram selecionados pois apresentaram anomalias na zona de vórtices de baixa pressão que serão melhor descritas na apresentação dos resultados. A figura 34 mostra um gráfico com os resultados das 19 alternativas testadas e apresenta os resultados de pressão.

**Figura 34** - Gráfico de resultados das simulações nas alternativas geradas.



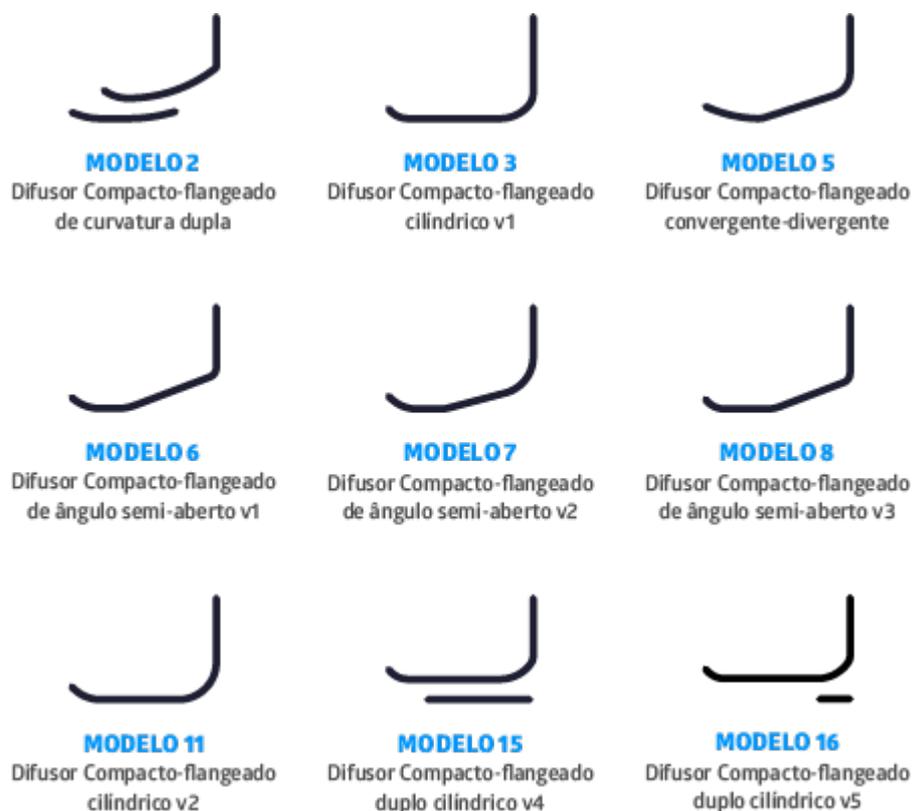
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram selecionados os seguintes modelos de difusor:

- 1) **Modelo 2:** difusor compacto-flangeado de curvatura dupla;
- 2) **Modelo 3:** difusor compacto-flangeado cilíndrico;
- 3) **Modelo 5:** difusor compacto flangeado convergente-divergente;
- 4) **Modelo 6:** difusor compacto-flangeado de ângulo semiaberto variante 1;
- 5) **Modelo 7:** difusor compacto-flangeado de ângulo semiaberto variante 2;
- 6) **Modelo 8:** difusor compacto-flangeado de ângulo semiaberto variante 3;
- 7) **Modelo 11:** difusor compacto-flangeado cilíndrico variante 2;
- 8) **Modelo 15:** difusor compacto-flangeado duplo cilíndrico variante 4 e
- 9) **Modelo 16:** difusor compacto-flangeado duplo cilíndrico variante 5.

A figura 35 mostra as geometrias selecionadas após a etapa de simulação no túnel de vento virtual.

**Figura 35** - Geometrias selecionadas.

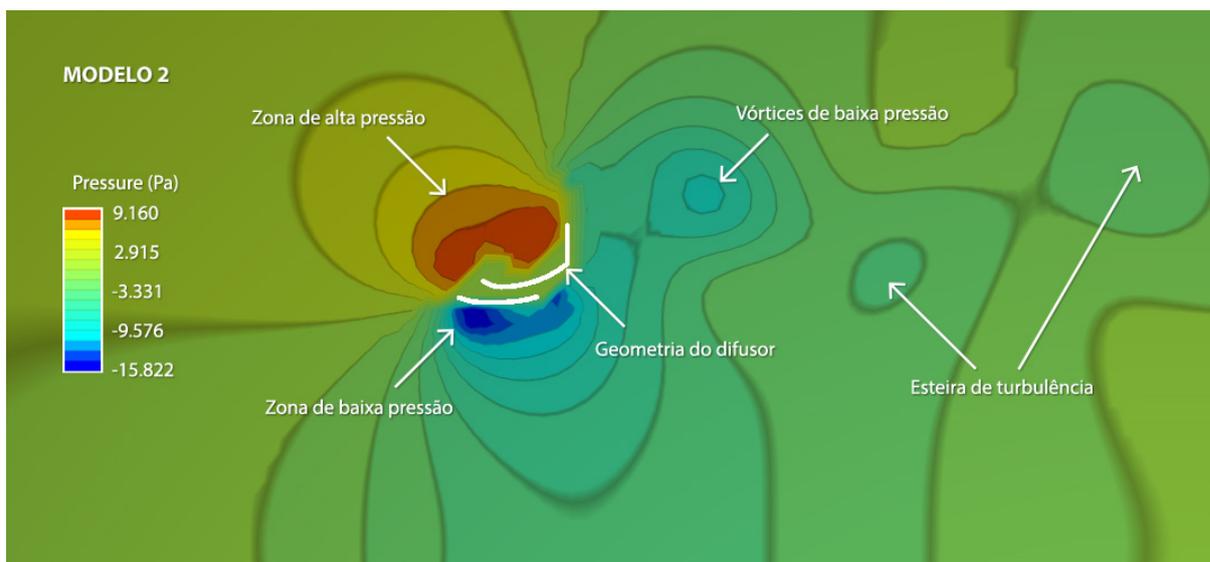


Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir apresentam-se os resultados e análises das simulações em túnel de vento virtual. Os resultados mostrados a seguir foram comparados com os resultados apresentados pela simulação na geometria de difusor Modelo 1.

#### 4.10.1. Resultados e análises das simulações

As figuras 36 a 44 são os resultados de pressão apresentados pelo *software* de simulação de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design com as 9 geometrias selecionadas. A simulação do Modelo1 (figura 36) servirá como referência para comparações, como já apresentado e descrito anteriormente.

**Figura 36** - Simulação de pressão no difusor Modelo 2.

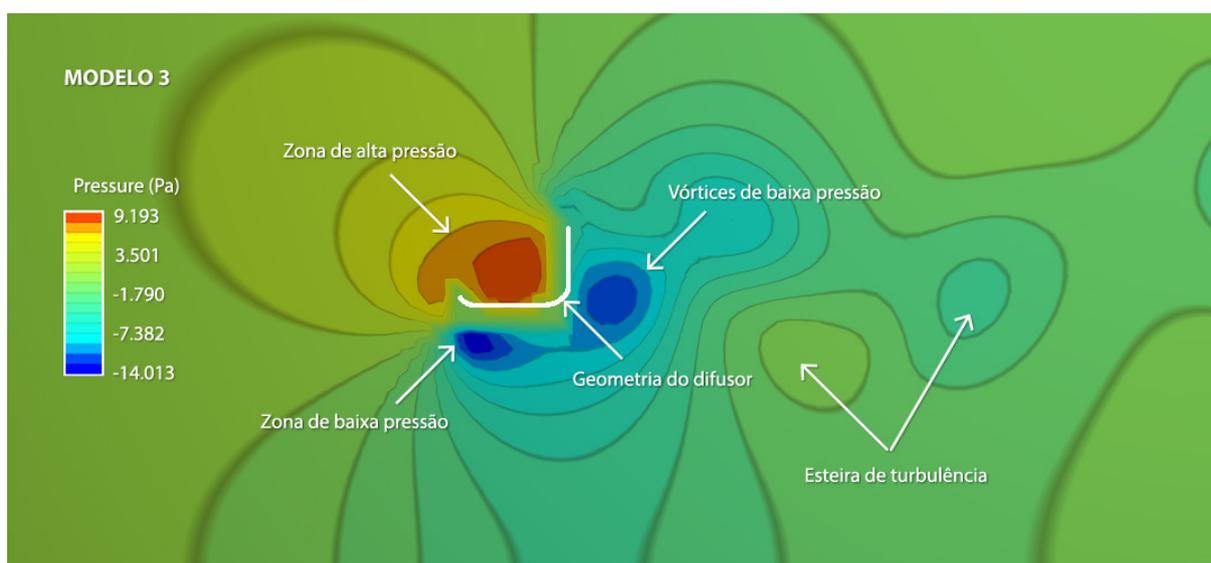
Fonte: Elaborado pelo autor.

O Modelo 2 (figura 36) é uma geometria de difusor com curvatura dupla. Essa geometria apresentou na simulação comportamento similar ao Modelo 1.

A área de alta pressão teve um ligeiro prolongamento na parte frontal do difusor, isso deve-se a maior área de contato entre o vento e a estrutura do difusor, causada pela curvatura dupla da geometria.

Comparando as escalas cromáticas e os seus respectivos valores, mostram que a zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor é visualmente similar àquela encontrada no Modelo 1, porém com uma pressão negativa 7,19% maior no valor máximo de baixa pressão. No mesmo sentido comparativo, a região de vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor teve uma intensidade 15,25% maior em relação ao Modelo 1.

**Figura 37** - Simulação de pressão no difusor Modelo 3.



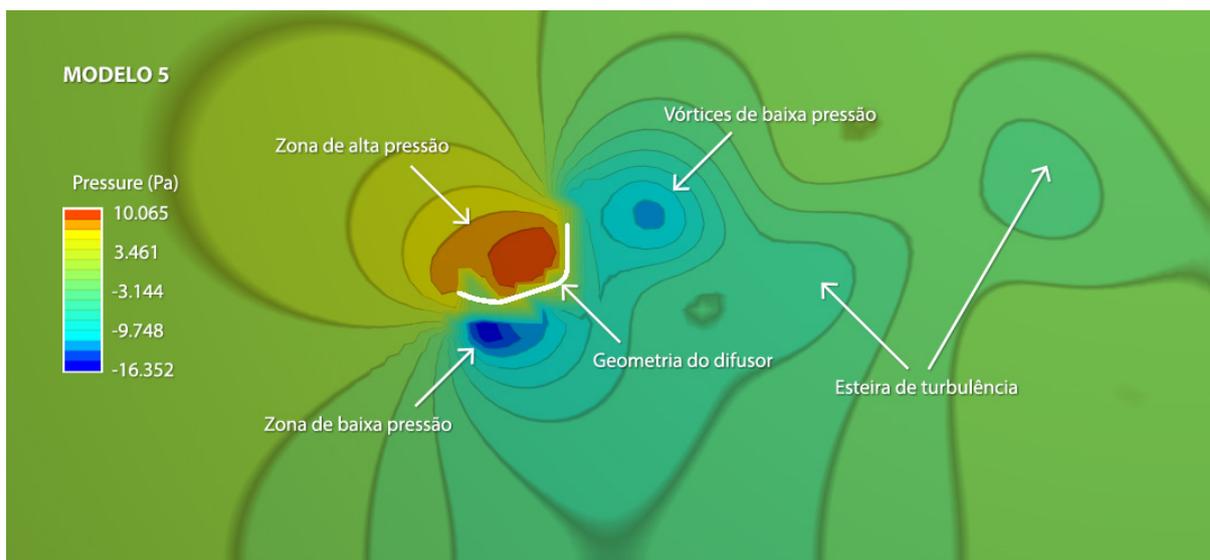
Fonte: Elaborado pelo autor.

A geometria de difusor Modelo 3 (figura 37) é composta de uma grande seção cilíndrica com uma pequena curvatura de entrada e um grande flange no plano de saída do difusor.

Comparando as escalas cromáticas e os seus respectivos valores numéricos, mostram que essa geometria apresentou na simulação, nos valores numéricos de baixa pressão, resultados inferiores aos estipulados para a seleção de geometrias para a etapa seguinte da pesquisa. Entretanto, analisando mais qualitativamente os dados visuais e numéricos da simulação, presencia-se um comportamento diferenciado nas zonas de baixa pressão. Nos vórtices no plano de saída apresentou uma zona de baixa pressão consideravelmente forte em relação ao Modelo 1, alcançando quase o valor máximo da escala.

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, leva a compreender que esse comportamento diferenciado classifica a geometria como uma exceção dentre os critérios estipulados para a seleção das geometrias, sendo selecionada para a etapa seguinte onde nos ensaios em túnel de vento físico serão analisados o comportamento dinâmico dessa geometria acoplada numa turbina eólica.

**Figura 38** - Simulação de pressão no difusor Modelo 5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

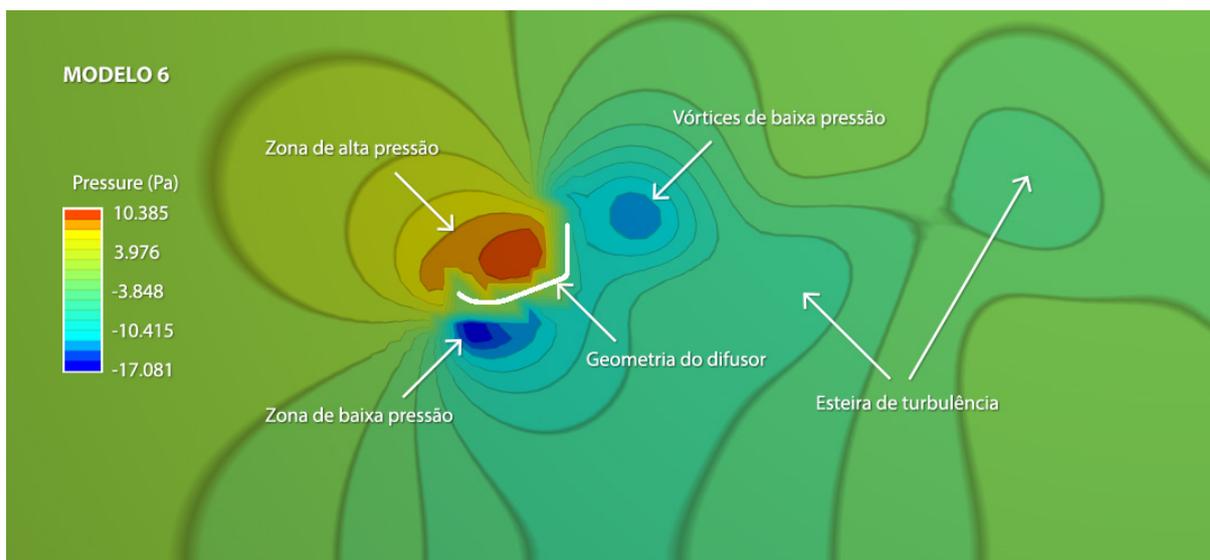
O modelo 5 (figura 38) é uma geometria com seções de entra e de saída conectadas por uma pequena curvatura o que faz a transição entre seções ocorrer de forma brusca.

A simulação realizada nesta geometria apresentou na zona de alta pressão, visualmente, resultados similares aos encontrados no Modelo 1, porém os valores numéricos encontrados na escala e comparados com as escalas cromáticas apresentadas pela simulação mostram um ligeiro aumento no valor máximo da alta pressão, ficando 8,88% maior.

Comparando as escalas cromáticas e os seus respectivos valores numéricos, mostram que a geometria causou uma redução de 10,79% no valor máximo da baixa pressão. Visualmente a zona de baixa pressão é similar àquela encontrada na simulação realizada no Modelo 1.

Nos vórtices no plano de saída do difusor houve um significativo aumento de intensidade, ficando a zona de baixa pressão 37,19% mais intensa do que aquela encontrada no Modelo 1.

**Figura 39** - Simulação de pressão no difusor Modelo 6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

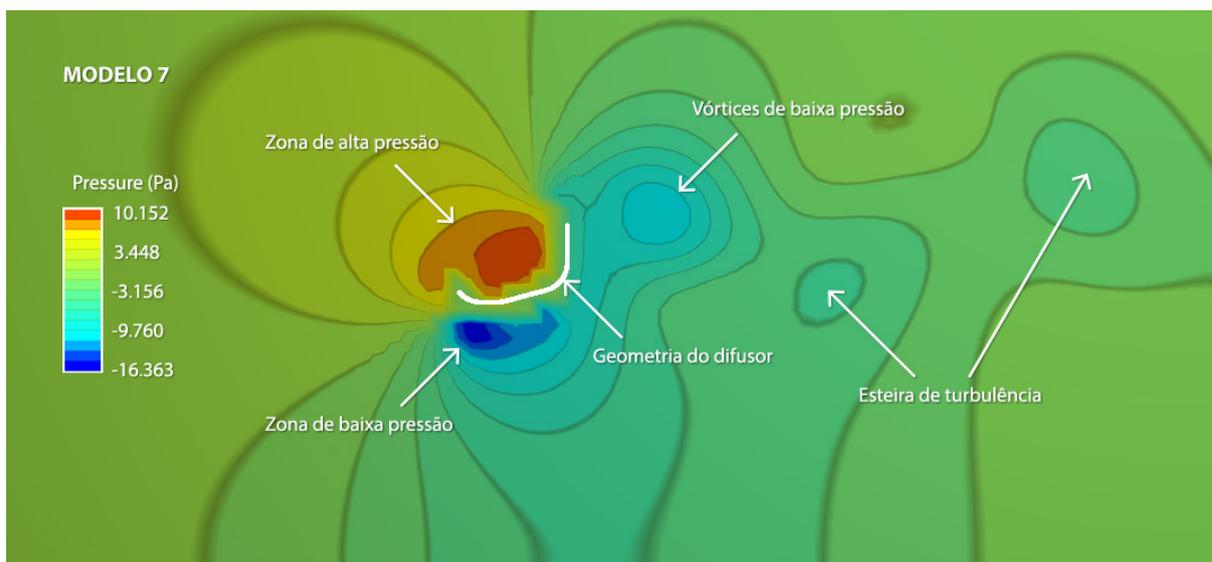
A geometria Modelo 6 (figura 39) é similar ao Modelo 5 na seção divergente (plano de saída) da geometria, diferencia-se por possuir na seção convergente (plano de entrada) da geometria, possuindo uma pequena curvatura de entrada, seguida de uma curta seção cilíndrica.

A simulação no Modelo 6 apresentou de modo geral um comportamento similar ao Modelo 5, difere-se por apresentar na zona de alta pressão uma intensidade levemente maior, ficando 3,18% maior. Em relação ao Modelo 1 a zona de alta pressão ficou 12,34% maior. Visualmente ela é similar o Modelo 1.

A zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor e visualmente similar ao encontrado no Modelo 1, mas sua intensidade é 15,72% maior em relação ao valor máximo da baixa pressão.

Na zona de vórtices no plano de saída do difusor, apresentou uma zona de baixa pressão com intensidade 45,40% maior em relação ao Modelo 1.

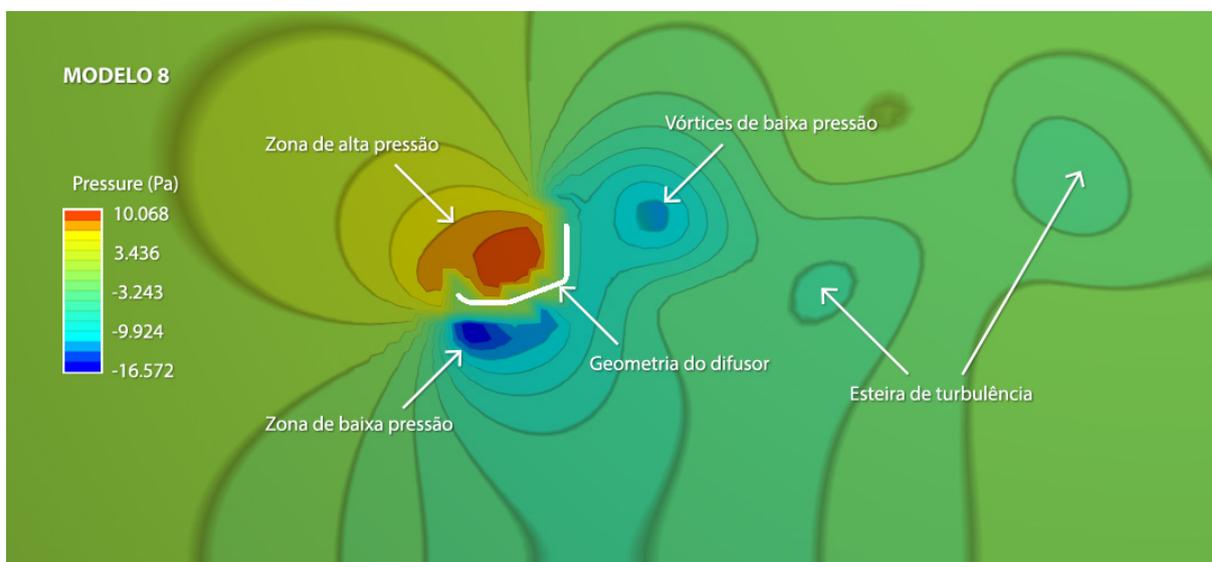
**Figura 40** - Simulação de pressão no difusor Modelo 7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A geometria de difusor Modelo 7 (figura 40) é similar ao Modelo 6, difere-se por possuir uma curvatura no plano de saída maior que a encontrada no Modelo 6. A simulação realizada no Modelo 7 apresentou, visualmente, resultados similares o Modelo 6, com zonas de alta e baixa pressão praticamente iguais, apenas com diferenças nos valores numéricos. Em relação ao Modelo 1, a zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor foi 10,86% mais intensa. Na zona de vórtices apresentou intensidade 17,46% maior que aquela ( -8309 Pa) encontra no Modelo 1.

**Figura 41** - Simulação de pressão no difusor Modelo 8.

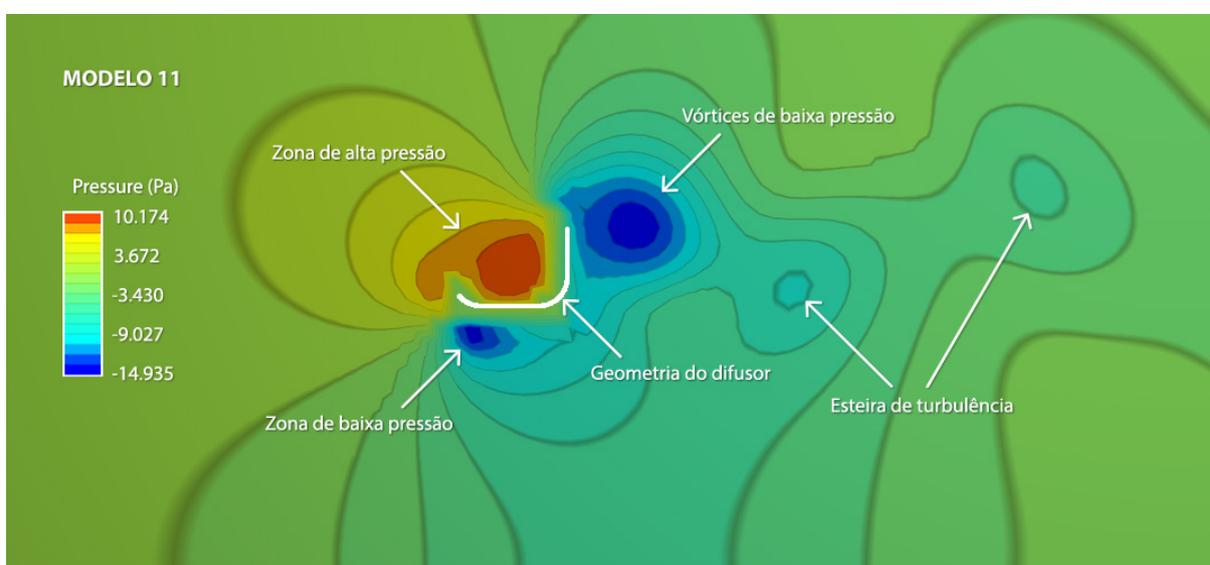


Fonte: Elaborado pelo autor.

A geometria de difusor Modelo 8 (figura 41), também é similar aos Modelos 6 e 7, difere-se por possuir, em relação ao Modelo 6, uma seção cilíndrica um pouco maior, e em relação ao Modelo 7, uma curvatura de saída menor, similar ao Modelo 6.

A simulação na geometria Modelo 8 apresentou nas simulações, visualmente, resultados muito similares ao Modelo 6, tanto nas zonas de alta e baixa pressão, como também, nos vórtices no plano de saída do difusor.

**Figura 42** - Simulação de pressão no difusor Modelo 11.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A geometria de difusor Modelo 11 (figura 42) é similar ao Modelo 3, difere-se por possuir diferentes raios de curvatura no plano de entrada e saída do difusor.

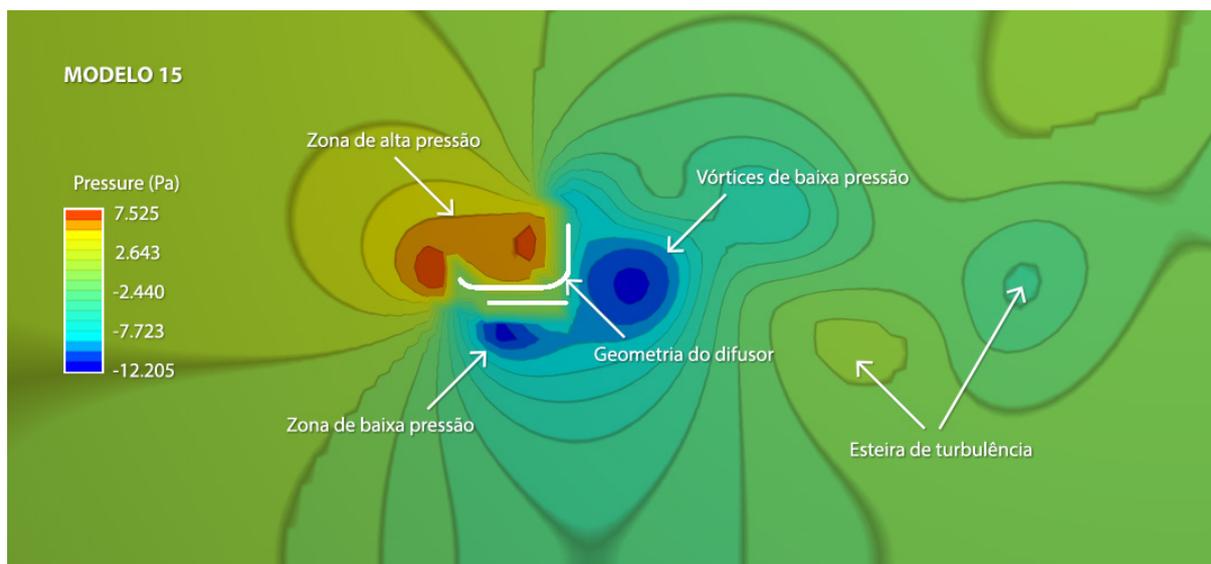
A simulação realizada no Modelo 11 apresentou, visualmente, resultados similares ao Modelo 3, porém observou-se na zona vórtices de baixa pressão uma área de baixa pressão bem mais intensa daquela encontrada no Modelo 3. Essa mudança deve-se a mudança no raio das curvaturas de entrada e saída do difusor.

Comparando as escalas cromáticas e os seus respectivos valores numéricos, mostraram que a zona de alta pressão foi 10,67% maior em relação ao Modelo 3. Da mesma forma mostram, que no plano de entrada a zona de baixa pressão a

intensidade foi 6,58% maior. Em comparação com o Modelo 1, a intensidade da zona de alta pressão foi 10,05% maior e a zona baixa pressão foi 1,19% maior.

Na zona de vórtices no plano de saída do difusor, comparando com o Modelo 1, a intensidade da zona de baixa pressão foi 79,74% maior, sendo maior sua área visual mostrada pela simulação.

**Figura 43** - Simulação de pressão no difusor Modelo 15.



Fonte: Elaborado pelo autor.

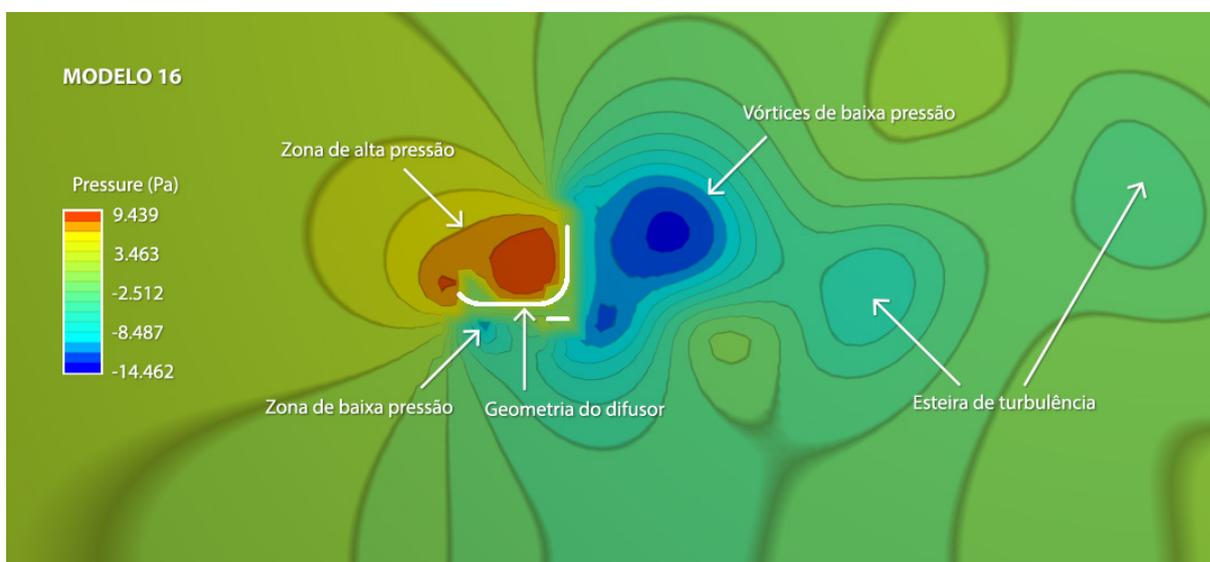
A geometria do Modelo 15 (figura 43) é dupla, externamente é similar a geometria do Modelo 3 e Modelo 11, internamente é composta por uma seção cilíndrica que se localiza na zona divergente (plano de saída) do difusor.

A zona de alta pressão localizada no plano de entrada do difusor, possui duas áreas onde a pressão atinge sua intensidade máxima. Esse comportamento acontece devido ao flange no plano de saída do difusor e na parte frontal pela estrutura dupla do difusor, comportamento já visualizado nas simulações com o Modelo 2. Sua pressão máxima ficou 18,60% menor em relação ao Modelo 1.

A zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor apresentou intensidade bem menor do que aquela visualizada no Modelo 1. A intensidade dessa zona de baixa pressão foi 17,31% mais fraca do que a encontrada no Modelo 1.

Na zona de vórtices no plano de saída do difusor, observou-se uma grande zona de baixa pressão, similar àquela encontrada no Modelo 11. A intensidade dessa zona de baixa pressão foi 46,89% mais intensa do que aquela observada no Modelo 1, se comparada com as escalas cromáticas e os seus respectivos valores numéricos. Esta geometria, assim como o Modelo 3, foi classificada como uma exceção dentre os critérios estipulados para a seleção das geometrias, sendo selecionada para a etapa seguinte.

**Figura 44** - Simulação de pressão no difusor Modelo 16.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A geometria do Modelo 16 (figura 44) é similar ao Modelo 15, difere-se por possuir uma seção cilíndrica interna curta, posicionada junto ao plano de saída do difusor. A simulação realizada no Modelo 16 apresentou, na zona de alta pressão resultados, comportamento similar ao encontrado no Modelo 1, ficando a diferença de intensidade em 2,11% a favor do Modelo 16.

A zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor foi drasticamente reduzida, se comparada ao Modelo 1. Essa redução pode ter sido influenciada pela seção cilíndrica interna do difusor. Em relação ao vórtices no plano de saída do difusor, foi observado uma ampla e predominante área de baixa pressão. A anomalia pode ter sido causada pela estrutura cilíndrica interna, que ocasionou uma separação do escoamento de ar. Comparando as escalas cromáticas e os seus respectivos valores numéricos, mostram que essa zona de baixa pressão foi 74,05% mais intensa

do que aquela observada no Modelo 1. Esta geometria, assim como o Modelo 3 e o Modelo 15, foi classificada como uma exceção dentre os critérios estipulados para a seleção das geometrias, sendo selecionada para a etapa seguinte.

A tabela 4 apresenta os comparativos de pressão dos difusores simulados em relação ao Modelo 1. Foram divididos em seis colunas com os valores de pressão apresentados pela simulação. As duas primeiras colunas referem-se aos valores relativos a alta pressão, que na simulação eram às áreas coloridas em vermelho, laranja e amarelo. A terceira coluna corresponde a pressão regular (média geral) apresentada pelas simulações, corresponde às tonalidades entre o verde-amarelo ao verde-azul. As duas últimas colunas representam as áreas de baixa pressão, correspondem as tonalidades entre o verde-azul ao azul-escuro.

**Tabela 4** - Comparativos de pressão em Pascal (Pa).

<b>DIFUSOR</b>	<b>Alta pressão máxima</b>	<b>Alta pressão média</b>	<b>Pressão regular</b>	<b>Baixa pressão média</b>	<b>Baixa pressão máxima</b>
<b>Modelo 1</b>	<b>9,244 Pa</b>	<b>2,993 Pa</b>	<b>-2,058 Pa</b>	<b>-8,309 Pa</b>	<b>-14,670 Pa</b>
<b>Modelo 2</b>	9,160	2,915	-3,331	-9,576	-15,822
<b>Modelo 3</b>	9,193	3,501	-1,790	-7,382	-14,013
<b>Modelo 5</b>	10,065	3,461	-3,144	-9,748	-16,352
<b>Modelo 6</b>	10,385	3,976	-3,848	-10,415	-17,081
<b>Modelo 7</b>	10,152	3,448	-3,156	-9,760	-16,363
<b>Modelo 8</b>	10,068	3,436	-3,243	-9,924	-16,572
<b>Modelo 11</b>	10,174	3,672	-3,430	-9,027	-14,935
<b>Modelo 15</b>	7,525	2,643	-2,440	-7,723	-12,205
<b>Modelo 16</b>	9,439	3,463	-2,512	-8,487	-14,462

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 5, da maneira como os dados foram compilados na tabela anterior, apresenta a variação percentual de pressão dos difusores simulados em relação ao Modelo 1.

**Tabela 5** - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 1.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
<b>Modelo 1</b>	<b>9,244 Pa</b>	<b>2,993 Pa</b>	<b>-2,058 Pa</b>	<b>-8,309 Pa</b>	<b>-14,670 Pa</b>
<b>Modelo 2</b>	-0,91%	-2,61%	61,86%	15,25%	7,85%
<b>Modelo 3</b>	-0,54%	16,97%	-13,02%	-11,16%	-4,47%
<b>Modelo 5</b>	8,88%	15,64%	52,76%	17,32%	11,46%
<b>Modelo 6</b>	12,34%	32,84%	86,98%	25,35%	16,43%
<b>Modelo 7</b>	9,82%	15,20%	53,34%	17,46%	11,54%
<b>Modelo 8</b>	8,91%	14,79%	57,58%	19,43%	12,97%
<b>Modelo 11</b>	10,05%	22,68%	66,67%	8,64%	1,81%
<b>Modelo 15</b>	-18,60%	-11,69%	18,56%	-7,04%	-16,80%
<b>Modelo 16</b>	2,11%	15,70%	22,06%	2,13%	-1,42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das simulações realizadas nas geometrias selecionadas evidenciaram que alterações na geometria do difusor pode produzir comportamentos no escoamento de ar bem distintos. Comparando com o Modelo 1 de Ohya *et al.* (2010), nesta pesquisa adotado como difusor de referência, os difusores apresentaram na sua maioria resultados superiores, destacam-se os Modelo 6 e 8 que tiveram zonas de baixa pressão com os menores valores de todas as geometrias. O Modelo 11 apresentou uma zona de vórtices muito proeminente, destacando-se dos demais difusores. Os modelos 15 3 16 apresentaram um comportamento anômalo que permitiu explorar novas ideias para o design de difusores, o que será melhor apresentado no subcapítulo a seguir.

Concluída esta etapa, explorar-se-á, em maior detalhe, o comportamento dos vórtices observados nas simulações, ocasionadas pela separação no escoamento de ar nas geometria dos Modelos 15 e 16.

#### 4.11. MICROSEPARADOR DE FLUXO

Os resultados apresentados pelos Modelos 15 e 16 nos difusores simulados no Flow Design apresentaram diferentes comportamentos nos vórtices de baixa pressão, diferente das outras geometrias simuladas. A geometria desses dois modelos possuíam uma seção cilíndrica no plano de saída interior do difusor. No Modelo 15 a seção cilíndrica era maior e no modelo 16 menor. Esses elementos produziram nestes dois modelos uma grande área de vórtices de baixa pressão.

Essas anomalias possibilitaram novas ideias no design da geometria para difusores, sinalizando que a utilização de um elemento de dimensões reduzidas separado da geometria principal e posicionada no plano de saída do difusor pode provocar uma separação no escoamento de ar e contribuir na produção de vórtices de baixa pressão.

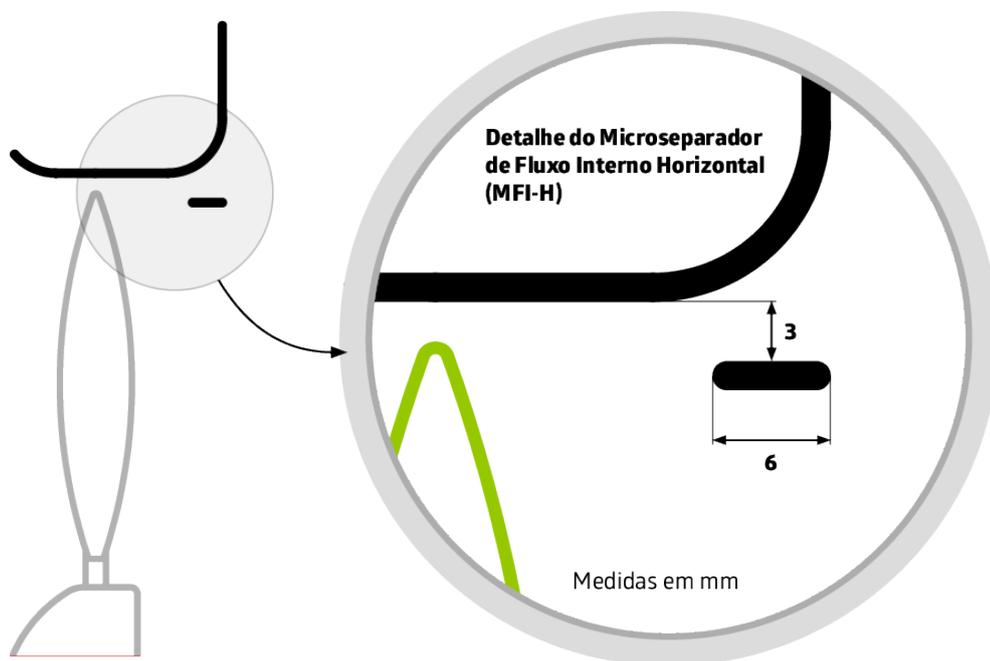
Nesse sentido desenvolveu-se uma estrutura circular posicionada no plano de saída do difusor, com o objetivo de maximizar o efeito de separação do escoamento de ar, que demonstrou, inicialmente, impactar nas zonas de vórtices de baixa pressão, produzindo zonas de vórtices mais proeminentes.

Denominou-se essa estrutura circular interna de Microseparador de Fluxo Interno, ou, MFI. Para efeitos de escalabilidade e reprodutibilidade o comprimento do MFI foi estabelecido em 2,35% (0,235) da altura do difusor (H).

Desenvolveu-se três configurações de MFI, uma de perfil horizontal, uma de perfil vertical e uma de perfil semicircular. Utilizou-se as geometrias dos Modelo 6 e 11 como base para aplicação do MFI. A escolha desses dois modelos se deu devido aos resultado superiores apresentados na etapa anterior.

A figura 45 apresenta a configuração do MFI com perfil horizontal.

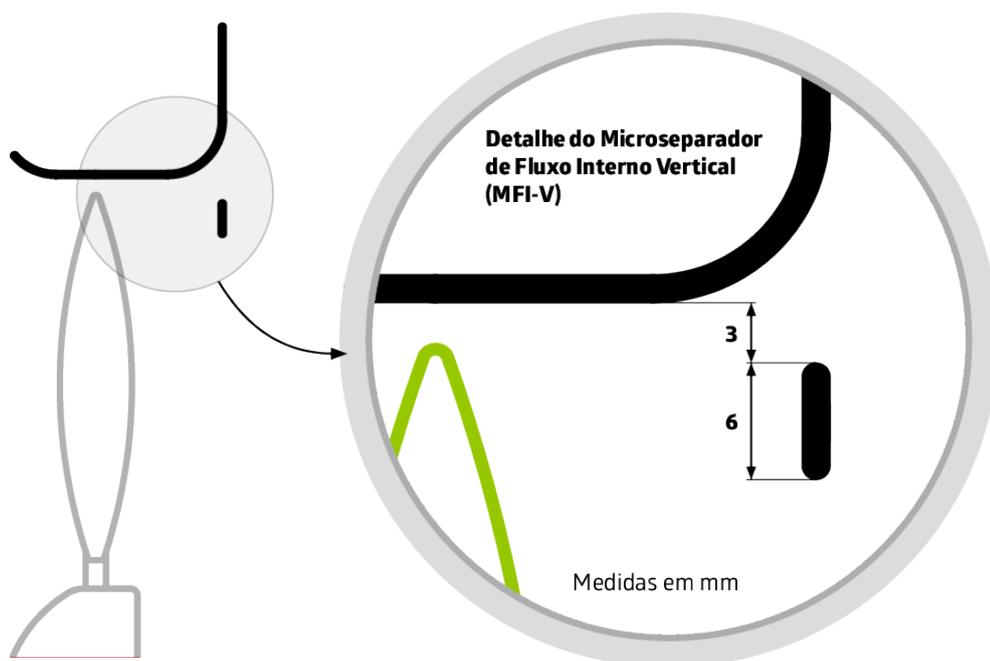
**Figura 45** - Configuração do MFI com perfil horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 46 apresenta a configuração do MFI com perfil vertical.

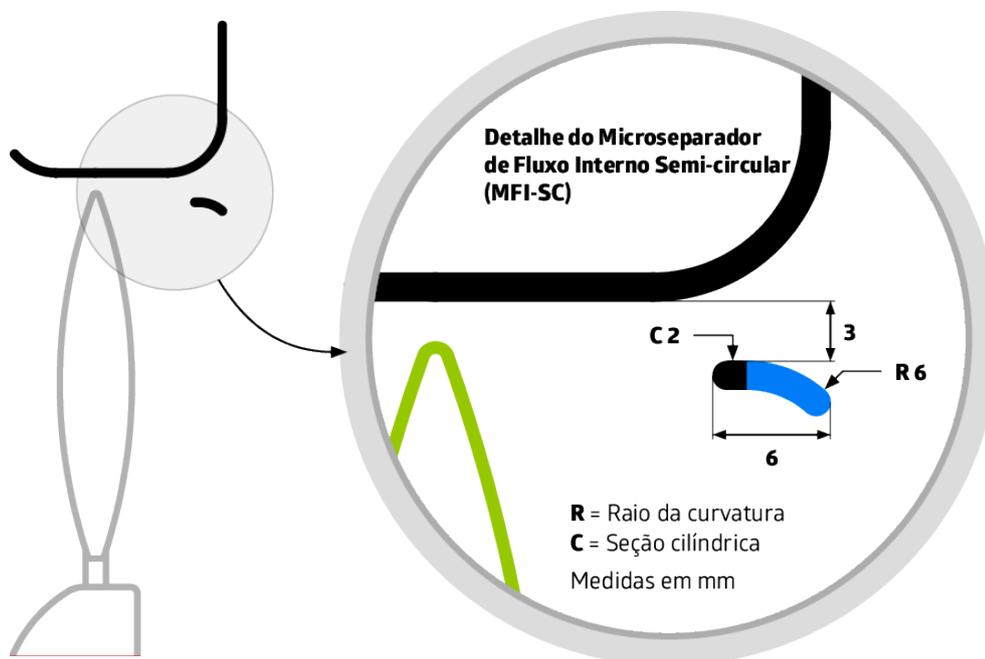
**Figura 46** - Configuração do MFI vertical.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 47 apresenta a configuração do MFI com perfil semi-circular.

Figura 47 - Configuração do MFI semi-circular.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma apresentam-se as seguintes configurações:

- 1) **Modelo 6 MFI-H:** Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto com perfil MFI horizontal;
- 2) **Modelo 6 MFI-V:** Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto com perfil MFI vertical;
- 3) **Modelo 6 MFI-SC:** Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto com perfil MFI semicircular;
- 4) **Modelo 11 MFI-H:** Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto com perfil MFI horizontal;
- 5) **Modelo 11 MFI-V:** Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto com perfil MFI vertical;
- 6) **Modelo 11 MFI-SC:** Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto com perfil MFI semicircular.

A figura 48 apresenta as geometrias de difusores com os perfis MFI aplicados e consideradas neste estudo.

**Figura 48** - Geometrias selecionadas com MFI aplicado.



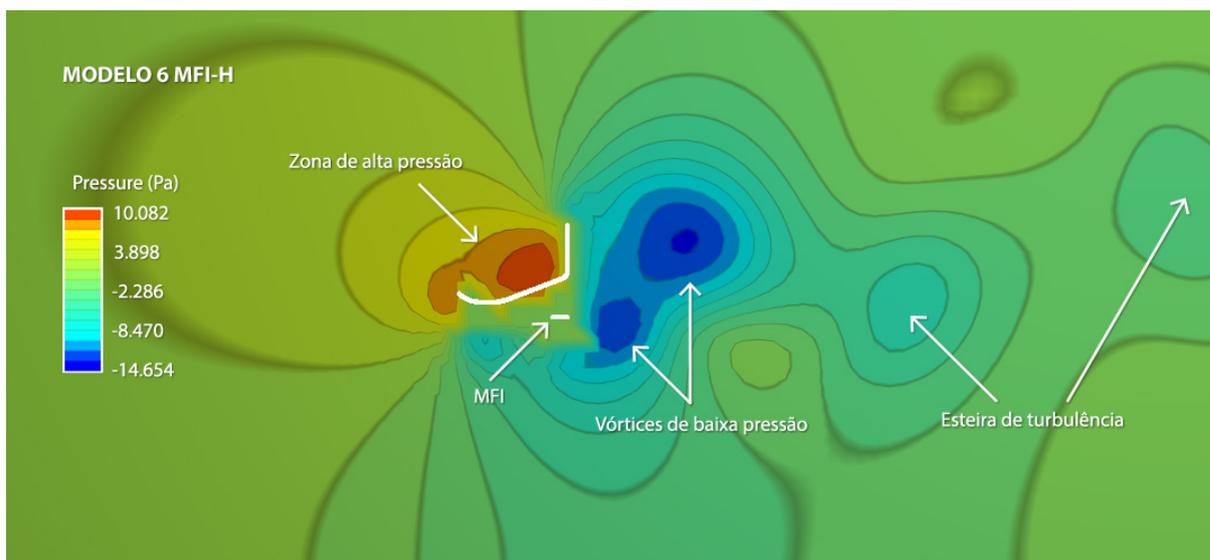
Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir apresentam-se as simulações em túnel de vento virtual com as seis configurações de MFI desenvolvidas.

#### **4.11.1. Resultados e análises das simulações nos difusores com MFI**

As figuras 49 a 54 são os resultados de pressão apresentados pelo *software* de simulação de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design com as 6 configurações de difusores com MFI aplicado.

**Figura 49** - Simulação de pressão com difusor modelo 6 com MFI-H.



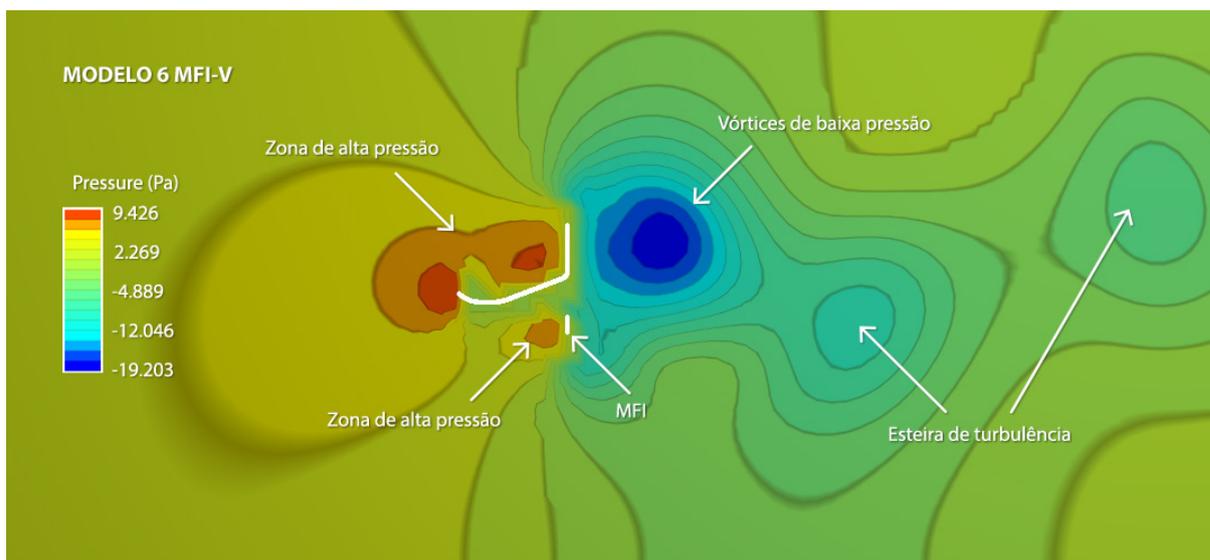
Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação no Modelo 6 MFI-H (figura 49) apresentou duas zonas de vórtices proeminentes. O MFI-H proporcionou um separação no fluxo passante pelo difusor, produzindo duas zonas de vórtices no plano de saída do difusor.

Comparando as escalas cromáticas e os respectivos valores numéricos dos vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor, mostram que a intensidade máxima da zona de baixa pressão foi 76,36% mais baixa em relação ao Modelo 1.

A zona de alta pressão apresentou, se comparada com a geometria sem MFI aplicado, um ligeiro prolongamento para a parte frontal do difusor, próximo a curvatura de entrada do mesmo. Houve nesse sentido, uma ligeira perda da intensidade máxima da zona de alta pressão, ficando 2,92% mais fraca em relação ao Modelo 6 sem MFI aplicado. Comparando com o Modelo 1, a intensidade máxima da zona de alta pressão foi 9,07% mais intensa. Esse aumento e prolongamento da zona de alta pressão ocorre devido à perda de intensidade da zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor, devido a presença do MFI no plano de saída do difusor.

**Figura 50** - Simulação de pressão com difusor modelo 6 com MFI-V.



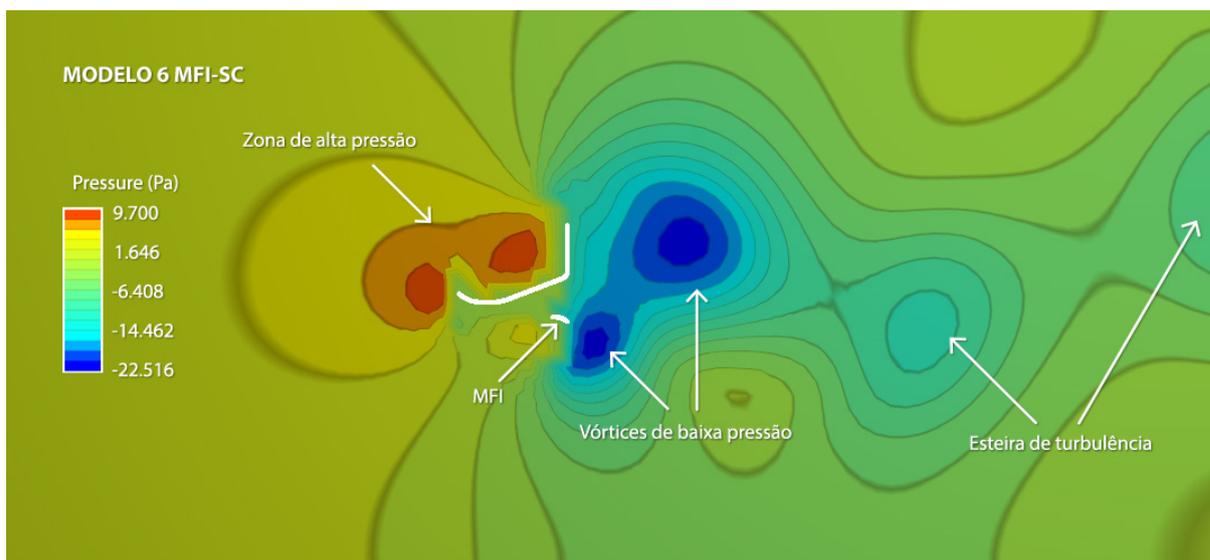
Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação no Modelo 6 MFI-V (figura 50) apresentou uma grande zona de vórtices com maior intensidade da baixa pressão que o Modelo 6 MFI-H. Comparando as escalas cromáticas e os respectivos valores numéricos dos vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor, mostram que a zona de vórtices de baixa pressão foi 131,10% mais baixa em relação ao Modelo 1 e 34,04% mais baixa em relação ao Modelo 6 com MFI-H.

O Modelo 6 com MFI-V apresentou, devido a posição vertical do MFI no plano de saída do difusor, uma zona de alta pressão secundária. Devido a essa segunda zona de alta pressão, a perda de intensidade da zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor foi maior, pois somou-se a perda ocasionada pelo MFI aplicado no plano de saída do difusor, e prejudicando assim, o efeito de sucção que aspira mais ar para aquela região.

A zona de alta pressão principal é mais proeminente que no Modelo 6 MFI-H, que ao contrário do Modelos 6 e Modelo 6 MFI-H invade e prolonga-se pela zona de entrada do difusor.

**Figura 51** - Simulação de pressão com difusor modelo 6 com MFI-D.



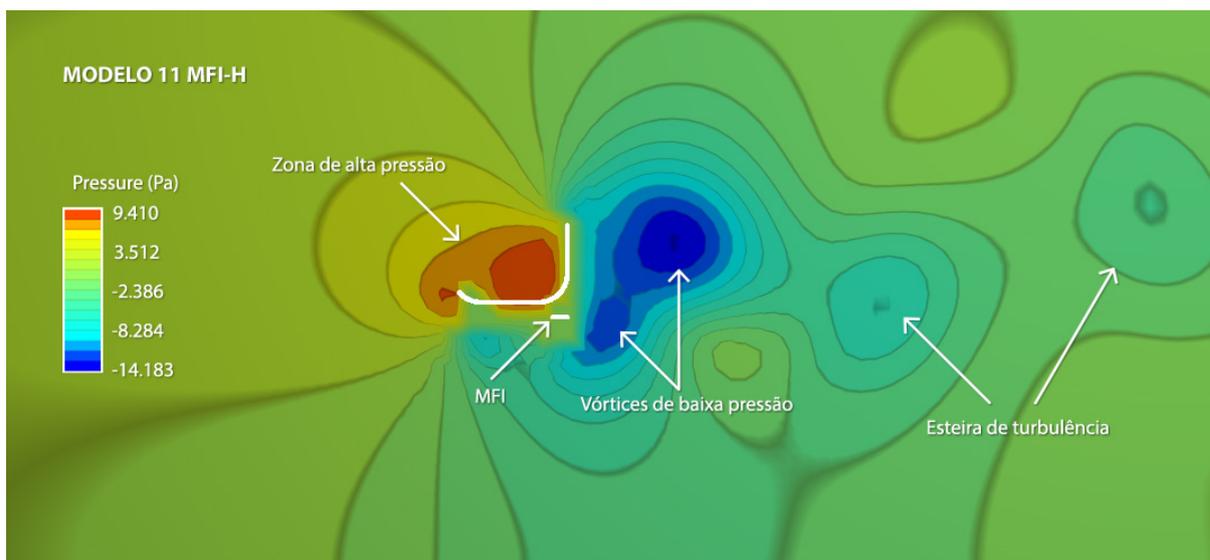
Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação no Modelo 6 MFI-D (figura 51) apresentou duas zonas de vórtices de baixa pressão mais proeminentes e definidas. Comparando as escalas cromáticas e os respectivos valores numéricos dos vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor, mostram que a pressão foi 53,65% mais baixa relação ao Modelo 6 MFI-H e 17,25% mais baixa em relação ao Modelo 6 MFI-V.

Em relação ao Modelo 1, a zona de vórtices de baixa pressão apresentou uma pressão 170,98% mais baixa. O MFI aplicado diminuiu a zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor, se comparado ao Modelo 6 sem MFI.

A zona de alta pressão é similar em área, tamanho e intensidade em relação ao Modelo 6 MFI-V. Em relação ao Modelo 6 sem MFI aplicado, houve um prolongamento, aumento de área e intensidade da zona de alta pressão no plano de entrada do difusor. Assim como no Modelo 6 MFI-H, o MFI diminuiu a intensidade da zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor.

**Figura 52** - Simulação de pressão com difusor modelo 11 com MFI-H.



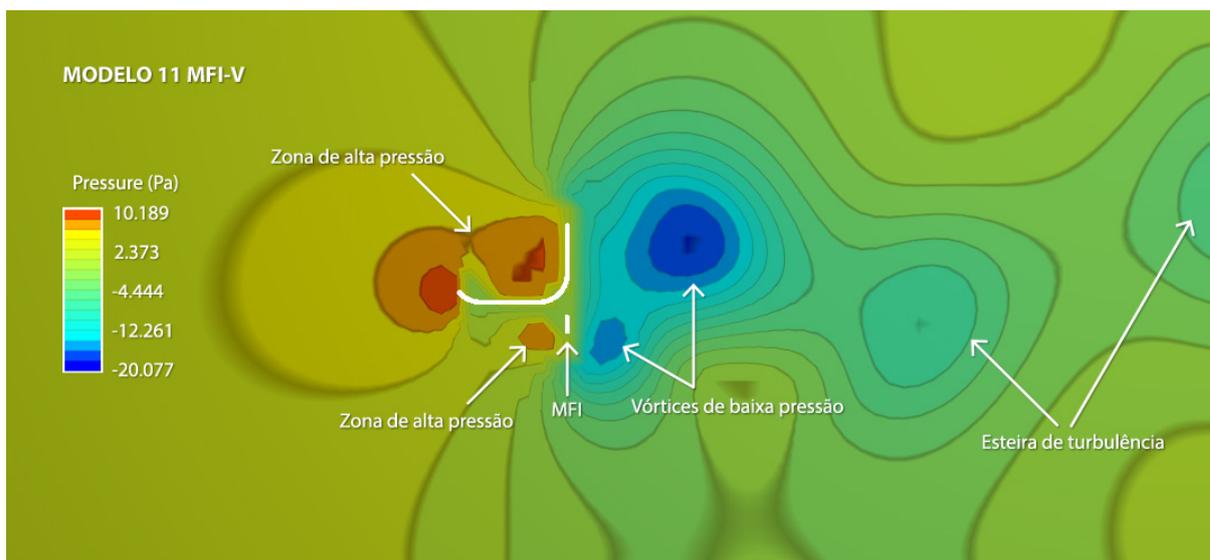
Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação no Modelo 11 MFI-H (figura 52) apresentou duas zonas de vórtices proeminentes similares ao Modelo 6 MFI-H, porém mais bem definidas e com zonas de alta intensidade de baixa pressão maiores.

Comparando as escalas cromáticas e os respectivos valores numéricos dos vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor, mostram que a intensidade da baixa pressão diminuiu 5,04% relação ao Modelo 11 sem MFI aplicado. Em relação ao Modelo 1, a pressão foi 70,69% mais baixa na zona de vórtices.

Houve um pequeno prolongamento e aumento de intensidade na zona de alta pressão no plano de entrada do difusor, se comparado com o Modelo 11 sem MFI aplicado. Esse prolongamento e aumento de intensidade ocorre devido à perda de intensidade na zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor, causada pelo MFI aplicado.

Essa área de baixa pressão máxima é devido ao difusor possuir uma altura de flange maior em relação a geometria do Modelo 6 e já visto no Modelo 11 sem MFI aplicado. O MFI-H proporcionou um separação no fluxo passante pelo difusor, produzindo duas zonas de vórtices no plano de saída do difusor. Essa zona de baixa pressão no plano de saída do difusor é mais intensa que o Modelo 1, se comparar a legenda com as cores que os valores numéricos que as representam.

**Figura 53** - Simulação de pressão com difusor modelo 11 com MFI-V

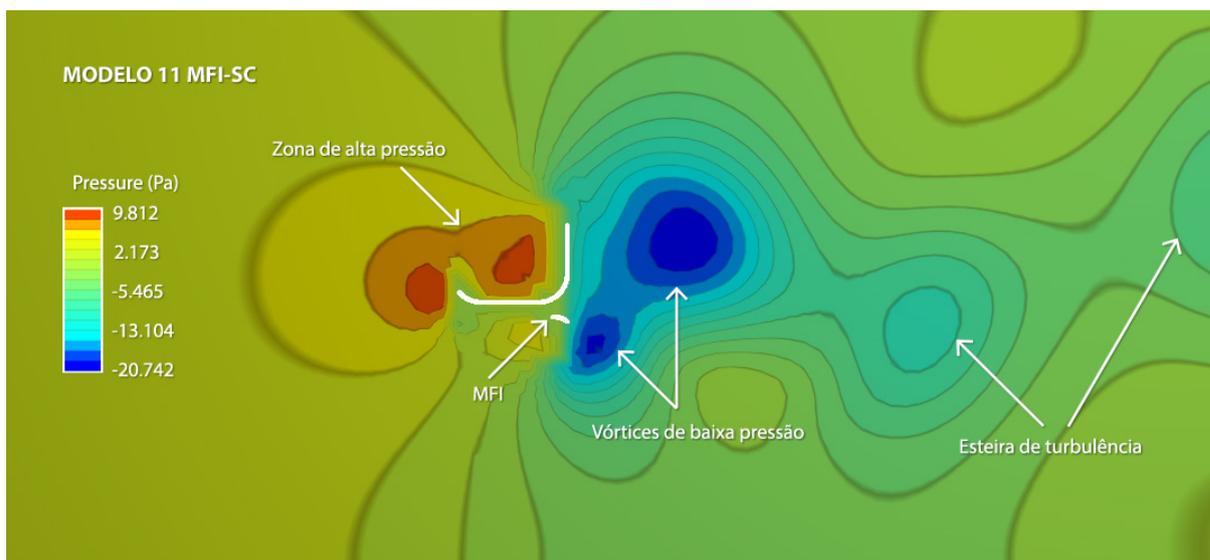
Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação no Modelo 6 MFI-H (figura 53) apresentou duas zonas de vórtices proeminentes. Comparando as escalas cromáticas e os respectivos valores numéricos dos vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor, mostram que a zona de vórtices de baixa pressão foi 141,63% mais baixa em relação ao Modelo 1 e 41,56% mais baixa em relação ao Modelo 11 com MFI-H.

Assim como no Modelo 6 com MFI-V, apresentou uma zona de alta pressão secundária, que diminuiu a intensidade da zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor, prejudicando assim, o efeito de sucção que aspira mais ar para aquela região.

A zona de alta pressão principal é mais proeminente e invade o plano de entrada do difusor que o visualizado no Modelo 11 sem MFI aplicado. Essa zona de alta pressão na entrada do difusor é ocasionada pela baixa intensidade da zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor.

**Figura 54** - Simulação de pressão com difusor modelo 11 com MFI-D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação no Modelo 11 MFI-SC (figura 54) apresentou duas zonas de vórtices de baixa pressão mais proeminentes e definidas, muito similares ao Modelo 6 com MFI-SC. Comparando as escalas cromáticas e os respectivos valores numéricos dos vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor, mostram que a pressão foi 46,25% mais baixa relação ao Modelo 11 MFI-H e 3,30% mais baixa em relação ao Modelo 11 MFI-V. Em relação ao Modelo 1, a zona de vórtices de baixa pressão apresentou uma pressão 149,63% mais baixa. O MFI aplicado diminuiu a zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor.

A zona de alta pressão é similar em área, tamanho e intensidade em relação ao Modelo 11 MFI-V. Em relação ao Modelo 11 sem MFI aplicado, houve um prolongamento, aumento de área e intensidade da zona de alta pressão no plano de entrada do difusor. Assim como no Modelo 11 MFI-H, o MFI diminuiu a intensidade da zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor.

A tabela 6 apresenta os comparativos de pressão em Pa (Pascal) das configurações de difusores com MFI baseados na geometria do Modelo 6 em relação a geometria sem MFI aplicado. Os valores foram compilados a partir dos valores apresentados no gráfico de cores mostrado em cada simulação realizada no Flow Design.

**Tabela 6** - Comparativos de pressão em Pascal (Pa) em relação ao Modelo 6.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
<b>Modelo 6</b>	<b>10,385 Pa</b>	<b>3,976 Pa</b>	<b>-3,848 Pa</b>	<b>-10,415 Pa</b>	<b>-17,081 Pa</b>
<b>Modelo 6 MFI-H</b>	10,082	3,898	-2,286	-8,470	-14,654
<b>Modelo 6 MFI-V</b>	9,426	2,269	-4,889	-12,046	-19,203
<b>Modelo 6 MFI-SC</b>	9,700	1,646	-6,408	-14,462	-22,516

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 7 apresenta as variações percentuais de pressão das configurações de difusores com MFI baseados na geometria do Modelo 6 em relação a geometria sem MFI aplicado. Os valores em porcentagem representam nas duas primeiras colunas (alta pressão máxima e alta pressão média) o quanto a alta pressão ganhou (porcentagem negativa) ou perdeu (porcentagem negativa) de intensidade e nas colunas restantes o quanto a baixa pressão ganhou (porcentagem positiva) ou perdeu (porcentagem negativa) de intensidade em relação ao Modelo 6 sem MFI aplicado.

**Tabela 7** - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 6.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
<b>Modelo 6</b>	<b>10,385 Pa</b>	<b>3,976 Pa</b>	<b>-3,848 Pa</b>	<b>-10,415 Pa</b>	<b>-17,081 Pa</b>
<b>Modelo 6 MFI-H</b>	-2,92%	-1,96%	-40,58%	-19,27%	-14,21%
<b>Modelo 6 MFI-V</b>	-9,22%	-42,93%	+27,05%	15,65%	+12,42%
<b>Modelo 6 MFI-SC</b>	-6,60%	-58,59%	+66,53%	38,86%	+31,81%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 8 apresenta os comparativos de pressão em Pa (Pascal) das configurações de difusores com MFI baseados na geometria do Modelo 11 em relação a geometria sem MFI aplicado. Os valores foram compilados a partir dos valores apresentados no gráfico de cores mostrado em cada simulação realizada no Flow Design.

**Tabela 8** - Comparativos de pressão em Pascal (Pa) em relação ao Modelo 11.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
<b>Modelo 11</b>	<b>10,174 Pa</b>	<b>3,672 Pa</b>	<b>-3,430 Pa</b>	<b>-9,027 Pa</b>	<b>-14,935 Pa</b>
<b>Modelo 11 MFI-H</b>	9,410	3,512	-2,386	-8,284	-14,183
<b>Modelo 11 MFI-V</b>	10,189	2,373	-4,444	-12,261	-20,077
<b>Modelo 11 MFI-SC</b>	9,812	2,173	-5,465	-13,104	-20,742

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 9 apresenta as variações percentuais de pressão das configurações de difusores com MFI baseados na geometria do Modelo 11 em relação a geometria sem MFI aplicado. Os valores em porcentagem representam nas duas primeiras colunas (alta pressão máxima e alta pressão média) o quanto a alta pressão ganhou (porcentagem positiva) ou perdeu (porcentagem negativa) de intensidade e nas colunas restantes o quanto a baixa pressão ganhou (porcentagem positiva) ou perdeu (porcentagem negativa) de intensidade em relação ao Modelo 11 sem MFI aplicado.

**Tabela 9** - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 11.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
<b>Modelo 11</b>	<b>10,174 Pa</b>	<b>3,672 Pa</b>	<b>-3,430 Pa</b>	<b>-9,027 Pa</b>	<b>-14,935 Pa</b>
<b>Modelo 11 MFI-H</b>	-7,51%	-4,36%	-30,44%	-8,23%	-5,04%
<b>Modelo 11 MFI-V</b>	+0,15%	-35,38%	+29,56%	+35,83%	+34,43%
<b>Modelo 11 MFI-SC</b>	-3,56%	-40,82%	+59,33%	+46,16%	+38,87%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 10 apresenta os comparativos de pressão em Pa (Pascal) das configurações de difusores com MFI em relação a geometria do Modelo 1 de Ohya *et al.* (2010). Os valores foram compilados a partir dos valores apresentados no gráfico de cores mostrado em cada simulação realizada no Flow Design.

**Tabela 10** - Comparativos de pressão em Pascal (Pa) em relação ao Modelo 1.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
<b>Modelo 1</b>	<b>9,244 Pa</b>	<b>2,993 Pa</b>	<b>-2,058 Pa</b>	<b>-8,309 Pa</b>	<b>-14,670 Pa</b>
<b>Modelo 6 MFI-H</b>	10,082	3,898	-2,286	-8,470	-14,654
<b>Modelo 6 MFI-V</b>	9,426	2,269	-4,889	-12,046	-19,203
<b>Modelo 6 MFI-SC</b>	9,700	1,646	-6,408	-14,462	-22,516
<b>Modelo 11 MFI-H</b>	9,410	3,512	-2,386	-8,284	-14,183
<b>Modelo 11 MFI-V</b>	10,189	2,373	-4,444	-12,261	-20,077
<b>Modelo 11 MFI-SC</b>	9,812	2,173	-5,465	-13,104	-20,742

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 11 apresenta as variações percentuais de pressão das configurações de difusores com MFI em relação a geometria do Modelo 1 de Ohya *et al.* (2010). Os valores representam nas duas primeiras colunas (alta pressão máxima e alta pressão média) o ganho (porcentagem negativa) ou perda (porcentagem negativa) de intensidade e nas colunas restantes o quanto a baixa pressão ganhou (porcentagem positiva) ou perdeu (porcentagem negativa) de intensidade em relação ao Modelo 1.

**Tabela 11** - Variação percentual de pressão em relação ao Modelo 1.

DIFUSOR	Alta pressão máxima	Alta pressão média	Pressão regular	Baixa pressão média	Baixa pressão máxima
<b>Modelo 1</b>	<b>9,244 Pa</b>	<b>2,993 Pa</b>	<b>-2,058 Pa</b>	<b>-8,309 Pa</b>	<b>-14,670 Pa</b>
<b>Modelo 6 MFI-H</b>	+9,07%	+30,24%	11,08%	+1,94%	-0,11%
<b>Modelo 6 MFI-V</b>	+1,97%	+24,19%	+137,56%	+44,98%	+30,90%
<b>Modelo 6 MFI-SC</b>	+4,93%	-45,01%	+211,37%	+74,05%	+53,48%
<b>Modelo 11 MFI-H</b>	+1,79%	+17,34%	+15,93%	-0,30%	-3,32%
<b>Modelo 11 MFI-V</b>	+10,22%	-20,72%	+115,94%	+47,56%	+36,86%
<b>Modelo 11 MFI-SC</b>	+6,14%	-27,40%	+165,55%	+57,70%	+41,39%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostraram que a configuração de MFI com o perfil semi-circular teve um resultado muito superior às outras configurações simuladas. Em ambas as geometrias a configuração MFI de perfil semi-circular teve um aumento de performance em relação ao Modelo 1 de mais de 50% na geometria Modelo 6 e mais de 41% na geometria Modelo 11. Todas as configurações de MFI serão ensaiadas no túnel de vento físico para comparar com os resultados apresentados nesta simulação.

Concluída esta etapa, seguiu-se para a etapa de projeto de uma turbina eólica de pequena escala para ser utilizada nos ensaios em túnel de vento físico.

#### 4.12. TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA

Para atender as necessidades da pesquisa, no que tange as simulações e análises, foi projetado uma turbina eólica de pequena escala para os ensaios em túnel de vento físico, denominada para este estudo como TEPE-01. Esta turbina tinha como requisitos:

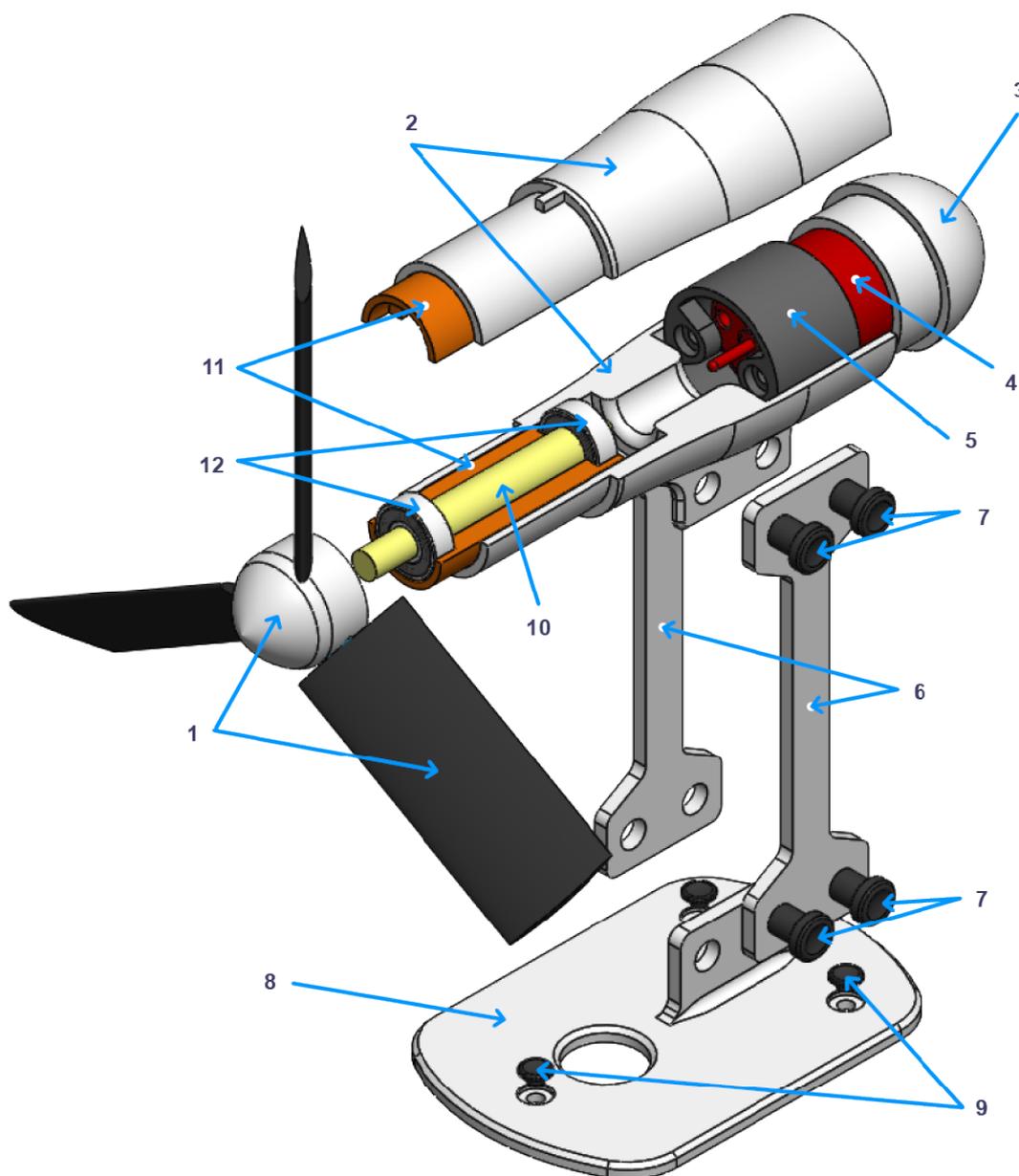
- 1) Ser projetada e adaptada para uso com os difusores desenvolvidos;
- 2) Servir como turbina eólica de pequena escala padrão (sem difusor) de referência para comparação de dados;
- 3) Ser dimensionada para ser compatível com a seção de testes do túnel de vento do LdSM-UFRGS;
- 4) Atender as especificações de rotor e perfis aerodinâmicos de pás propostos por Oliveira (2017).

A TEPE-01 é composta por 12 componentes, como mostra a figura 55: (1) rotor padrão, que é a soma dos perfis NACA com o cubo do rotor, (2) nacele da turbina, (3) tampo da nacele da turbina, (4) gerador elétrico (opcional), (5) suporte do gerador elétrico, (6) hastes de sustentação, (7) parafusos fixadores das hastes de sustentação, (8) base de apoio, (9) parafusos fixadores da base de apoio, (10) eixo de transmissão, (11) suporte do eixo de transmissão e (12) os rolamentos do eixo de transmissão.

Para manufatura dos componentes da TEPE-01 foram utilizados: prototipagem rápida via impressão 3D: (1) rotor padrão, (2) nacele da turbina, (3) tampo da nacele da turbina, (5) suporte do gerador elétrico, (8) base de apoio e (11) suporte do eixo de

transmissão; usinagem por torneamento mecânico: (10) eixo de transmissão; corte laser em chapa de acrílico: (6) hastes de sustentação; peças pré-fabricadas ou adquiridas prontas: (7) parafusos fixadores das hastes, (9) parafusos fixadores da base de apoio e (12) rolamentos do eixo.

**Figura 55** - Componentes da TEPE-01.



**LEGENDA**

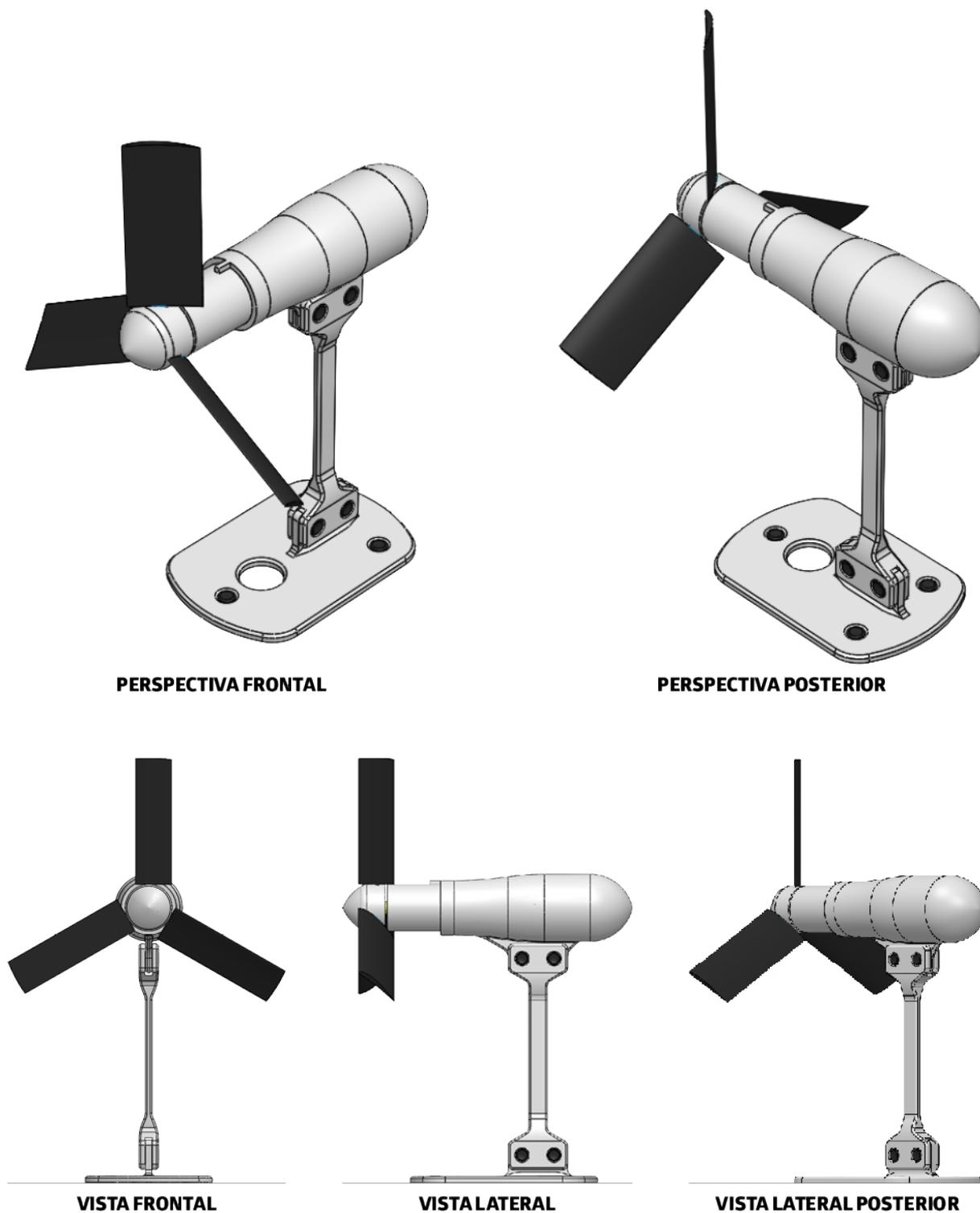
1 - ROTOR PADRÃO (PERFIS NACA + CUBO DO ROTOR)  
 2 - NACELE DA TURBINA  
 3 - INVÓLUCRO POSTERIOR DA NACELE DA TURBINA  
 4 - GERADOR ELÉTRICO  
 5 - SUPORTE DO GERADOR ELÉTRICO  
 6 - HASTES DE SUSTENTAÇÃO

7 - PARAFUSOS FIXADORES DAS HASTES  
 8 - BASE DE APOIO  
 9 - PARAFUSOS FIXADORES DA BASE  
 10 - EIXO DE TRANSMISSÃO  
 11 - SUPORTE DO EIXO  
 12 - ROLAMENTOS DO EIXO

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 56 mostra a TEPE-01 em diferentes vistas projetivas.

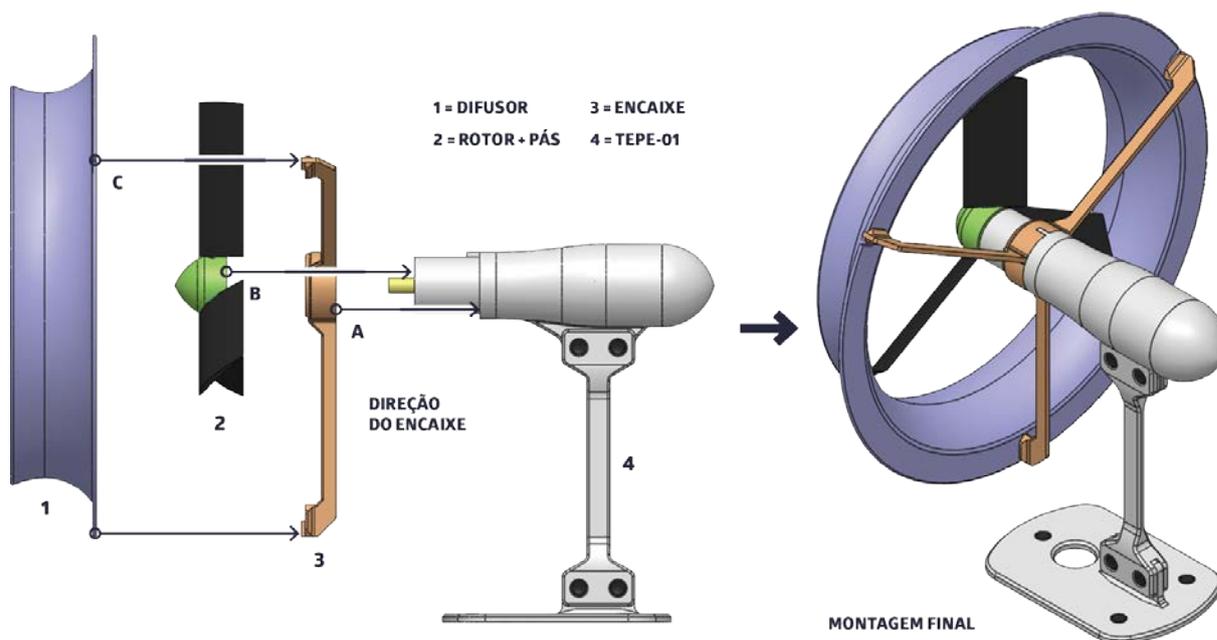
**Figura 56** - Detalhe do encaixe do suporte e do difusor na Turbina-01.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a TEPE-01 foi projetado um suporte para acoplamento dos difusores, este suporte serve para acoplar todos os difusores desenvolvidos. A figura 57 mostra o detalhe do encaixe do suporte e do difusor na TEPE-01.

**Figura 57** - Detalhe do encaixe do suporte e do difusor na TEPE-01.



Fonte: Elaborado pelo autor

A TEPE-01 foi projetada para ser manufatura, em sua maior parte, por impressão 3D por FDM. Algumas partes da turbina, por características de sua função, foram manufaturas em outros materiais, como o eixo de transmissão que foi usinado por torneamento a partir de um eixo de aço, os rolamentos rígidos de esferas com vedação e as hastes de sustentação que foram manufaturas a partir do corte a laser de uma chapa de acrílico transparente de 4 mm de espessura. As hastes de sustentação foram manufaturas em acrílico pois este possui maior rigidez e evitaria vibrações na turbina.

#### 4.13. PROTOTIPAGEM 3D

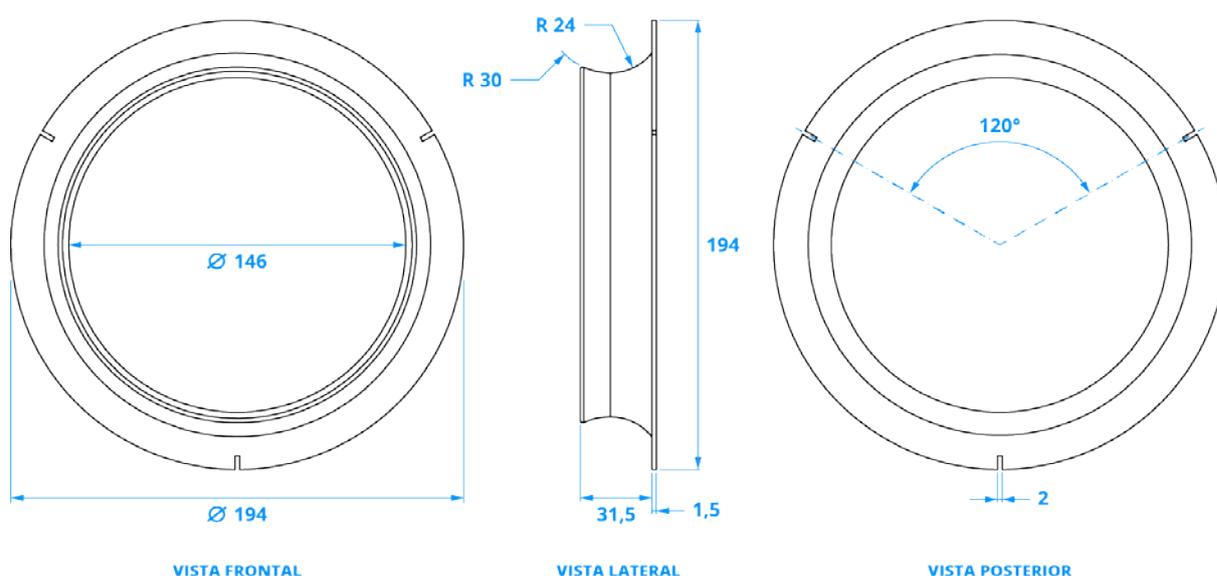
Os modelos simulados e selecionados na etapa anterior foram preparados para serem prototipados, com a finalidade de serem submetidos a testes em túnel de vento

físico. Utilizou-se como tecnologia de prototipagem rápida a impressão 3D por FFF (*fused filament fabrication* - fabricação por filamento fundido).

Esse é o processo de prototipagem rápida mais comum, seu processo de manufatura (ou impressão 3D) é feita por camadas que utilizam materiais termoplásticos, como ABS, poliamida e PLA, para manufaturar os objetos.

Para se possível o encaixe no suporte para difusor da TEPE-01, foi adicionado aos difusores três pontos de encaixe, separados por um ângulo de 120 graus. Foi estabelecido também uma espessura de 1,5 mm para os difusores, este valor foi definido para equacionar a relação peso *versus* resistência dos difusores prototipados em impressora 3D. A figura 58 mostra um esquema simplificado dos detalhes adicionais feitos para a prototipação dos difusores

**Figura 58** - Detalhes técnicos adicionais para prototipação dos difusores.

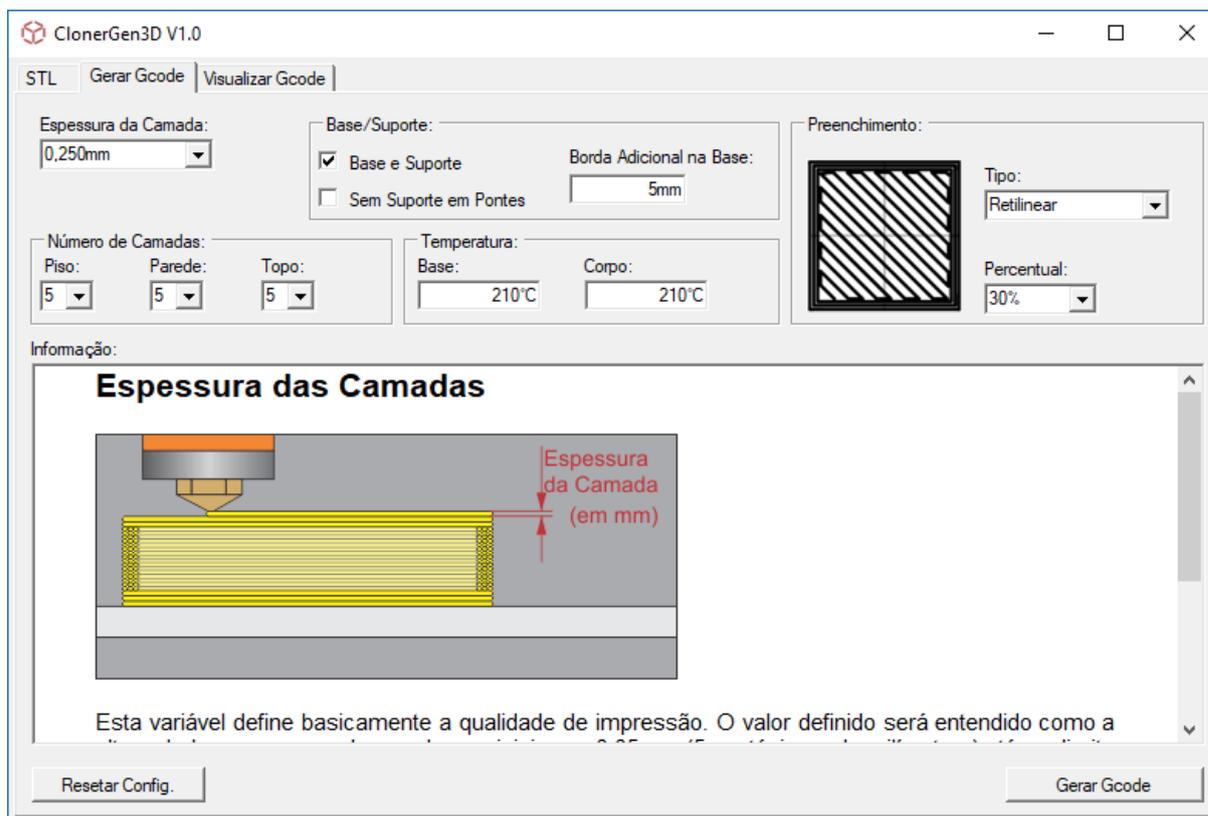


Fonte: Elaborado pelo autor

A prototipagem 3D dos difusores foi realizado na Oficina de Modelos, Protótipos e Maquetes da Faculdade de Arquitetura da UFRGS (FA/UFRGS), onde estão localizadas duas impressoras 3D do tipo FFF da marca 3DCloner. A configuração da impressão foi realizada por meio do *software* CLONEGEN 3D, disponibilizado pela fabricante da impressora 3DCloner. Este *software* possibilita, a partir de um arquivo

em formato STL, gerar o código utilizado para carregar e enviar os g-codes<sup>25</sup> para a impressora 3D. As configurações<sup>26</sup> utilizadas no *software* CLONEGEN 3D para a impressão 3D dos difusores é apresentada na figura 59.

**Figura 59** - Configurações utilizadas no *software* CLONEGEN 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor

A impressão 3D dos difusores foi feita utilizando como matéria-prima padrão filamento de PLA<sup>27</sup> (ácido poliláctico) de 0,75 mm de diâmetro. Além dos difusores, também foram manufaturados na impressora 3D a TEPE-01 para os ensaios em túnel

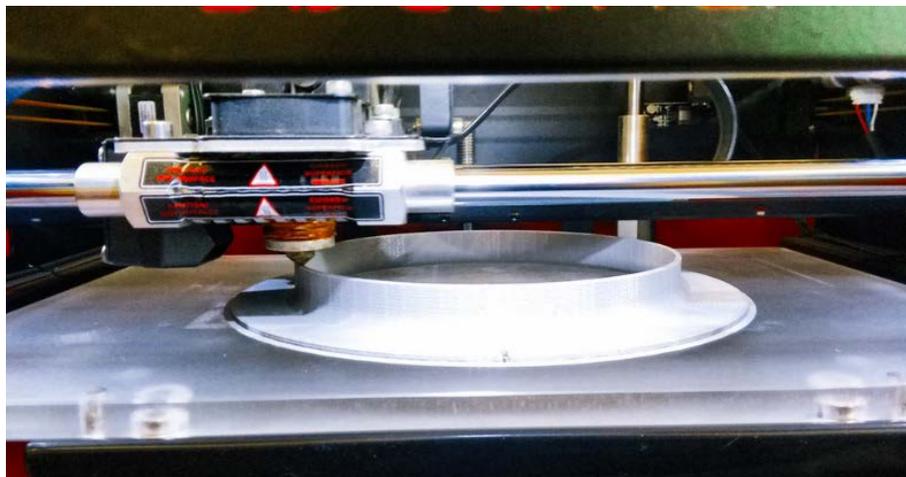
<sup>25</sup> O código G-Code é o nome dado à linguagem de programação criada para o uso em maquinários industriais que fazem uso de sistemas Comando Numérico Computadorizado (CNC). Sua função principal é instruir a máquina a se mover geometricamente nas dimensões x, y e z. O Código g-code tem sua maior área de aplicação de uso em máquinas CNC's, porém, com o advento da impressão 3D, que tem como base a tecnologia CNC, a mesma linguagem é utilizada pelas aplicações relacionadas à impressão 3D.

<sup>26</sup> Este estudo utilizou impressoras da marca 3DCloner com filamentos a 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 pode necessitar de configurações diferentes das apresentadas neste estudo.

<sup>27</sup> PLA é um polímero biodegradável produzido a partir do ácido láctico, obtido por fermentação bacteriana da glicose extraída do milho ou da cana de açúcar. Tem propriedades semelhantes as do tereftalato de polietileno (PET).

de vento físico e os perfis NACA 6409 e NACA 1412 propostos por Oliveira (2017). A figura 60 mostra a impressão 3D do difusor Modelo 3.

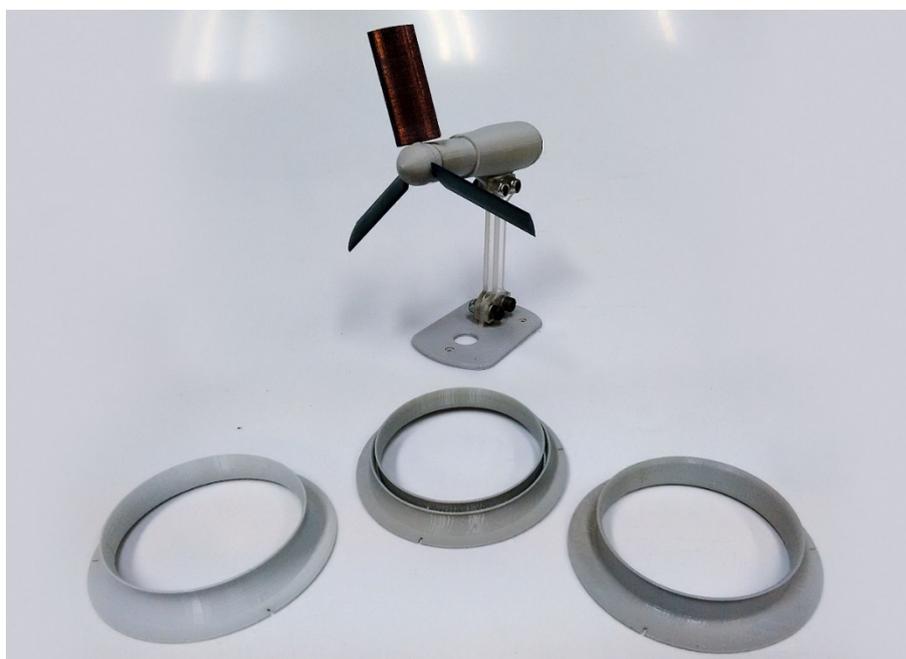
**Figura 60** - Impressão 3D do difusor Modelo 3.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 61 mostra a TEPE-01 e os alguns impressos em 3D.

**Figura 61** - TEPE-01 e os difusores manufacturados em impressora 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor

A prototipagem das geometria dos difusores, da TEPE-01 para os ensaios em túnel de vento físico e o perfil aerodinâmico de pás NACA 6409 habilita à próxima

etapa da pesquisa, que realizará os ensaios aerodinâmicos em túnel de vento físico para a avaliação do comportamento dinâmico dos difusores acoplados em uma turbina eólica.

#### 4.14. ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO FÍSICO

Esta seção apresenta os ensaios em túnel de vento físico, onde serão avaliados o comportamento dinâmico da turbina eólica com difusor acoplado.

##### 4.14.1. Configuração do ensaio em túnel de vento físico

Os modelos selecionados e previamente submetidos a testes em túnel de vento virtual foram submetidos ao “túnel de vento de circuito aberto de baixa velocidade do tipo aspirador (*suckdown*)” (BARLOW *et al.*, 1999) pertencente ao LdSM-UFRGS. A figura 62 mostra o túnel de vento do LdSM-UFRGS.

**Figura 62** - Túnel de vento do LdSM-UFRGS



Fonte: Elaborador pelo autor.

Para este experimento foi utilizado um anemômetro digital portátil para a medição da velocidade do vento, da marca Incoterm. O anemômetro possui um faixa medição de 0 a 30 m/s, com uma resolução de 0,1 m/s e precisão de  $\pm 5\%$ . Também é apto a medir a temperatura local, com alcance de  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ , resolução de 0,2  $^{\circ}\text{C}$  e precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Também foi utilizado um Tacômetro digital portátil ótico com

mira laser, da marca Instrutherm, para medir as rotações por minuto (RPM) da TEPE-01, com e sem difusores acoplados. O tacômetro tem uma faixa de medição que vai de 1 a 99999 RPM e sua resolução é de 0,1 RPM. A amostragem é medida a cada 1 segundo. A figura 63 mostra o modelo do anemômetro e o tacômetro usado nos experimentos realizados no túnel de vento físico.

**Figura 63** - Anemômetro digital e tacômetro utilizado nos experimentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

A seção de testes no túnel de vento possui uma dimensões de 250 mm x 260 mm x 700 mm (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 RPM, a velocidade do vento foi definida em 4 m/s<sup>28</sup>. Esta velocidade foi definida a partir da média anual de ventos registradas na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Porto Alegre) a uma altitude de 3 metros. Essa velocidade é classificada como vento fraco pela escala de vento de Beaufort<sup>29</sup> (BLESSMANN, 1998, 2001).

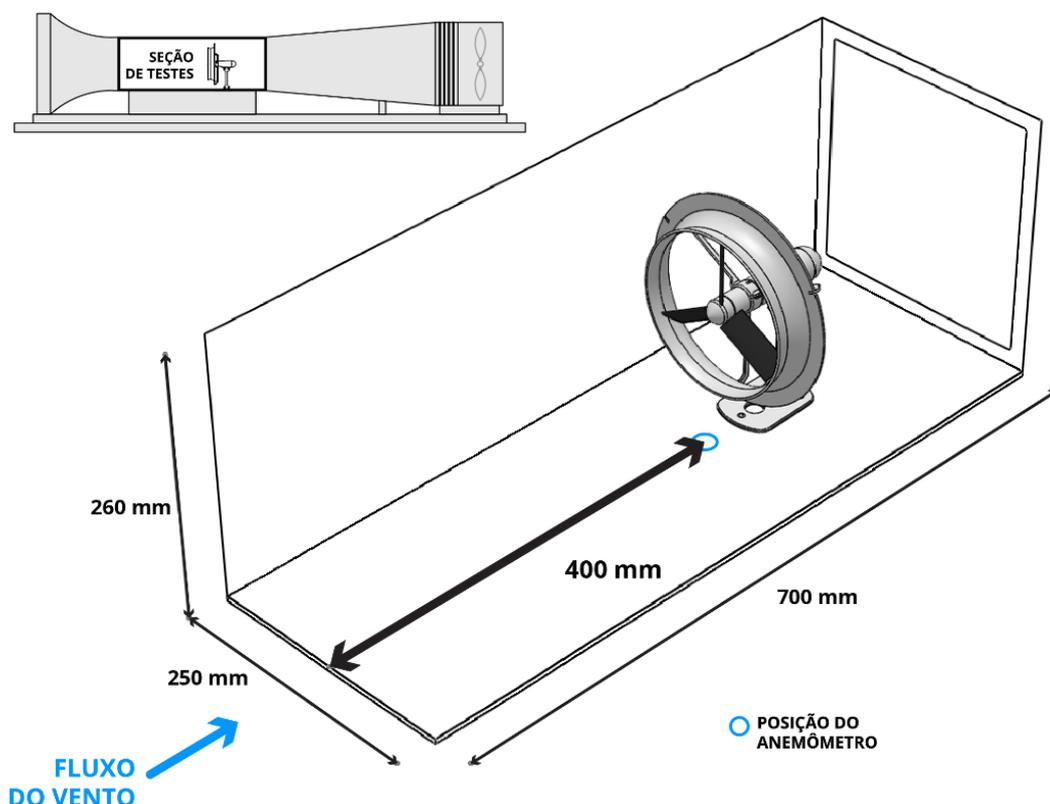
---

<sup>28</sup> Esse valor corresponde a 14,4 km/h ou 7,7 Nós.

<sup>29</sup> A Escala de Beaufort classifica a intensidade dos ventos, tendo em conta a sua velocidade e os efeitos resultantes das ventanias no mar e em terra. Foi concebida pelo meteorologista anglo-irlandês Francis Beaufort no início do século XIX.

A TEPE-01 foi posicionada à distância de 400 mm da entrada do escoamento de ar e o anemômetro posicionado à mesma distância. A figura 64 mostra a configuração do túnel de vento para os experimentos realizados.

**Figura 64** - Configuração da seção de testes do túnel de vento.



Fonte: Elaborador pelo autor.

Para os experimentos de medição das RPM, o anemômetro era posicionado junto a entrada de ar do difusor e a seção de testes era lacrada. A entrada do escoamento de ar dentro da seção de testes era iniciada pelo regulador de tensão, assim alcançada a velocidade de vento desejada (4 m/s) o regulador de tensão era travado, o anemômetro retirado da seção de testes, a turbina era posicionada conforme as especificações estipulada e a seção de testes era novamente lacrada. Após um tempo de  $\pm 2$  minutos era iniciado a aferição dos dados. Este tempo era necessário para o escoamento de ar dentro da seção de testes estabilizar.

Para os experimentos de medição da inicialização (menor torque de partida), o processo foi diferente. A TEPE-01 era posicionada conforme as especificações anteriormente mostradas, a seção de testes era lacrada e através 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 era posicionado o anemômetro e a seção de testes novamente lacrada. Após um tempo de  $\pm 2$  minutos era iniciado a aferição dos dados.

A figura 65 mostra a TEPE-01 com um difusor acoplado posicionada na seção de testes do túnel de vento físico.

**Figura 65** - TEPE-01 posicionada na seção de testes do túnel de vento.



Fonte: Elaborador pelo autor.

#### 4.14.2. Resultados no túnel de vento

Seguindo as configurações descritas anteriormente para os experimentos em túnel de vento físico, apresentam-se a seguir os resultados encontrados<sup>30</sup>.

A tabela 12 apresenta os resultados em m/s para o *start* rotacional da TEPE-01 e dos difusores sem as configurações de MFI desenvolvidas. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde à TEPE-01 sem um difusor aplicado e o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1, definido como difusor referência para esta pesquisa. A última coluna apresenta a diferença percentual entre os dois perfis NACA. Nestes ensaios utilizou-se perfis aerodinâmicos NACA 6409 e NACA1412 não

---

<sup>30</sup> Devido a resolução do anemômetro ser de apenas uma casa decimal, alguns valores oscilaram sem apresentar um valor fixo, sendo na tabela apresentados o maior e o menor valor encontrados. O cálculo da variação percentual foi pela média desses dois valores.

torcidos com ângulo de ataque de 15 graus, como utilizado pelo estudo de Oliveira (2017).

**Tabela 12** - Valores do *start* rotacional nos difusores sem MFI.

DIFUSOR	NACA 6409	NACA 1412	DIFERENÇA
TEPE-01	1,1 m/s	1,3 ~ 1,4 m/s	22,73%
Modelo 1	0,8 m/s	1,0 m/s	25,00%
Modelo 2	0,8 m/s	1,0 m/s	25,00%
Modelo 3	0,8 m/s	1,0 m/s	25,00%
Modelo 5	0,7 m/s	0,9 m/s	28,57%
Modelo 6	0,5 ~ 0,6 m/s	0,7 m/s	27,27%
Modelo 7	0,6 m/s	0,7 ~ 0,8 m/s	25,00%
Modelo 8	0,5 ~ 0,6 m/s	0,7 m/s	27,27%
Modelo 11	0,6 m/s	0,7 ~ 0,8 m/s	25,00%
Modelo 15	0,9 ~ 1,0 m/s	1,1 ~ 1,2 m/s	21,05%
Modelo 16	0,8 ~ 0,9 m/s	1,0 ~ 1,1 m/s	23,53%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 13 apresenta os resultados em m/s para o *start* rotacional da TEPE-01 e dos difusores com as configurações de MFI.

**Tabela 13** - Valores do *start* rotacional nos difusores com MFI.

DIFUSOR	NACA 6409	NACA 1412	DIFERENÇA
TEPE-01	1,1 m/s	1,3 ~ 1,4 m/s	22,73%
Modelo 1	0,8 m/s	1,0 m/s	25,00%
Modelo 6 MFI-H	0,6 m/s	0,7 ~ 0,8 m/s	25,00%
Modelo 6 MFI-V	0,5 m/s	0,6 ~ 0,7 m/s	30,00%
Modelo 6 MFI-SC	0,3 m/s	0,4 m/s	33,33%
Modelo 11 MFI-H	0,6 m/s	0,7 ~ 0,8 m/s	25,00%
Modelo 11 MFI-V	0,5 ~ 0,6 m/s	0,7 m/s	27,27%
Modelo 11 MFI-SC	0,3 ~ 0,4 m/s	0,4 ~ 0,5 m/s	28,57%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 14 apresenta as variações percentuais do *start* rotacional dos difusores em relação a TEPE-01, utilizando os perfis NACA selecionados. O primeiro valor apresentado corresponde aos valores da TEPE-01 sem um difusor aplicado e o segundo valor 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 a TEPE-01, os valores em parênteses mostram essa redução de velocidade em relação ao difusor Modelo 1. A tabela apresenta os valores de difusores sem as configurações de MFI.

**Tabela 14** - Variação percentual do *start* rotacional dos difusores sem MFI.

DIFUSOR	NACA 6409 (%)	NACA 1412 (%)
TEPE-01	1,1 m/s	1,3 ~ 1,4 m/s
Modelo 1	-27,27 (0,8 m/s)	-25,92 (1,0 m/s)
Modelo 2	-27,27 (0)	-25,92 (0)
Modelo 3	-27,27 (0)	-25,92 (0)
Modelo 5	-36,36 (-12,50)	-33,33 (-10,00)
Modelo 6	-50,00 (-31,25)	-48,15 (-30,00)
Modelo 7	-45,45 (-25,00)	-44,44 (-25,00)
Modelo 8	-50,00 (-31,25)	-48,15 (-30,00)
Modelo 11	-45,45 (-25,00)	-44,44 (-25,00)
Modelo 15	-13,63 (+18,50)	-14,81 (+15,00)
Modelo 16	-22,73 (+6,25)	-22,22 (+5,00)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 15 apresenta as variações percentuais do *start* rotacional dos difusores em relação a TEPE-01, utilizando os perfis NACA selecionados. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde aos valores da TEPE-01 sem difusor aplicado e o segundo valor 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 a TEPE-01, os valores em parênteses mostram essa redução de velocidade em relação ao difusor Modelo 1. A tabela apresenta os valores de difusores com as configurações de MFI.

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

DIFUSOR	NACA 6409 (%)	NACA 1412 (%)
TEPE-01	1,1 m/s	1,3 ~ 1,4 m/s
Modelo 1	-27,27 (0,8 m/s)	-25,92 (1,0 m/s)
Modelo 6 MFI-H	-45,45 (-25,00)	-44,44 (-25,00)
Modelo 6 MFI-V	-54,55 (-37,50)	-51,84 (-35,00)
Modelo 6 MFI-SC	-72,72 (-62,50)	-70,37 (-60,00)
Modelo 11 MFI-H	-45,45 (-25,00)	-44,44 (-25,00)
Modelo 11 MFI-V	-50,00 (-31,25)	-48,15 (-30,00)
Modelo 11 MFI-SC	-68,17 (-56,25)	-66,67 (-55,00)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 16 apresenta os resultados das RPM para a TEPE-01, utilizando os perfis NACA selecionados. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde aos valores da TEPE-01 sem difusor aplicado e o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1. A última coluna apresenta a diferença de performance entre os perfis NACA utilizados. A tabela apresenta os valores de difusores sem as configurações de MFI.

**Tabela 16** - Valores das RPM nos difusores sem MFI.

DIFUSOR	NACA 6409 (RPM)	NACA 1412 (RPM)	DIFERENÇA (%)
TEPE-01	980	742	-24,29%
Modelo 1	1265	998	-21,11%
Modelo 2	1281	1014	-20,84%
Modelo 3	1198	922	-23,04%
Modelo 5	1338	1032	-22,86%
Modelo 6	1367	1055	-22,82%
Modelo 7	1349	1036	-23,20%
Modelo 8	1356	1025	-24,41%
Modelo 11	1290	1003	-22,25%
Modelo 15	1106	844	-23,69%
Modelo 16	1154	900	-22,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 17 apresenta os resultados das RPM para a TEPE-01 com os perfis NACA selecionados, utilizando os difusores com as configurações de MFI.

**Tabela 17** - Valores das RPM nos difusores com MFI.

DIFUSOR	NACA 6409 (RPM)	NACA 1412 (RPM)	DIFERENÇA (%)
TEPE-01	980	742	-24,29%
Modelo 1	1265	998	-21,11%
Modelo 6 MFI-H	1233	948	-23,11
Modelo 6 MFI-V	1239	955	-22,91
Modelo 6 MFI-SC	1328	1048	-21,08
Modelo 11 MFI-H	1221	929	-23,91
Modelo 11 MFI-V	1216	918	-24,51
Modelo 11 MFI-SC	1248	960	-23,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 18 apresenta as variações percentuais do *start* rotacional dos difusores em relação a TEPE-01, utilizando os perfis NACA selecionados. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde aos valores da TEPE-01 sem difusor aplicado e o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1. A tabela mostra o quanto os difusores reduziram a velocidade necessária para rotacionar em relação a TEPE-01, os valores em parênteses mostram essa redução de velocidade em relação ao difusor Modelo 1. A tabela apresenta os valores de difusores sem as configurações de MFI.

**Tabela 18** - Variação percentual das RPM nos difusores sem MFI. (continua)

DIFUSOR	NACA 6409 (%)	NACA 1412 (%)
TEPE-01	980 RPM	742 RPM
Modelo 1	+29,08 (1265 RPM)	+34,50 (998 RPM)
Modelo 2	+30,70 (+1,26)	+36,66 (+1,60)
Modelo 3	+22,24 (-5,30)	+24,26 (-7,62)
Modelo 5	+36,53 (+5,77)	+39,02 (+3,40)
Modelo 6	+39,48 (+8,06)	+42,18 (+5,71)
Modelo 7	+37,65 (+6,64)	+39,62 (+3,81)

**Tabela 19** - Variação percentual das RPM nos difusores sem MFI. (conclusão)

DIFUSOR	NACA 6409 (%)	NACA 1412 (%)
<b>Modelo 8</b>	+38,37 ( <b>+7,19</b> )	+38,17 ( <b>+2,71</b> )
<b>Modelo 11</b>	+31,63 ( <b>+1,98</b> )	+35,18 ( <b>+0,50</b> )
<b>Modelo 15</b>	+12,86 ( <b>-12,57</b> )	+13,75 ( <b>-15,43</b> )
<b>Modelo 16</b>	+17,76 ( <b>-8,77</b> )	+21,29 ( <b>-9,82</b> )

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 19 apresenta as variações percentuais do *start* rotacional dos difusores em relação a TEPE-01, utilizando os perfis NACA selecionados. O primeiro valor apresentado pela tabela corresponde aos valores da TEPE-01 sem difusor aplicado e o segundo valor corresponde ao difusor Modelo 1. A tabela mostra o quanto os difusores reduziram a velocidade necessária para rotacionar em relação a TEPE-01, os valores em parênteses mostram essa redução de velocidade em relação ao difusor Modelo 1. A tabela apresenta os valores de difusores com as configurações de MFI.

**Tabela 20** - Variação percentual das RPM nos difusores com MFI.

DIFUSOR	NACA 6409 (%)	NACA 1412 (%)
<b>TEPE-01</b>	<b>980 RPM</b>	<b>742 RPM</b>
<b>Modelo 1</b>	<b>+29,08 (1265 RPM)</b>	<b>+34,50 (998 RPM)</b>
<b>Modelo 6 MFI-H</b>	25,72 ( <b>-2,53</b> )	25,82 ( <b>-5,01</b> )
<b>Modelo 6 MFI-V</b>	26,43 ( <b>-2,06</b> )	26,43 ( <b>-4,31</b> )
<b>Modelo 6 MFI-SC</b>	35,51 ( <b>+4,97</b> )	35,51 ( <b>+5,01</b> )
<b>Modelo 11 MFI-H</b>	24,59 ( <b>-3,47</b> )	24,59 ( <b>-6,90</b> )
<b>Modelo 11 MFI-V</b>	24,08 ( <b>-3,86</b> )	24,08 ( <b>-8,02</b> )
<b>Modelo 11 MFI-SC</b>	27,35 ( <b>-1,34</b> )	27,35 ( <b>-3,81</b> )

Fonte: Elaborado pelo autor.

No próximo tópico apresenta-se uma análise e discussão dos resultados apresentados.

#### 4.14.3. Discussão dos resultados

Os resultados apresentados mostram que, dentre as geometrias sem as configurações de MFI aplicadas, os difusores Modelo 6 e 8 tiveram os melhores resultados no *start* rotacional nas duas situações com perfis NACA diferentes. Dentre os difusores com uma geometria majoritariamente cilíndrica, destaca-se o Modelo 11 que apresentou menor *start* rotacional.

O *start* rotacional com perfil NACA 6409 foi menor do que com o perfil NACA 1412, isso deve-se por causa do perfil NACA 6409 ser assimétrico do tipo côncavo-convexo, o que o torna um excelente perfil aerodinâmico para baixas velocidades de vento, pois permite uma maior sustentação. Já o perfil NACA 1412 é um perfil semi-simétrico, excelente para aplicações em velocidades de vento maiores, pois sua semi-simetria exige velocidades maiores para a sustentação. A variação percentual relativa à diferença de performance entre os dois perfis NACA oscila na faixa dos 25%, ficando a menor variação em 21,05% (Modelo 15) e maior variação em 28,57% (Modelo 5).

Em relação a TEPE-01 sem o uso de difusor, houve uma redução do *start* rotacional em 50% com os Modelos 6 e 8 com perfil NACA 6409. Com o uso do perfil NACA 1412, a redução do *start* rotacional foi de 48,15% com os mesmo modelos de difusores. Dentre os perfis de geometria cilíndrica o Modelo 11 teve melhores resultados reduzindo em 45,45% (NACA 6409) e 44,44% (NACA 1412) a velocidade de vento necessária para rotacionar a TEPE-01.

Em relação ao Modelo 1 de Ohya *et al.* (2010), a redução do *start* rotacional foi de 31,25% com os Modelos 6 e 8 com perfil NACA 6409. Com o uso do perfil NACA 1412, a redução foi de 30% com os mesmo modelos de difusores. Dentre os perfis de geometria cilíndrica o Modelo 11 teve melhores resultados reduzindo em 25,00%, nos dois perfis NACA, a velocidade de vento necessária para rotacionar a TEPE-01

Em relação aos difusores com as configurações MFI aplicadas, os resultados mostram que no *start* rotacional os Modelo 6 MFI-SC e Modelo 11 MFI-SC foram os mais eficientes em reduzir a velocidade do *start* rotacional. Com relação a variação percentual na performance dos dois perfis NACA com difusores com MFI aplicado, a

diferença ficou na faixa dos 29%, ficando a menor variação em 25,00% (Modelo 6 MFI-H e Modelo 11 MFI-H) e maior variação em 33,33% (Modelo 6 MFI-SC).

A aplicação da configuração MFI-SC aumentou a eficiência do difusor em reduzir o *start* rotacional, se comparado com os modelos sem MFI-SC. No modelo 6 com MFI-SC aplicado, essa redução foi de 45,45%. Já no Modelo 11 a redução do *start* rotacional foi de 41,67%.

Os resultados relativos aos RPM mostraram que os Modelo 5, 6, 7 e 8 apresentaram os melhores resultados, ficando o Modelo 6 com o melhor resultado dentre todas as geometrias ensaiadas no túnel de vento. Todas esses difusores possuem ângulo semiaberto no plano de saída. O Modelo 11 teve um resultado em RPM pouco melhor que o difusor Modelo 1. O rendimento dos perfis NACA 6409 foi superior ao perfil NACA 1412.

Na variação percentual de performance em relação a TEPE-01, o Modelo 6 teve 39,48% mais RPM, seguido pelo Modelo 8 que teve 38,37%. A geometria desses dois Modelo é muito similar, diferenciando-se por ter o Modelo 6 uma seção cilíndrica menor e uma área de saída maior que o Modelo 8. O Modelo que teve significativos resultados no *start* rotacional, apresentou um rendimento 31,63% maior nas RPM.

Em relação ao Modelo 1 de Ohya *et al.* (2010) o Modelo 6 apresentou um rendimento 8,06% maior nas RPM, seguida pelo Modelo 8, que apresentou um rendimento 7,19% maior nas RPM. Os Modelos 3, 15 e 16 tiveram um resultado nas RPM menor que o Modelo 1, ficando respectivamente as RPM -5,30% (Modelo 3), -12,57% (Modelo 15) e -8,77% (Modelo 16) abaixo do valor do Modelo 1 de referência.

Em relação a TEPE-01 nos difusores com configurações do MFI aplicadas, o Modelo 6 com MFI-SC apresentou o melhor resultado, com um aumento de 35,51% nas RPM. O difusor Modelo 11 apresentou um ganho de 27,35% nas RPM.

Em relação ao Modelo 1, todos os difusores, com exceção do Modelo 6 com MFI-SC, tiveram redução nas RPM. O Modelo 6 com MFI-SC teve um aumento de 4,97 nas RPM.

Todos os modelos de difusores com alguma configuração de MFI aplicaram tiveram uma redução nas RPM, se comparados com os resultados obtidos pelos difusores que serviram de base (Modelos 6 e 11). A aplicação de uma configuração MFI nos difusores teve um melhor resultado no *start* rotacional, nas RPM sua contribuição para o rendimento da turbina eólica foi pouco relevante.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta desta pesquisa visou desenvolver um difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de eixo horizontal de pequena escala, manipulando sua geometria formal para melhorar o seu *start* rotacional em situações de ventos de baixa velocidades e turbulentos. Desta forma, procurou-se integrar ferramentas computacionais de simulação, através do uso de um software de túnel de vento virtual, testes experimentais com o uso de um túnel de vento tradicional, para que a combinação destas técnicas de análise e coleta de dados auxiliassem o processo de design de um difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de pequena escala.

O desenvolvimento de difusores para turbinas eólicas de pequena escala tem se mostrado ainda incipiente, com as pesquisas mais relevantes no tema desenvolvidas pelos pesquisadores da Universidade de Kyushu no Japão, iniciadas pelo Prof. Yuji Ohya (OHYA, 2002, 2004, 2008, 2010). Este cenário dificultou inicialmente a busca de conhecimento sobre o tema, pois muitas das referências e literatura encontravam-se no idioma japonês. Nesta perspectiva, este trabalho demonstrou seu pioneirismo ao abordar o tema na área do design dentro da literatura científica nacional sobre o tema.

Este trabalho também buscou contribuir de forma relevante neste cenário, utilizando uma abordagem científica e projetual integradora com diferentes “tipos de design”, como o *engineering design* (engenharia de produto, ou simplesmente, engenharia) e o *industrial design* (design industrial, ou simplesmente, design), o que confere a este trabalho um caráter inovador.

O desenvolvimento de uma área construtiva padrão para a geometria de um difusor, permitiu dar mais controle e precisão projetual ao processo de design de um difusor compacto para uma turbina eólica de pequena escala. Essa área construtiva padrão buscou estabelecer parâmetros de fácil entendimento, possibilitando desenvolver e reproduzir de forma muito precisa os difusores desenvolvidos neste estudo.

A área construtiva foi poderá ser utilizada como ponto de partida para o desenvolvimento de novas geometrias de difusores ou modelo de referência para a construção de difusores. A área construtiva padrão restringe-se ao design de difusores compactos para turbinas eólicas de pequena escala, porém a estrutura dos parâmetros de configuração pode servir de inspiração para se criar uma área construtiva para outros tipos de difusores.

O processo metodológico estabelecido para este estudo, com a utilização de análises por simulação computacional por meio de *software* de túnel de túnel de vento virtual, aliado à experimentos em túnel de vento, mostrou satisfatório para a validação das geometrias para difusores desenvolvidas. O *software* de túnel de vento virtual Autodesk Flow Design mostrou-se muito apropriado para a avaliação rápida e seleção das geometrias de difusores desenvolvidas. Isso permitiu um ganho de tempo projetual, pois definiu as geometrias que passariam para o demorado processo de prototipagem em impressora 3D e os ensaios experimentais em túnel de vento.

Sua facilidade de uso permitiu explorar rapidamente as geometrias dos difusores em diferentes condições, o que permitiu obter resultados e *insights* projetuais rápidos, mostrando os resultados em tempo real. Esse *software* mostra-se muito promissor para a área do design em projetos que envolva a simulação, visualização e avaliação do escoamento de ar em torno de edifícios, veículos, edifícios, produtos de consumo e outros objetos.

Uma das dificuldades encontradas no uso do *software* de túnel de vento virtual deve-se às suas limitações quanto a complexidade das simulações que ele realiza, pois ele apresenta opções básicas de informações e configurações. Isso deve-se a sua característica de ser um software focado e análises rápidas de escoamento de fluídos, sem as complexas configurações e cálculos que um software completo de CFD dispõe. Essas limitações não comprometeram o presente estudo, mas devem ser consideradas e analisadas em outros estudo que disponham-se a utilizar este software.

Os ensaios experimentais em túnel de vento forma importantes para avaliar a precisão das simulações em túnel de vento virtual e validar estes resultados. Os ensaios experimentais em túnel de vento foram indispensáveis para a avaliação

dinâmica dos difusores, pois a simulação por CFD no túnel de vento virtual não permite simulações mais complexas. A principal contribuição dos ensaios experimentais em túnel de vento é possibilitar condições experimentais mais próximas a uma situação real, pois as soluções CFD mais robustas e avançadas são de caras e de difícil acesso.

Em relação ao objetivo principal do trabalho, acredita-se que tenha sido cumprido, pois foram desenvolvidos vinte modelos de geometrias de difusores, sendo um modelo de referência baseado no proposto por Ohya *et al.* (2010) e dezenove alternativas desenvolvidas a partir deste modelo de referência. Foram desenvolvidas três tipologias formais de geometrias:

- 4) Geometrias de Ângulo Semiaberto: modelos 5, 6, 7, 8 e 9;
- 5) Geometrias Cilíndricas: modelos 3, 4, 11, 12, 13, 14, 15 e 16;
- 6) Geometrias Híbridas: modelos 2, 10, 17 e 18.

Em relação as geometrias de difusores desenvolvidas, os resultados mostraram que a manipulação da geometria é um caminho promissor no desenvolvimento de difusores pra turbinas eólicas, pois uma pequena variação na sua forma produz comportamentos aerodinâmicos bem distintos.

A geometria Modelo 6 teve os melhores resultados nas simulações em túnel de vento virtual e nos ensaios em túnel de vento físico. Seus resultados foram melhores que o Modelo 1 de referência utilizado, tanto na redução da velocidade do *start* rotacional, quanto nas RPM. O Modelo 6 e o Modelo 8 tem geometria muito similar, seus resultados foram muito parecidos, tendo o Modelo 6 alcançado melhores resultados nas RPM.

As geometrias de difusor com ângulo semiaberto produzem máximas de baixa pressão melhores que todas as outras geometrias, mas a zona de vórtices não é tão proeminente quanto a verificada no Modelo 11. Essa geometria é ideal para aplicações onde se busca uma melhor performance nas RPM, ficando com a geometria Modelo 6 os melhores resultados.

O Modelo 11 apresentou nas simulações uma zona de vórtices de baixa pressão no plano de saída do difusor muito proeminente. Esta zona de vórtices sinalizava que a geometria poderia apresentar um resultado promissor no *start*

rotacional, apesar de os resultados na simulação de pressão serem próximos ao Modelo 1 de referência.

Nos ensaios em túnel de vento, onde verificou-se o comportamento dinâmico da turbina eólica com o difusor acoplado verificou-se um desempenho significativo no *start* rotacional, ficando o resultado atrás apenas dos Modelo 6 e 8, mas se levar em consideração que a geometria do Modelo 11 produziu um proeminente zona de baixa pressão no plano de saída do difusor e que teve máximas de alta e baixa pressão menores que os Modelos 6 e 8, deduz-se que essa geometria teve uma performance altamente satisfatória no *start* rotacional.

Nas RPM essa geometria não produziu resultados significativos, ficando seus resultados nesse aspecto abaixo do Modelo 1 de referência.

As simulações nas geometrias Modelo 15 e 16 mostraram anomalias no plano de saída dessas geometrias, com zonas de vórtices bem proeminentes, porém as geometrias produziam zonas de baixa pressão muito fracas, se comparadas com o Modelo 1 de referência. Nesse sentido aprofundou-se o estudo daquela estrutura adicional na produção dessas anomalias e desenvolver uma nova abordagem no design das geometrias de difusores, desenvolvendo uma estrutura compacta que separava o fluxo no plano de saída do difusor, ocasionado uma grande área de baixa pressão. Denominou-se de microseparador de fluxo interno (MFI). Essa configuração MFI contribuiu para a melhorar performance do difusor e acelerar o escoamento de ar pela turbina eólica.

As configurações de MFI aplicadas nos modelos 6 e 11 mostraram que em todas houve a produção de uma grande área de baixa pressão no plano de saída do difusor, porém a posição do MFI impactava negativamente na zona de baixa pressão no plano de entrada do difusor, o que é importante para o efeito aerodinâmico de aceleração do vento.

A configuração MFI com perfil semi-circular foi a que apresentou os melhores resultados. Essa configuração potencializou as zonas de baixa pressão das geometrias dos Modelo 6 e 11 e impactou significativamente no *start* rotacional em mais de 30% em relação ao Modelo 6 e mais de 20% em relação ao Modelo 11. Um

aspecto negativo da configuração MFI é que ela reduz a performance das RPM, o que mostra que o MFI é uma configuração ideal para turbinas orientadas para redução do *start* rotacional.

Verificou-se nos ensaios em túnel de vento físico que um difusor com determinada geometria pode ter performances diferentes no *start* rotacional e nas RPM. O Modelo 11 foi um caso em que verificou-se uma velocidade muito reduzida no *start* rotacional, mas nos resultados das RPM sua performance foi apenas regular, ficando um pouco melhor que os valores das RPM encontrados nos Modelo 1. Essa diferença nos resultados encontrados sugerem que uma geometria pode ter uma curva de eficiência dependendo da velocidade do vento a qual é submetida, ou seja, uma determinada velocidade de vento pode ser ideal para o *start* rotacional, mas prejudicial quanto se deseja a otimização das RPM.

Os resultados encontrados neste estudo indicam a tendência dos difusores de ângulo semiaberto serem ideais para aplicações onde deseja-se maximizar as RPM e os difusores de seção cilíndrica são mais indicados para aplicações onde busca-se o *start* rotacional em baixas velocidades de vento.

Este trabalho avaliou os difusores sobre determinadas condições, como por exemplo, em escala reduzida, com difusores prototipados em impressoras 3D e em uma turbina eólica de pequena escala, com diâmetro de rotor de 142 mm. Não foram feitos neste estudo simulações ou ensaios com difusores desenvolvidos em diferentes escalas e/ou com diferentes materiais. A utilização de diferentes materiais e escalas pode contribuir trazendo resultados diferenciados dos encontrados neste estudo, aprofundando o conhecimento sobre difusores compactos para turbina eólica de pequena escala.

Por fim, estabelece-se como soluções finais para o problema de pesquisa apresentado, as geometrias de difusores Modelo 6 e Modelo 11 como alternativas finais e suas respectivas variantes com a aplicação de uma configuração de MFI de perfil semi-circular. As definições finais dessas geometrias de difusores são apresentadas a seguir.

## 5.1. DIFUSORES FINAIS SELECIONADOS

A partir das considerações sobre os resultados da pesquisa, definiu-se os difusores Modelo 6 (**Difusor Compacto-Flangeado de ângulo Semiaberto**) e Modelo 11 (**Difusor Compacto-flangeado Cilíndrico**) como as soluções finais que atendem as especificações estipuladas por esta pesquisa.

O apêndice E apresenta as configurações completas do difusor compacto-flangeado de ângulo semiaberto final recomendado por esta pesquisa.

O apêndice F apresenta as configurações completas do difusor compacto-flangeado cilíndrico final recomendado por esta pesquisa.

Em relação ao microseparador de fluxo interno (MFI), selecionou-se o MFI de perfil semicircular como a opção de MFI padrão a ser adotada nos difusores finais selecionados. O apêndice G apresenta as configurações finais completas do microseparador de fluxo interno (MFI).

O apêndice H apresenta as especificações finais do Difusor Compacto-Flangeado de Ângulo Semiaberto final com a configuração MFI padrão aplicada.

O apêndice I apresenta as especificações finais do Difusor compacto-flangeado Cilíndrico final com a configuração MFI padrão aplicada.

## 5.2. PRODUÇÃO ACADÊMICA E CIENTÍFICA COMPLEMENTAR

Foi realizado junto a Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico (SEDETEC) da UFRGS, órgão da universidade responsável pelos assuntos relativos à propriedade intelectual e transferência de tecnologia, envolvendo a interação da Universidade com Empresas e Instituições Públicas, dois pedidos de depósito de patente na categoria Pedido Nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT, cujo registro no INPI apresentam-se a seguir:

- 1) Difusor para Turbina Eólica e Turbina Eólica (**BR 10 2017 025922-6**);
- 2) Difusor para Turbina Eólica e Turbina Eólica (**BR 10 2017 025920-0**).

Foi realizado também o Pedido de Registro de Desenho Industrial de quatro geometrias de difusores desenvolvidas nesta pesquisa, cujo registro no INPI apresentam-se a seguir:

- 1) Configuração aplicada a/em Turbina Eólica (**BR 30 2017 005705-5**);
- 2) Configuração aplicada a/em Turbina Eólica (**BR 30 2017 005707-1**);
- 3) Configuração aplicada a/em Turbina Eólica (**BR 30 2017 005709-8**);
- 4) Configuração aplicada a/em Turbina Eólica (**BR 30 2018 000629-1**).

O presente trabalho foi submetido para avaliação no “*Journal Renewable Energy*” classificação Qualis CAPES “A1”.

### 5.3. CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA

Uma das contribuições deste estudo consistiu em mostrar empiricamente que, a manipulação da geometria de um difusor pode proporcionar melhoria na sua performance, o que permitiu desenvolver difusores para situações específicas, como por exemplo, difusores para turbinas eólicas otimizados para rotacionar com a menor velocidade de vento disponível.

Outra contribuição deste estudo foi, com teor de ineditismo, propor métodos de design para difusores, visto que os principais estudos sobre difusores (FOREMAN *et al.*, 1978; IGRA, 1977, 1981; ABE; OHYA, 2004; ABE *et al.*, 2005; MATSUSHIMA *et al.*, 2006; OHYA *et al.*, 2008, 2010) se preocuparam em mostrar e explicar o fenômeno aerodinâmico e suas implicações, mas sem especificar relações e padrões de projeção para os difusores pesquisados.

A pesquisa também contribui como uma solução disponível para o desenvolvimentos de soluções em energia eólica de baixo custo sem exigir condições climáticas e geográficas especiais para trabalhar eficazmente, como por exemplo, ambientes urbanos com regime de ventos instáveis e turbulentos. A pesquisa também contribui como solução para o crescente interesse no desenvolvimento de redes descentralizadas de micro e minigeração de energia.

Por fim a contribuição e produção de informações técnico-científicas que vão auxiliar a área de design no projeto de turbinas eólicas de pequena escala.

#### 5.4. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Pesquisar o alcance da eficiência dos difusores em turbina eólicas *in loco*;
- Pesquisar formas de integração das micro turbinas no ambiente externo;
- Aplicar o conceito de difusor em turbinas verticais.

## 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>>.

ABRAMOVAY, Ricardo. A energia em poder do cidadão. In: GREENPEACE/EREC - GREENPEACE INTERNATIONAL/CONSELHO EUROPEU DE ENERGIA RENOVÁVEL. **[r]evolução energética: A caminho do desenvolvimento limpo (cenário brasileiro 2013)**. Brasil: Greenpeace/EREC, 2013

ACKERMANN, Thomas; SÖDER, Lennart. Wind energy technology and current status: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amsterdam, v. 4, n. 4, p. 315-374, 2000. DOI: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321\(00\)00004-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(00)00004-6)>

ADWEN - ADWEN OFFSHORE WIND ENERGY. **Adwen 8 MW Platform**. Disponível em: <<http://www.adwenoffshore.com/products-services/products/8-mw-turbines>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2016.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2002. 153 p.

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 de novembro de 2016.

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: 05/11/2016.

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 05/11/2016.

AUTODESK. **Autodesk Flow Design**: Virtual wind tunnel testing tools. Disponível em: <<http://www.autodesk.com/products/flow-design/>>. Acesso em 10 de janeiro de 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, J.B., RAW, W.H., POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. Wiley (1999). ISBN 9780471557746.

BERNOULLI, Daniel. Hydrodynamica (1738). In: GRATTAN-GUINNESS, Ivor (Ed.). **Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940**. Boston: Elsevier, 2005. Cap. 9, p. 131-142. ISBN: 9780444508713

BLESSMANN, Joaquim. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1998. 282 p.

\_\_\_\_\_. **Acidentes causados pelo vento**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2001. 141 p. ISBN 85-7025-621-3

BONSIEPE, Gui (Coord.). **Metodologia experimental**: desenho industrial. Brasília: CNPq, 1984. 86 p.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Decreto nº 5.025, de 30 de março de 2004. Regulamenta o inciso I e os §§ 1º, 2º, 3º, 4º e 5º do art. 3º da Lei no 10.438, de 26 de abril de 2002, no que dispõem sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, primeira etapa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, n. 62, seção 1, p. 1-4. Brasília, DF, 31 de março de 2004. ISSN 1677-7042 Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d5025.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5025.htm)>. Acesso em 10 de novembro de 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima. Comunicação nacional inicial do Brasil: à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. Brasília: [s.n.], 2004a. 274 p.

\_\_\_\_\_. Senado Federal. Subsecretaria de Edições Técnicas. Protocolo de Quioto e legislação correlata. Brasília: Subsecretaria de Edições Técnicas do Senado Federal, 2004b. v. 3 (Coleção Ambiental). 88 p.

BURTON, Tony; JENKINS, Nick; SHARPE; David, BOSSANYI, Ervin. **Wind Energy Handbook**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001, 642 p. ISBN-13: 978-0471489979

CÂNDIDO, L. H. A.; GARAY, M. L. S. Design de microturbina eólica: projeto do produto, prototipagem e ensaio funcional. In: IV International Conference on Design, Engineering, Management for innovation, 2015, Florianópolis, SC, Brasil. **Anais do IDEMi 2015**. Florianópolis, SC, Brasil: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2015. v. 1. p. 716-717.

CARDOSO, Rafael. **Design para um mundo complexo**. São Paulo: Cosac Naify, 2012. 264 p.

CATTAFESTA, Louis; BAHR, Chris; MATHEW, Jose. Fundamentals of Wind-Tunnel Design. In: **Encyclopedia of Aerospace Engineering**. United States: John Wiley, 2010. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1002/9780470686652.eae532>>

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada: Energia eólica**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, 2015.

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.

CLAUSEN, P. D.; WOOD, D. H.. Recent Advances in Small Wind Turbine Technology. **Wind Engineering**. Brentwood, v. 24, n. 3, p. 189-201, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/110.1260/0309524001495558>

CORIOLIS, G.G. Mémoire sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs des machines. **Journal de l'école Polytechnique**, v. 13, p. 268-302, 1832. ISSN: 2429-7100

CORIOLIS, G.G. Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps. **Journal de l'école Polytechnique**, v. 15, p. 142-154, 1835. ISSN: 2429-7100

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 Mecânica, 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

DAI, Kaoshan; BERGOT, Anthony; LIANG, Chao; XIANG, Wei-Ning; HUANG, Zhenhua. Environmental issues associated with wind energy – A review. **Renewable Energy**. Amsterdam, v. 75, p. 911-921, 2015. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>

DATE, Anil W. **Introduction to Computational Fluid Dynamics**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2005. 398 p. ISBN 978-0521853262

DUTRA, Ricardo (Org.). **Energia eólica: princípios e tecnologias**. Rio de Janeiro: CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, 2008.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília: Ministério de Minas e Energia - MME/EPE, 2014.

FLETCHER, Clive A.J.. Computational analysis of diffuser-augmented wind turbines. **Energy Conversion and Management**. New York, v. 21, Iss. 3, p. 175-183, 1981. DOI: <[http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90012-1](http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904(81)90012-1)>

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](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(78)90122-6)>.

GIANNINI, M.; DUTRA, R. M.; GUEDES, V. G. **Estudo Prospectivo do Mercado de Energia Eólica de Pequeno Porte no Brasil**. Brazil WindPower 2013 Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, 2013. 10 p.

GILBERT, B.L.; OMAN, R.A.; FOREMAN, K.M.. Fluid dynamics of diffuser-augmented wind turbines. **Journal of Energy**. Reston, v. 2, n. 6, p. 368-374, 1978. DOI: <<http://dx.doi.org/10.2514/3.47988>>.

GILBERT, B.L.; FOREMAN, K.M.. Experimental demonstration of the diffuser-augmented wind turbine concept. **Journal of Energy**. Reston, v. 3, n. 4, p. 235-240, 1979. DOI: <<http://dx.doi.org/10.2514/3.48002>>

\_\_\_\_\_. Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine. **Journal of Energy Resources Technology**. New York, v. 105, Iss. 1, p. 46-53, 1983. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.3230875>>.

GIPE, Paul. **Wind Energy Basics: A Guide to Home and Community Scale Wind-Energy Systems**. White River Junction: Chelsea Green Publishing Company, 2009. 192 p. ISBN: 978-1603580304

GÖLTENBOTT, U.; OHYA, Y.; YOSHIDA, S.; JAMIESON, P.. Flow interaction of diffuser augmented wind turbines. **Journal of Physics: Conference Series**, Volume 753, A. Aerodynamics and noise. Bristol, 2016. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/753/2/022038>>.

GOMES, Luiz Antônio Vidal de Negreiros. **Criatividade: projeto < desenho > produto**. 3. ed. Santa Maria, RS: sCHDs, 2004. 122 p. ISBN 85-88961-03-2

GREENPEACE – GREENPEACE INTERNATIONAL. **Energy [R]evolution: a sustainable world energy outlook 2015**. Amsterdam: Greenpeace, 2015.

GREENPEACE BR - GREENPEACE BRASIL. **[r]evolução energética: A caminho do desenvolvimento limpo**. São Paulo: Greenpeace/EREC, 2010.

\_\_\_\_\_. **[r]evolução energética: A caminho do desenvolvimento limpo (cenário brasileiro 2013)**. São Paulo: Greenpeace, 2013.

\_\_\_\_\_. **[r]evolução energética: Rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis**. São Paulo: Greenpeace, 2016.

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](http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/gwec-2006_final_01.pdf) >. Acesso em: 20 de janeiro de 2017.

HERBERT, G.M. Joselin; INIYAN, S.; SREEVALSAN, E.; RAJAPANDIAN, S. A review of wind energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. New York, v. 11, n. 3, p. 1117-1145, 2007. ISSN: 1364-0321.

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

IEA WIND. **Small wind annual report**. Colorado: PWT Communications, 2009.

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61400-2** - Wind turbines – Part 2: Small wind turbines. 3.0 ed. Genebra, 2013. 278 p. ISBN 978-2-8322-1284-4

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](http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904(81)90005-4)>.

\_\_\_\_\_. Research and development for shrouded wind turbines. **Energy Conversion and Management**. Great Britain, v. 21, Iss. 1, p. 13-48, 1981. DOI: <[http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90005-4](http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904(81)90005-4)>.

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>>.

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

KISHORE, Ravi Anant; COUDRON, Thibaud; PRIYA, Shashank. Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Oxford, v. 116, p. 21-31, 2013. ISSN: 0167-6105. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.01.010>>

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>

LEITÃO, Míriam. **História do Futuro: O horizonte do Brasil no século XXI**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2015.

LEUNG, Dennis Y. C.; YANG, Yuan. Wind energy development and its environmental impact: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amesterdan, v. 16, Iss. 1, p. 1031-1039, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.024>

LILLEY, G.M.; RAINBIRD, W.J.. A preliminary report on the design and performance of ducted windmills. **College of Aeronautics**. Cranfield, report n. 102, 1956. Disponível em: <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:d7e0a307-9e15-46d9-9972-621ba121881c>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2017.

LINACRE, E.; GEERTS, B. **Climates & Weather Explained**. London and New York: Routledge, 1997. ISBN-13: 978-0415125208 LINACRE; GEERTS, 1997

LIU, Yingyi; YOSHIDA, Shigeo. An extension of the Generalized Actuator Disc Theory for aerodynamic analysis of the diffuser-augmented wind turbines. **Journal of Energy**. Amsterdam, v. 93, part 2, p. 1852-1859, 2015. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.114> >

LÓPEZ, J. M. Escudero. **Manual de energía eólica**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2011. ISBN: 8484763633

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B.. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172008000100005>>

MATSUSHIMA, Toshio; TAKAGI, Shinya; MUROYAMA, Seiichi. Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser. **Renewable Energy**. United States, v. 31, Iss. 9, p. 1343-1354, 2006. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.07.008>>.

MEDEIROS, Ligia Maria Sampaio de. **Desenhística: a ciência da arte de projetar desenhando**. Santa Maria: sCHDs, 2004. 143 p. ISBN 85-88961-05-9

MORAES, Dijon de. **Metaprojeto: o design do design**. São Paulo: E. Blucher, 2010. 228 p. ISBN 978-85-212-0516-6

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)**. Brasília: MME, 2004. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/proinfa>>. Acesso em 15 de dezembro de 2016.

NÚÑEZ, Gustavo Javier Zani; LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M. . Uso do Túnel de Vento como Ferramenta de Projeto no Design Aerodinâmico. **Revista Design & Tecnologia**, v. 04, p. 10-23, 2012.

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>>

OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi; NAGAI, Tomoyuki; WATANABE, Koichi. Wind lens technology and its application to wind and water turbine and beyond. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**. United Kingdom, v. 2, n. 2, 2017. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1051/rees/2016022>>.

OKA, Nobuhito; FURUKAWA, Masato; KAWAMITSU, Kenta; YAMADA, Kazutoyo. **Optimum aerodynamic design for wind-lens turbine**. Journal of Fluid Science and Technology. Tokyo, v. 11, Iss. 2, p. JFST0011, 2016. DOI: <<https://doi.org/10.1299/jfst.2016jfst0011>>

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

OMAN, R.A.; FOREMAN, K.M.. Advantages of the diffuser-augmented wind turbine. NASA. **Lewis Research Center Wind Energy Conversion Systems**. United States, p. 103-106, 1973. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740008662>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2017.

OTEO - OBSERVATÓRIO TECNOLÓGICO PARA AS ENERGIAS OFFSHORE. **Tecnologias de aproveitamento offshore**. Porto: INEGI, 2014. Disponível em: <[http://oteco.inegi.up.pt/resources/358\\_3\\_relatorio\\_tecnico\\_17\\_dezembro.pdf](http://oteco.inegi.up.pt/resources/358_3_relatorio_tecnico_17_dezembro.pdf)>.

Acesso em: 20 de dezembro de 2016

PERSSON, A. How do we understand the Coriolis force? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, p. 1373-1385, 1998. ISSN: 0003-0007

PRODANOV, CC; FREITAS, Ed. **Metodologia do trabalho científico**. [Recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. Novo Hamburgo, RS: Feevale, 2013. ISBN: 9788577171583.

REN21 - RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21<sup>ST</sup> CENTURY. **Renewables 2016 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2016, 272 p. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>.

Acesso em: 20 de dezembro de 2016

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>>.

SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; ISLAM, M. R.; SOLANGI, K. H. Environmental impact of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amesterdan, v. 15, Iss. 5, p. 2423-2430, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>

SBCEI - SBC ENERGY INSTITUTE. **Leading the Energy Transition Factbook: Wind Power**. Puteaux: SBC Energy Institute, 2013. Disponível em <<http://www.sbcenergyinstitute.com/Publications/Wind>>. Acesso em: 15 de novembro de 2016

SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estududos Avançados**. São Paulo, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142013000100008>>

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

SMIL, Vaclav. **General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization**. New York: Wiley-Interscience, 1991, p. 369. ISBN-13: 978-0471629054

TAKAHASHI, Shuhei; HATA, Yuya; OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi; UCHIDA, Takanori. Behavior of the Blade Tip Vortices of a Wind Turbine Equipped with a Brimmed-Diffuser Shroud. **Energies**. Switzerland, v. 5, p. 5229-5242, 2012. ISSN 1996-1073. DOI: <<http://dx.doi.org/10.3390/en5125229>>

TWP - THE WIND POWER. **Osorio Wind Farm**. Disponível em: <[https://www.thewindpower.net/windfarm\\_en\\_4096\\_osorio.php](https://www.thewindpower.net/windfarm_en_4096_osorio.php)>. Acesso em: 20 mai 2018.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema eólica de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2009.

TONG, Wei (Ed.). **Wind Power Generation and Wind Turbine Design**. Southampton: WIT Press, 2010. ISBN: 978-1-84564-205-1

TOSHIMITSU, Kazuhiko; KIKUGAWA, Hironori; SATO, Kohei; SATO, Takuya. Experimental Investigation of Performance of the Wind Turbine with the Flanged-Diffuser Shroud in Sinusoidally Oscillating and Fluctuating Velocity Flows. **Open Journal of Fluid Dynamics**. United States, v. 2, n. 4A, p. 215-221, 2012. DOI: <<http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2012.24A024>>.

TUMMALA, Abhishiktha; VELAMATI, Ratna Kishore; SINHA, Dipankur Kumar; INDRAJA, V.; KRISHNA, V. Hari. A review on small scale wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amsterdam, v. 56, p. 1351-1371, abril 2016. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>>.

TURNER, Jenna. In the Studio: An Ant and a Tiny Wind Turbine. In: NATGEO - National Geographic. **Proof: The Stories Behind the Photographs**. Jun. 2014. Disponível em: <<http://proof.nationalgeographic.com/2014/06/19/in-the-studio-an-ant-and-a-tiny-wind-turbine/>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2016.

UIUC - University of Illinois at Urbana-Champaign. **UIUC Airfoil Data Site**. Disponível em: <[http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html](http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html)>. Acesso em: 20 de dezembro de 2016.

UNCED - UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Rio Declaration on Environment and Development (A/CONF.151/26 - Vol. I)**. Rio de Janeiro, 1992a. Disponível em <<http://www.un-documents.net/rio-dec.htm>>. Acesso em: 15 de novembro de 2016

UNCED - UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Agenda 21 (A/CONF.151/26 - Vol. I)**. Rio de Janeiro, 1992b. Disponível em <<http://www.un-documents.net/agenda21.htm>>. Acesso em: 15 de novembro de 2016

UNCHE - UNITED NATIONS CONFERENCE ON THE HUMAN ENVIRONMENT. **Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment (A/CONF/48/14/Rev.1)**. Estocolmo, Suécia, 1972. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/unche.htm>>. Acesso em: 15 de novembro de 2016

UNCSD - UNITED NATIONS CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Rio+20 Outcome Document: Future We Want (A/RES/66/288)**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/rio20/futurewewant>>. Acesso em: 15 de novembro de 2016

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Kyoto Protocol**. Kyoto, 1997. Disponível em: <[https://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](https://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php)>. Acesso em: 15 de novembro de 2016

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **21<sup>st</sup> Conference of the Parties to the UNFCCC (COP21)**. Paris, 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>>. Acesso em: 16 de novembro de 2016

UN - UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs - Statistics Division. **2013 Energy Statistics Yearbook**. New York: United Nations Publication, 2013. ISBN: 978-92-1-161606-4.

UTA - THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON. **Technology uses micro-windmills to recharge cell phones**. The University of Texas at Arlington, jan. 2014. Disponível em: <<https://www.uta.edu/news/releases/2014/01/microwindmill-rao-chiao.php>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2016

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

WANG, F.; BAI, L.; FLETCHER, J.; WHITEFORD, J.; CULLEN, D.. The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 96, n. 1, p. 01-24, 2008. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2007.03.004>>

WANG, Shifeng; WANG, Sicong. Impacts of wind energy on environment: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amsterdam, v. 49, p. 437-443, 2015. ISSN: 1364-0321. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.137>>

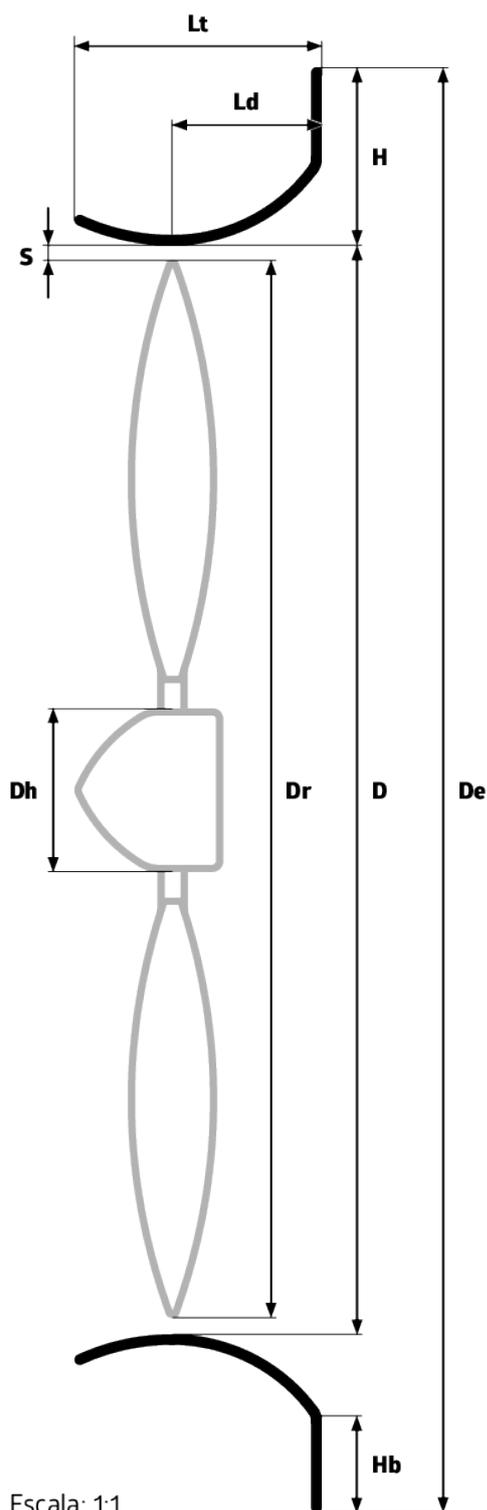
WOBLEN – WOBLEN WINDPOWER/ENERCOM. **WOBLEN E-70 E4 / 2.300 KW**. Disponível em: <<http://www.woblen.com.br/produtos/importados/e-70-e4-2300-kw/>>. Acesso em: 10 de maio de 2018

WWF-BRASIL. **Desafios e Oportunidades para a energia eólica no Brasil: recomendações para políticas públicas**. Brasília: WWF-BRASIL, 2015. Disponível em: <<http://data.novo.gessulli.com.br/file/2015/09/10/E142912-F00001-U138.pdf>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2017

## APÊNDICE A

### DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO (WIND-LENS)

Desenhos e dimensionamentos.



**Parâmetros e dimensões.**

PARÂMETRO		VALOR
Diâmetro externo do difusor	<b>De</b>	<b>194 mm</b>
Diâmetro interno do difusor	<b>D</b>	<b>146 mm</b>
Diâmetro do rotor	<b>Dr</b>	<b>142 mm</b>
Diâmetro da nacele	<b>Dh</b>	<b>22 mm</b>
Comprimento total	<b>Lt</b>	<b>33 mm</b>
Comprimento do difusor	<b>Ld</b>	<b>20 mm</b>
Altura do difusor	<b>H</b>	<b>24 mm</b>
Altura do flange	<b>Hb</b>	<b>13,3 mm</b>
Afastamento da ponta	<b>S</b>	<b>2 mm</b>

#### **Observações Importantes.**

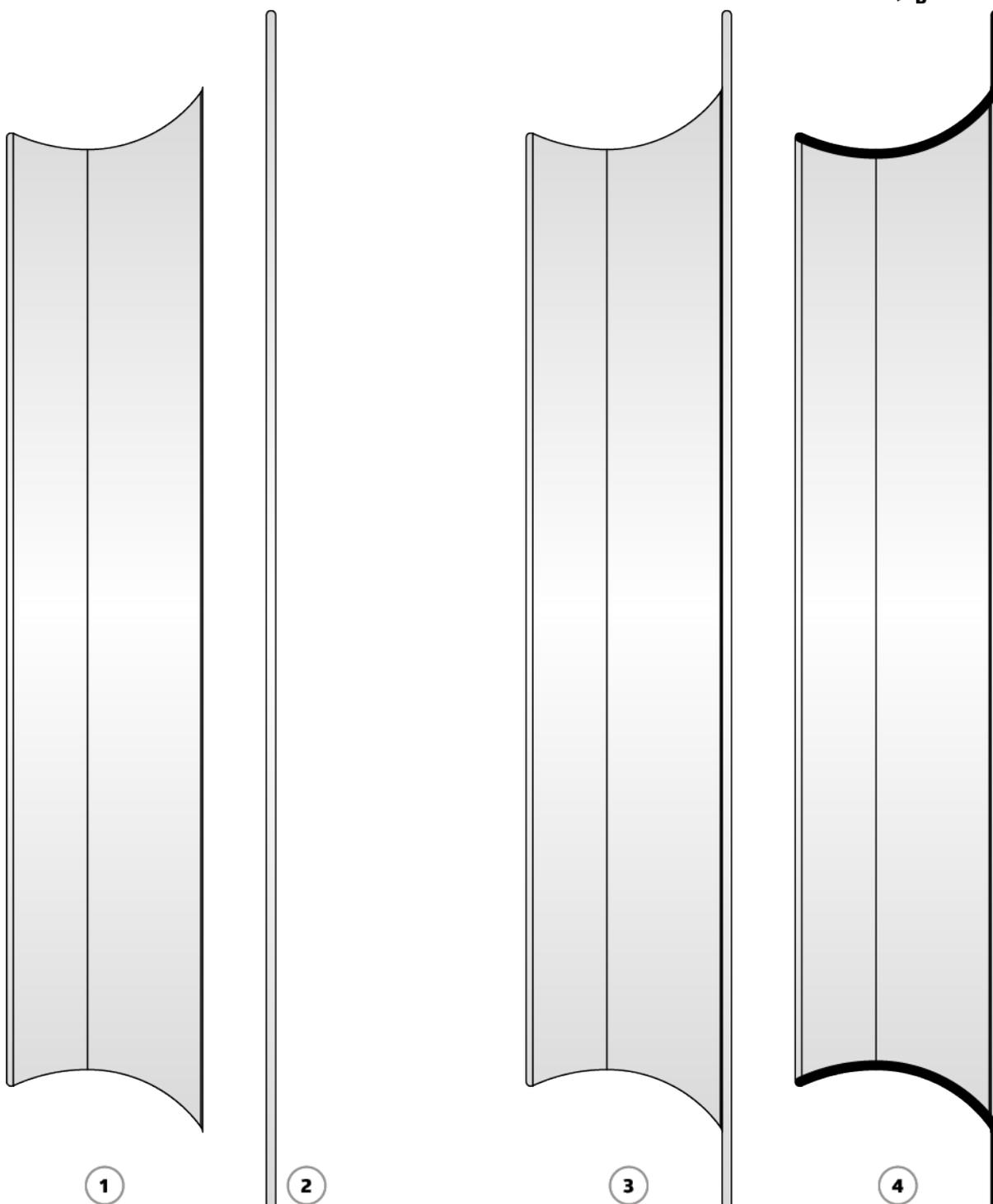
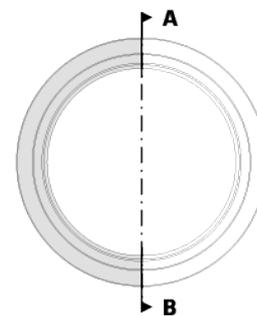
Os parâmetros e dimensões do difusor compacto-flangeado (*Wind-Lens*) foram baseados no modelo utilizado por Takahashi et al. (2012). O difusor *Wind-Lens* original foi desenvolvido por Ohya et al. (2010).

**APÊNDICE A****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO (WIND-LENS)**

Partes construtivas e corte transversal

**1 - Curva ciclóide (concentrador/difusor)****3 - Flange****4 - Vista lateral****5 - Corte A-B**

Escala: 1:1

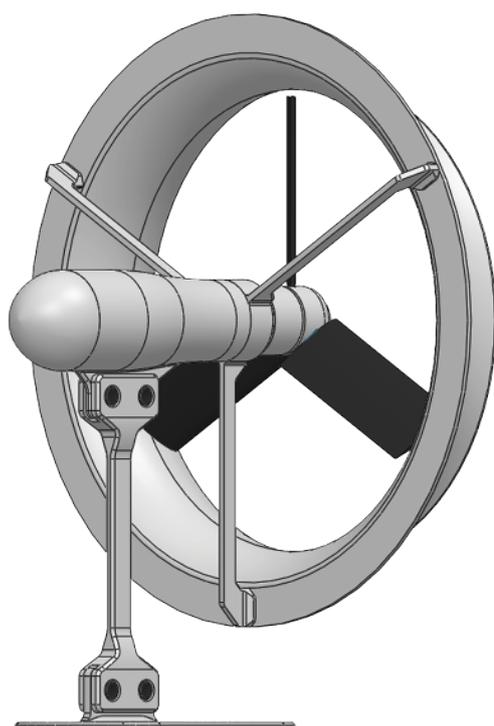
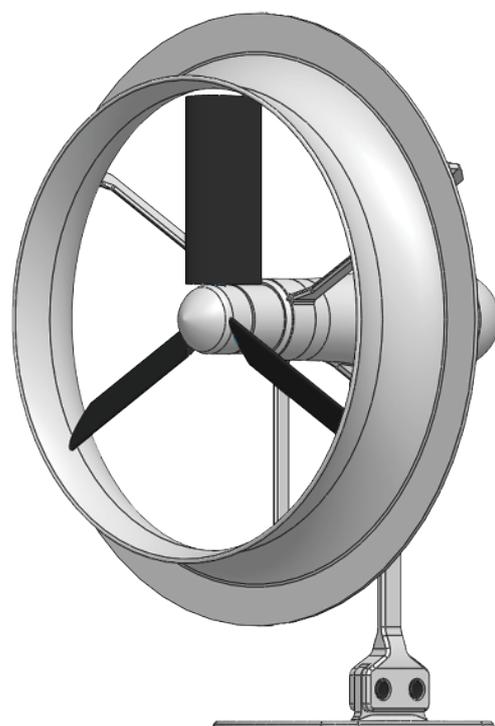


**APÊNDICE A****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO (WIND-LENS)**

Vistas projetivas aplicadas.

**VISTA PERSPECTIVA FRONTAL**

Difusor acoplado em uma turbina eólica de pequena escala

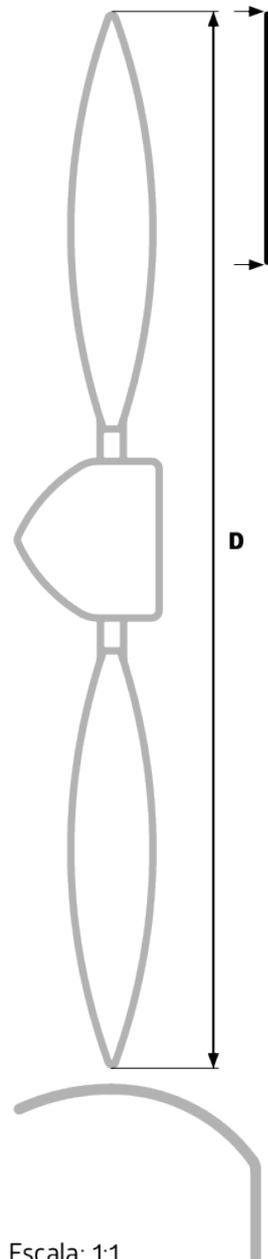
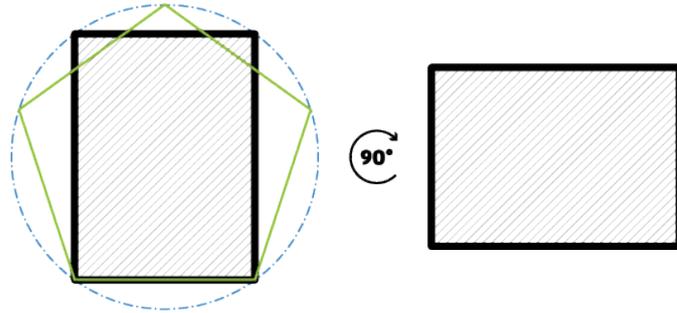
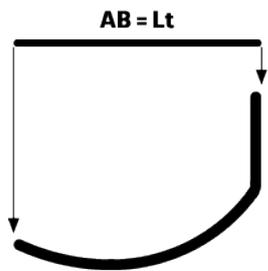
**VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR**

Difusor acoplado em uma turbina eólica de pequena escala

**APÊNDICE B**  
**RETÂNGULO HARMÔNICO PENTON**

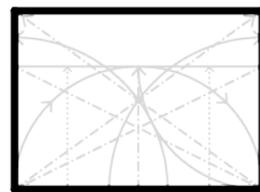
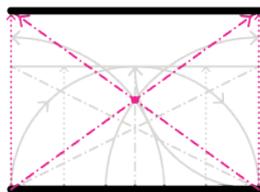
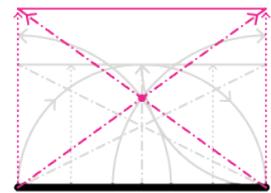
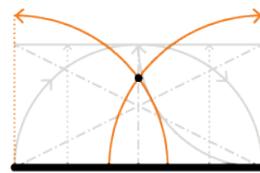
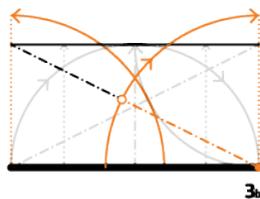
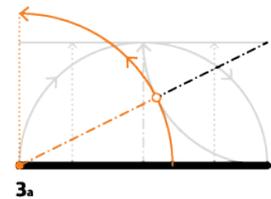
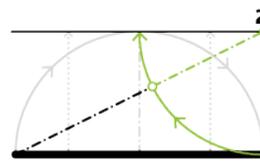
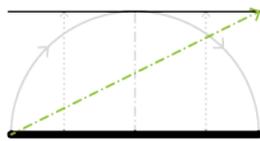
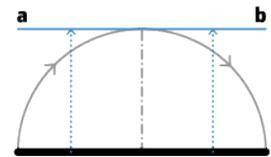
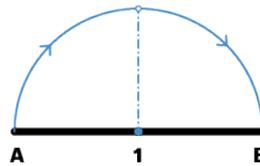
Retângulo harmônico - Seção AB

Retângulo harmônico: **Penton = 1,376 - 0,727**



**Construção do Retângulo**  
 Posição horizontal

Seção AB  
**AB = 22,5% - 23,5% de D**



**A B**

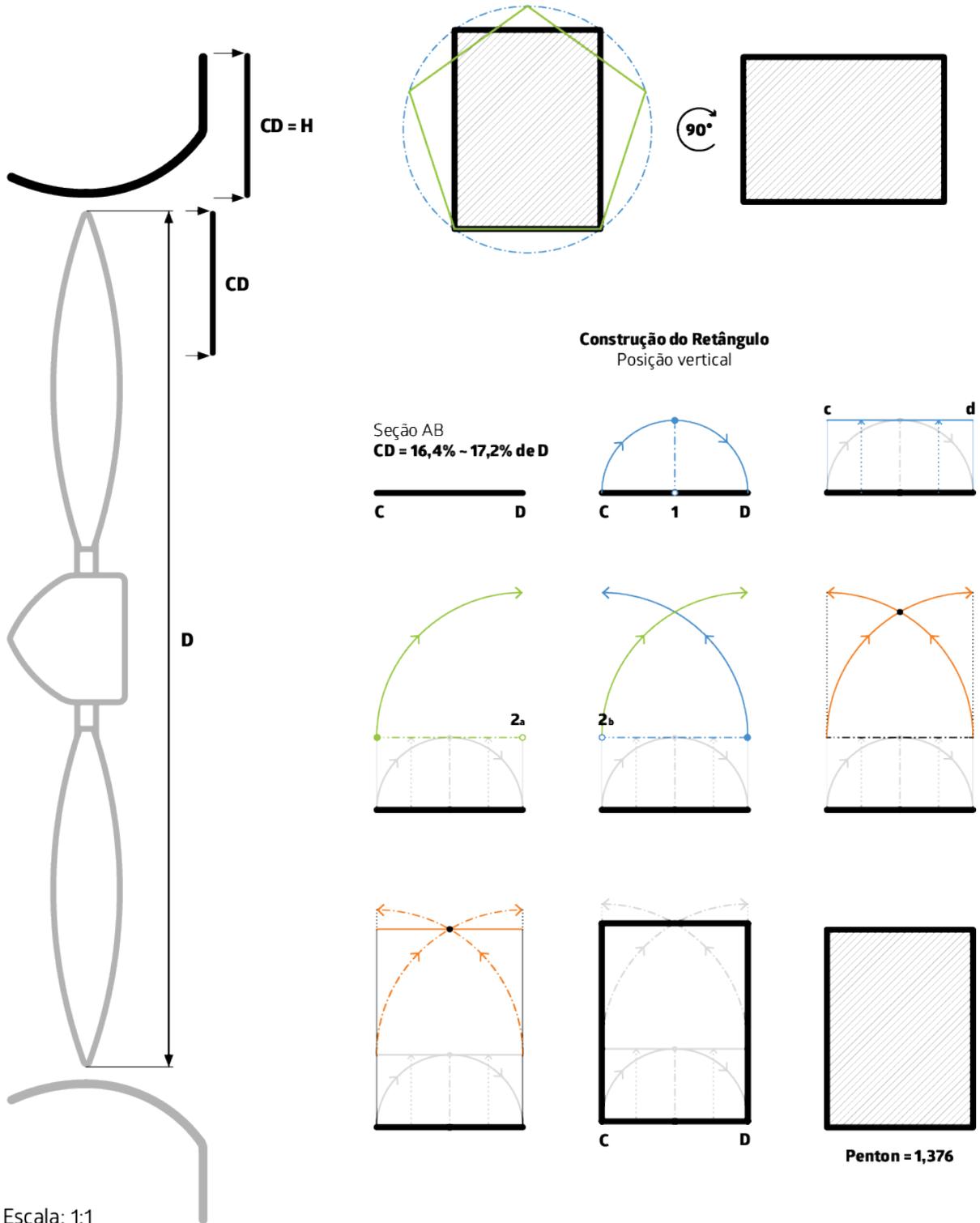
**Penton = 0,727**

Escala: 1:1

**APÊNDICE B**  
**RETÂNGULO HARMÔNICO PENTON**

Retângulo harmônico - Seção CD

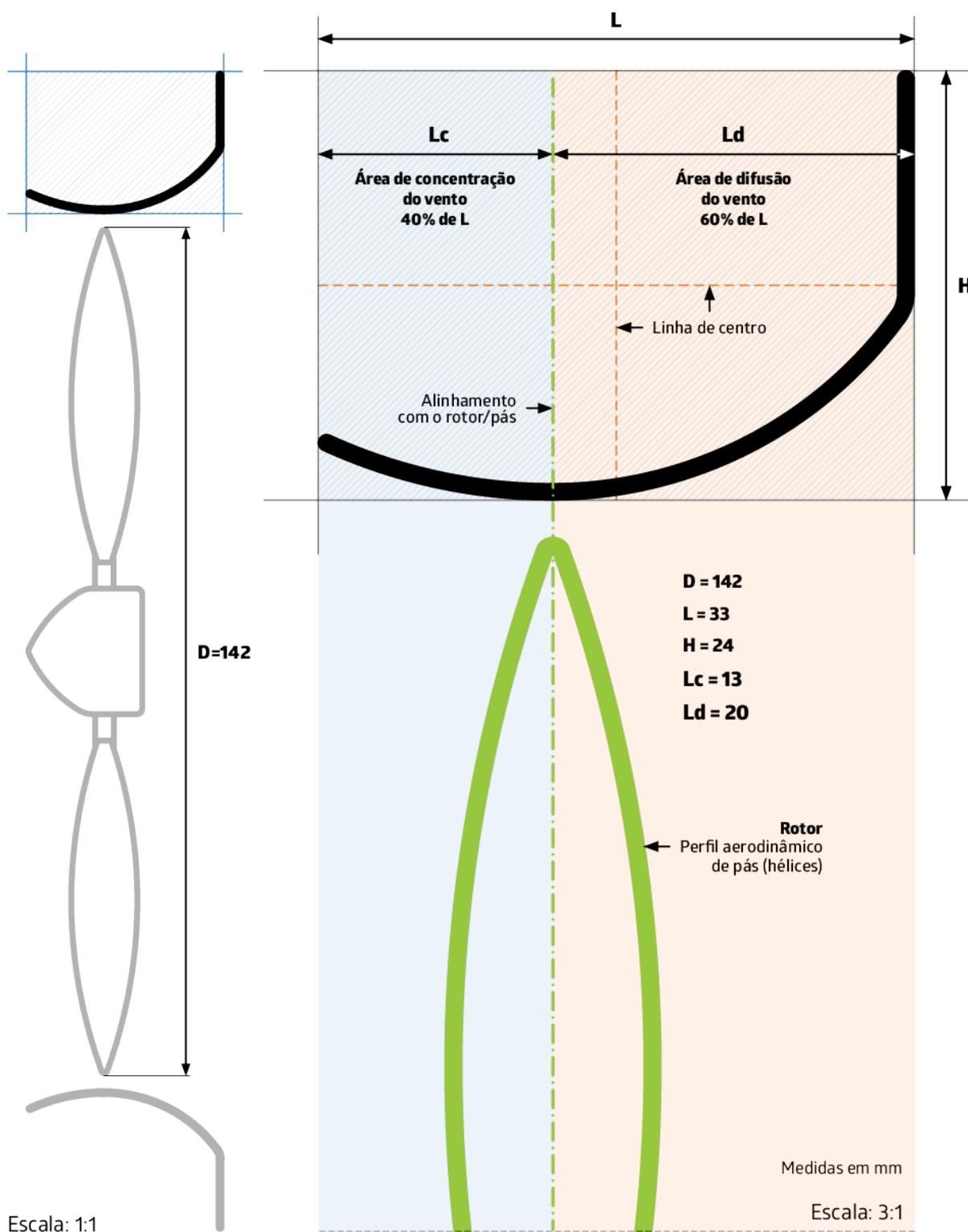
Retângulo harmônico: **Penton = 1,376 - 0,727**



## APÊNDICE C

### ÁREA CONSTRUTIVA PADRÃO PARA A GEOMETRIA DO DIFUSOR

Conceito e construção da área do difusor compacto-flangeado

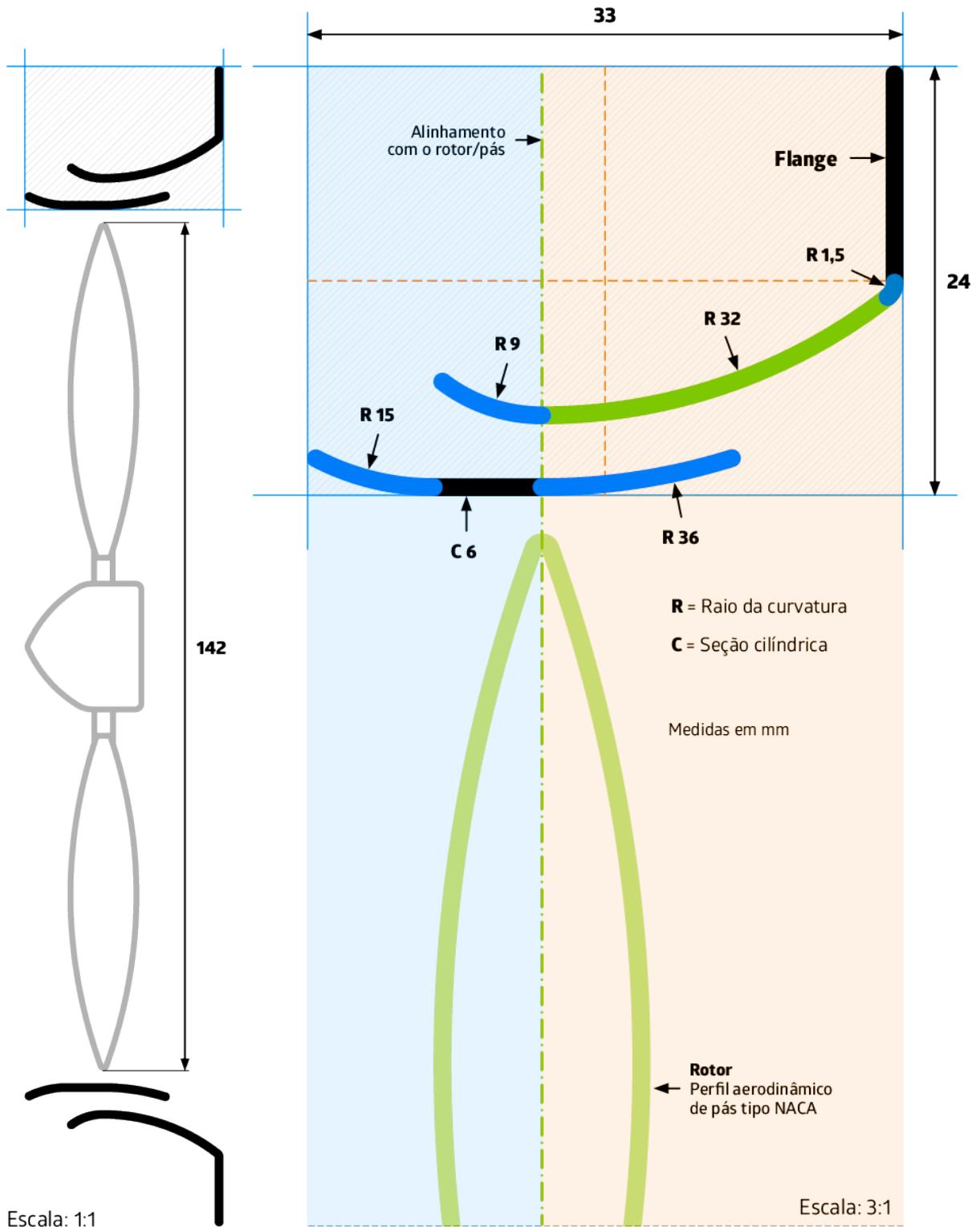




## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 2

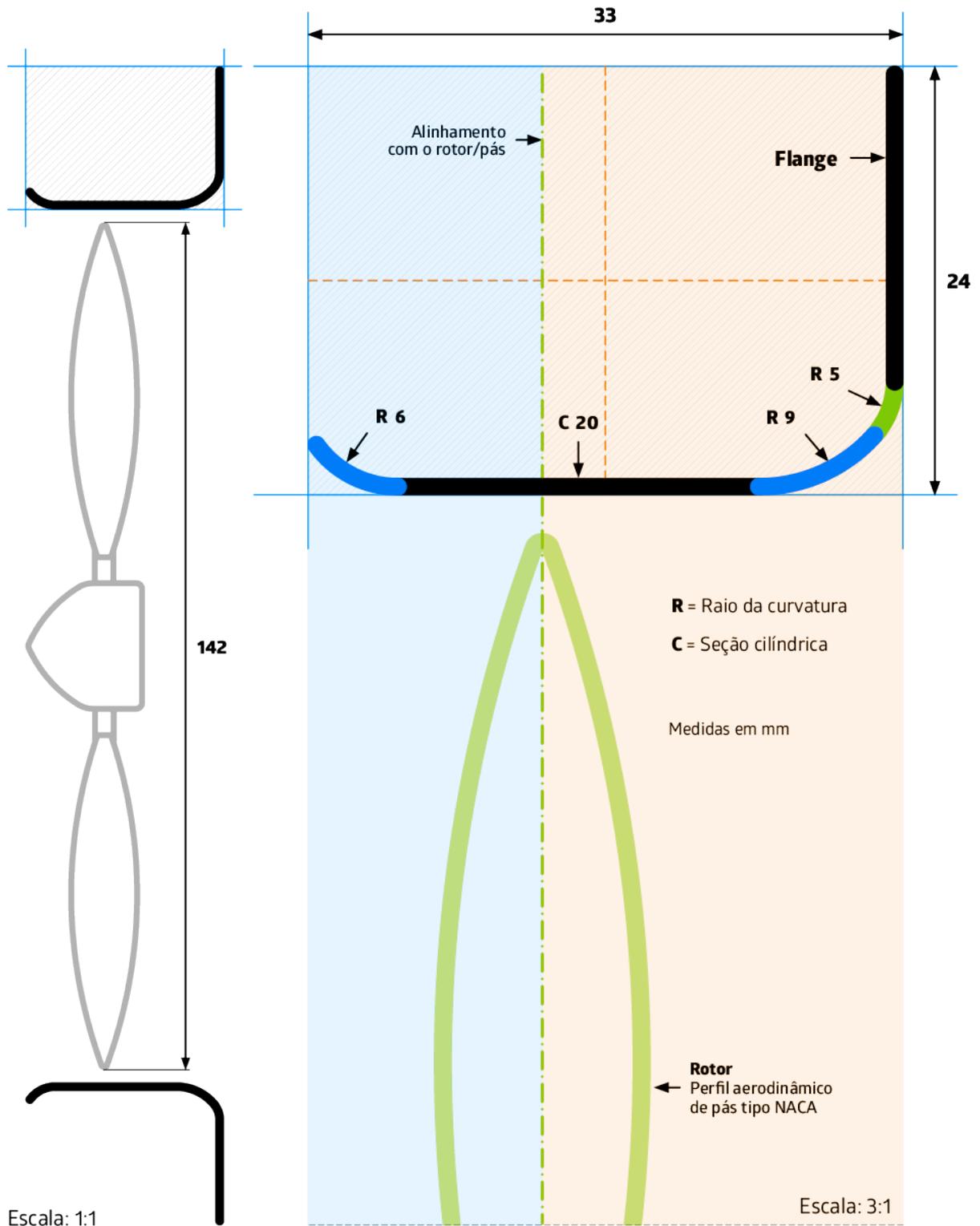
Difusor Compacto-flangeado de curvatura dupla



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 3

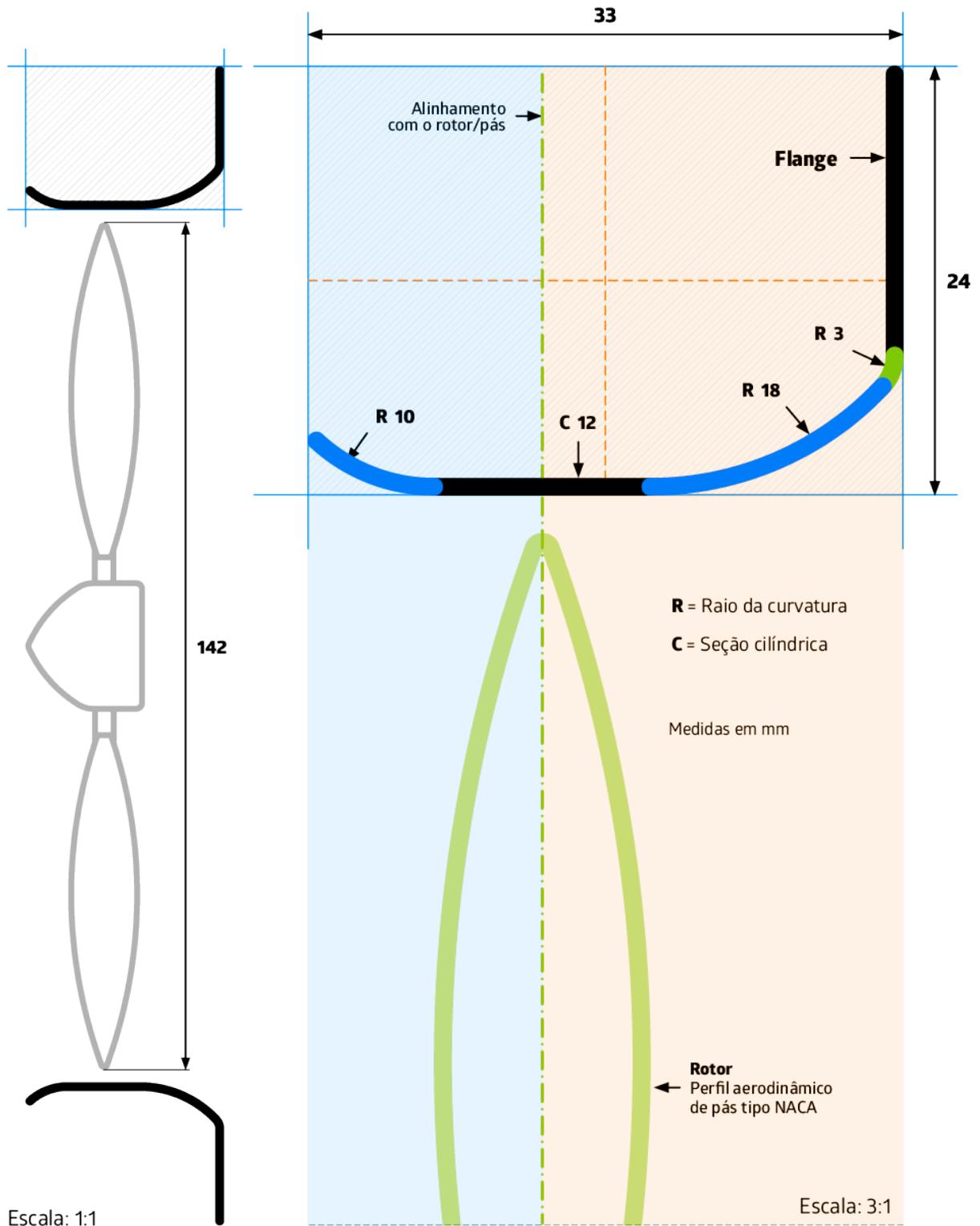
Difusor Compacto-flangeado cilíndrico variação 1



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 4

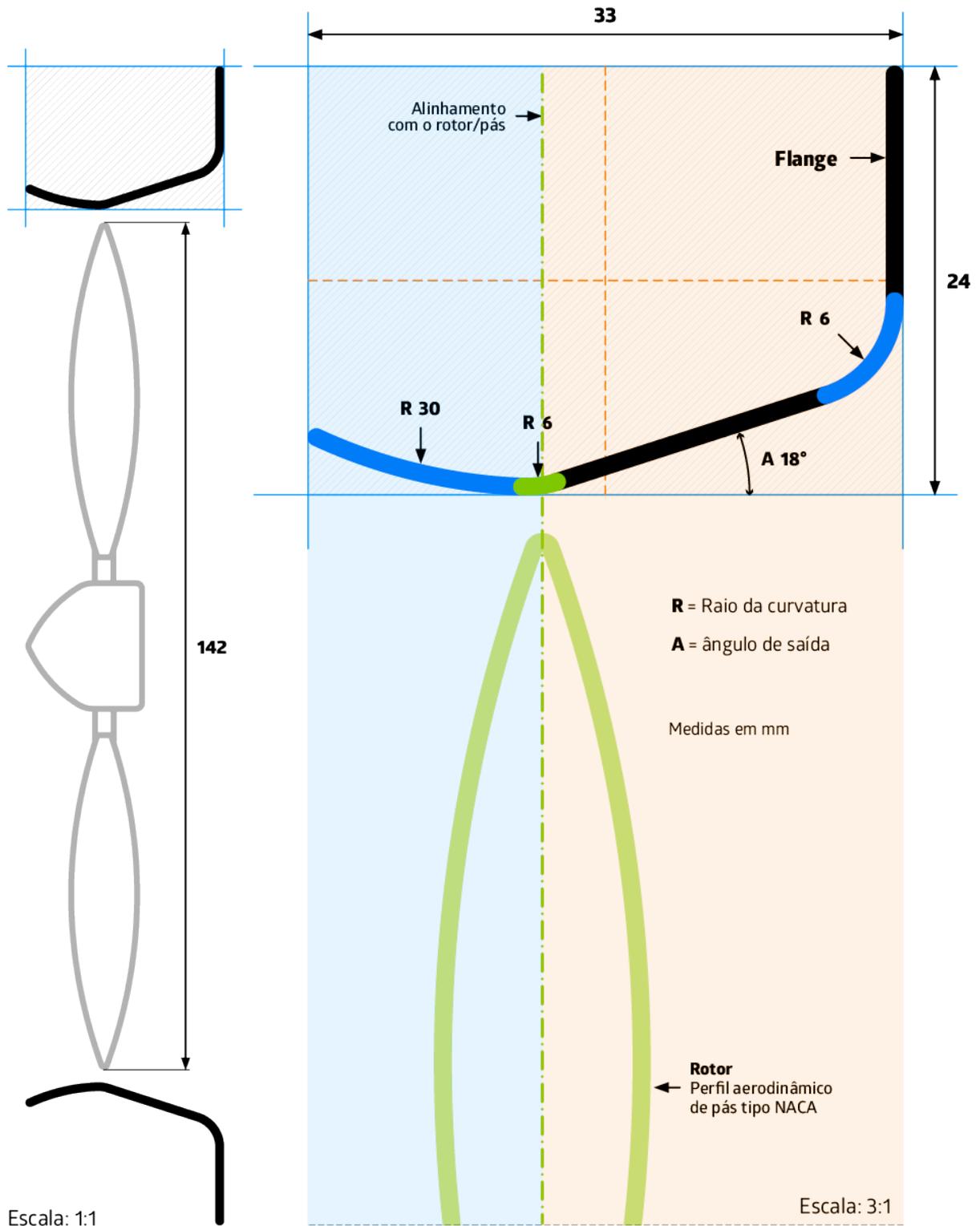
Difusor Compacto-flangeado cilíndrico semi-divergente variação 1



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 5

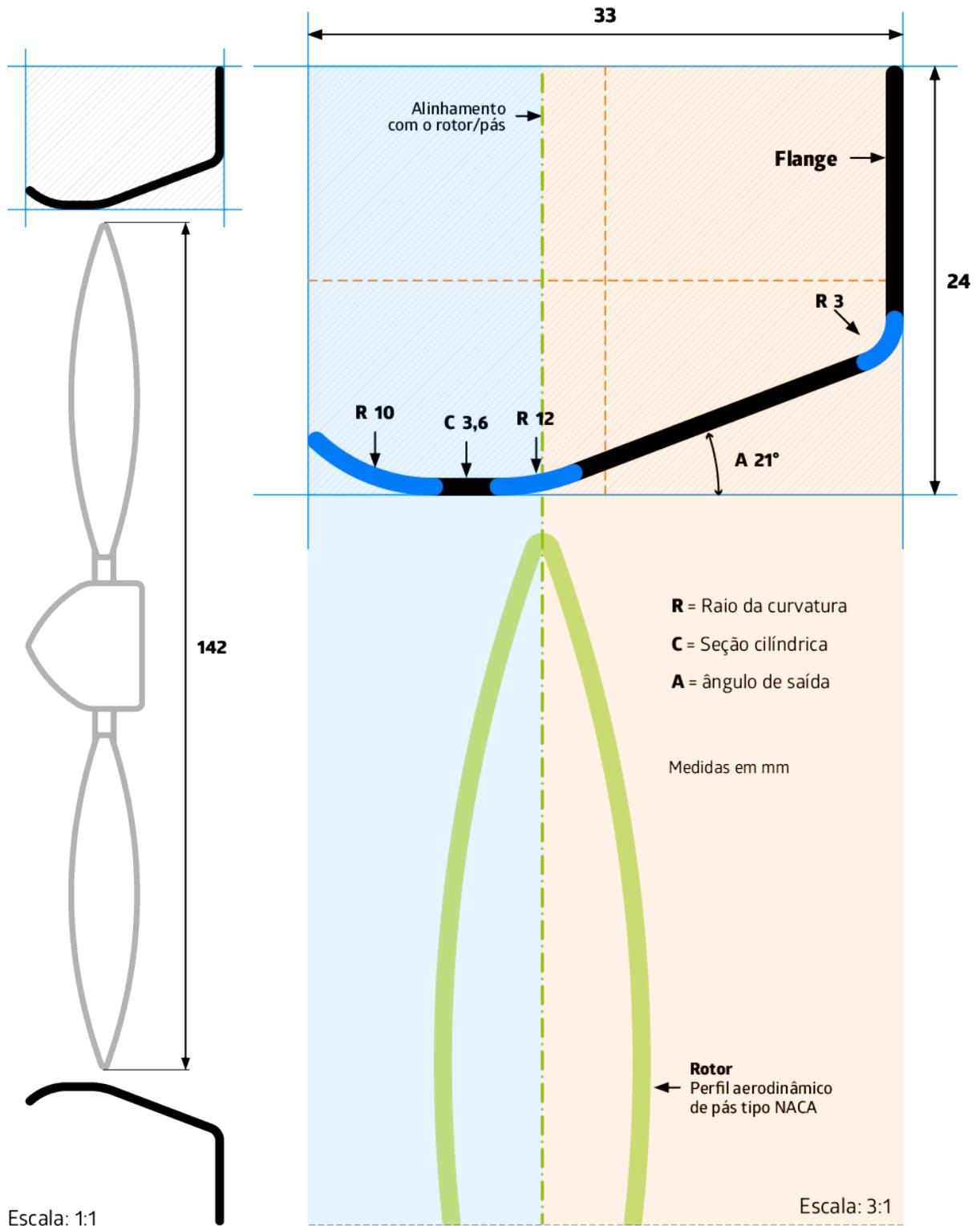
Difusor Compacto-flangeado convergente-divergente



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 6

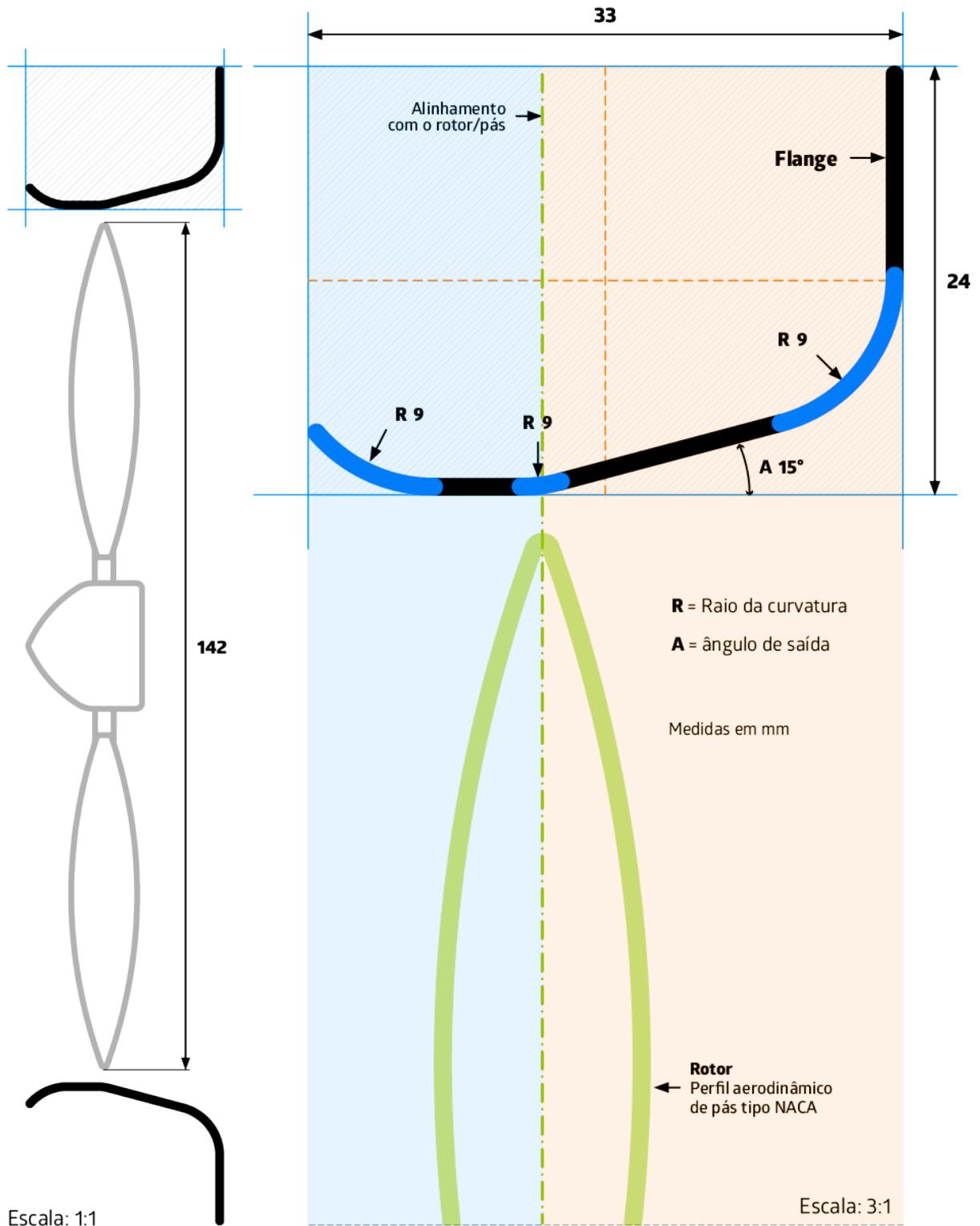
Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto variação 1



## APÊNDICE D

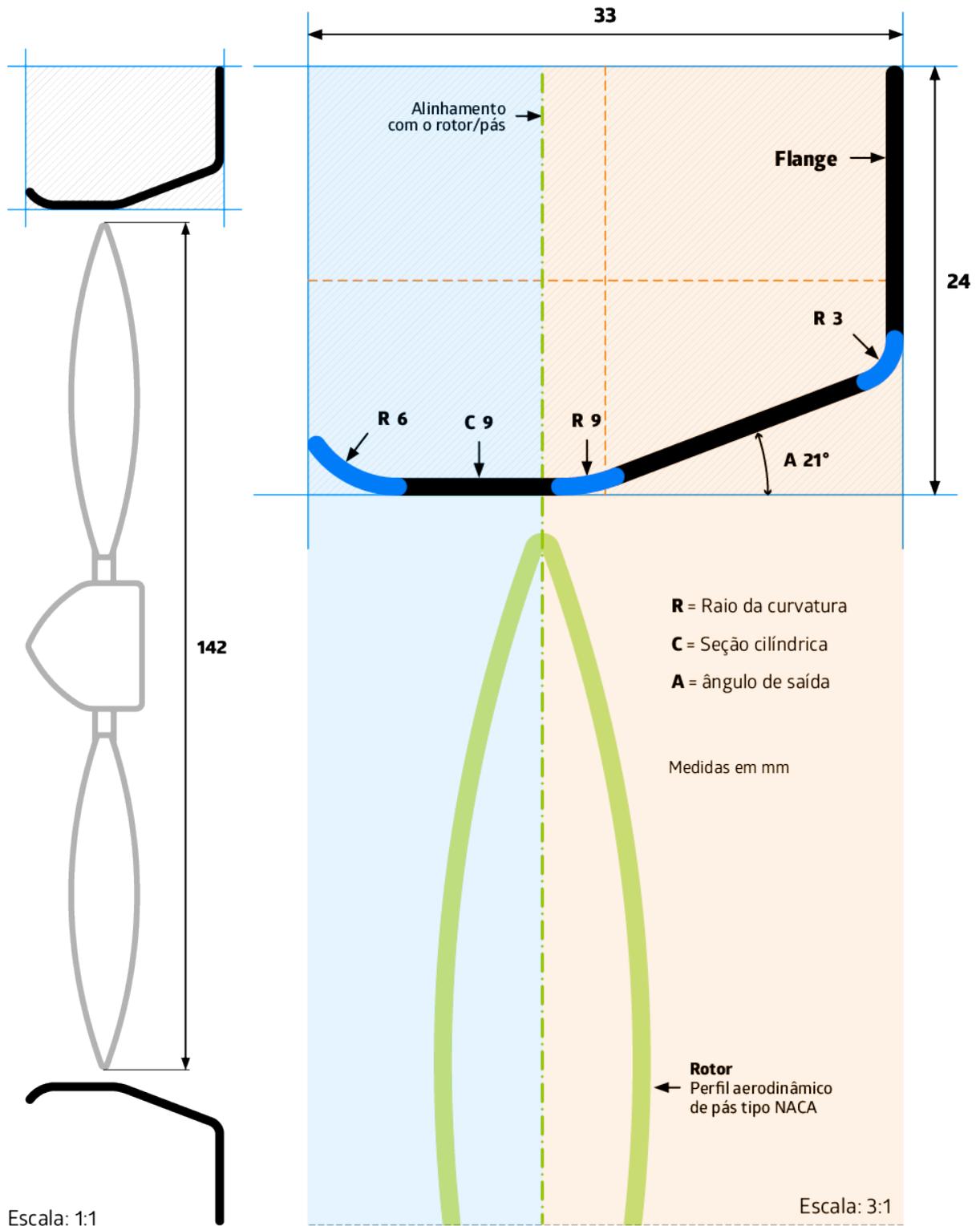
### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 7

Difusor Compacto-flangeado de ângulo semiaberto variação 2



**APÊNDICE D****GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 8**

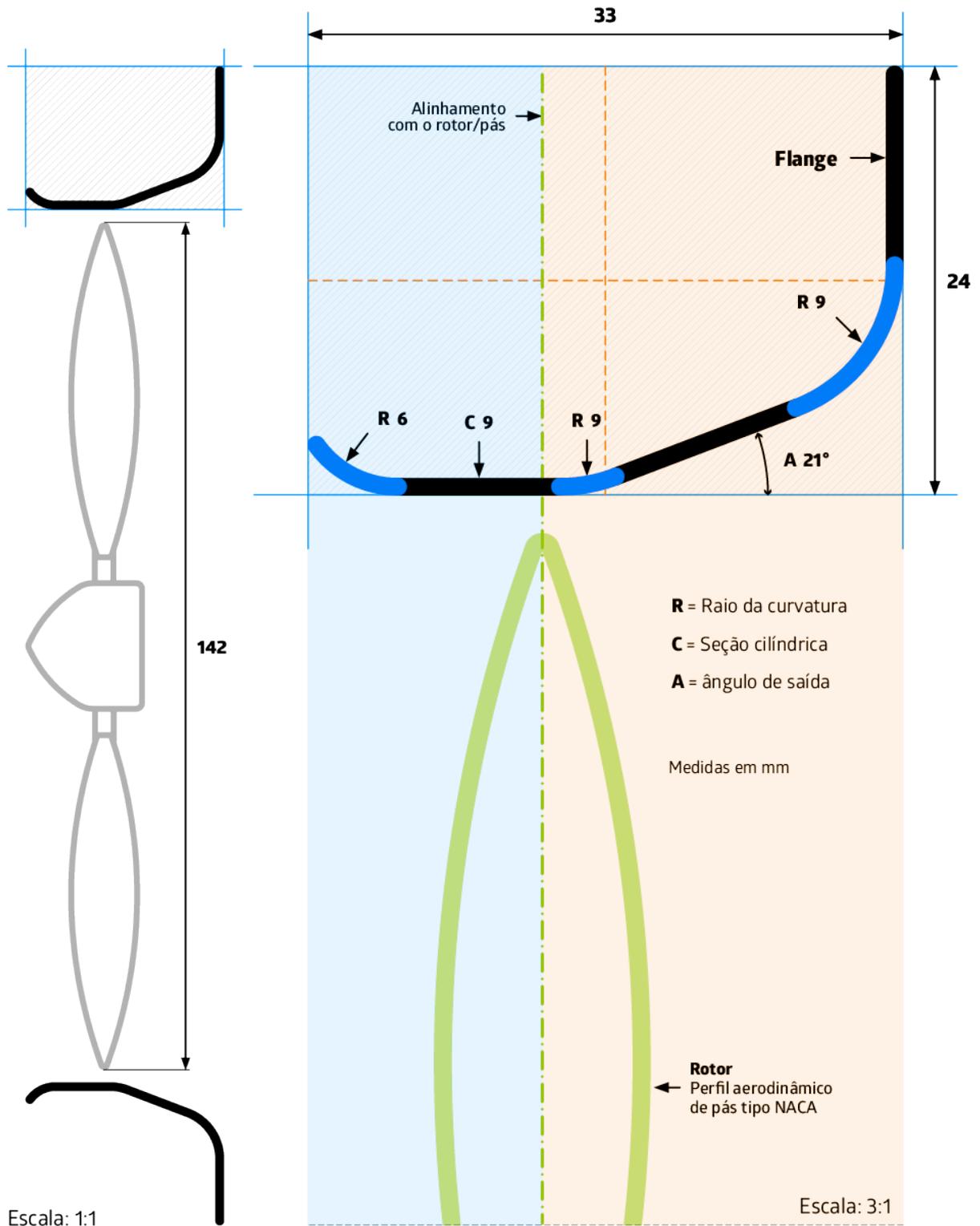
Difusor compacto-flangeado de ângulo semiaberto variação 3



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 9

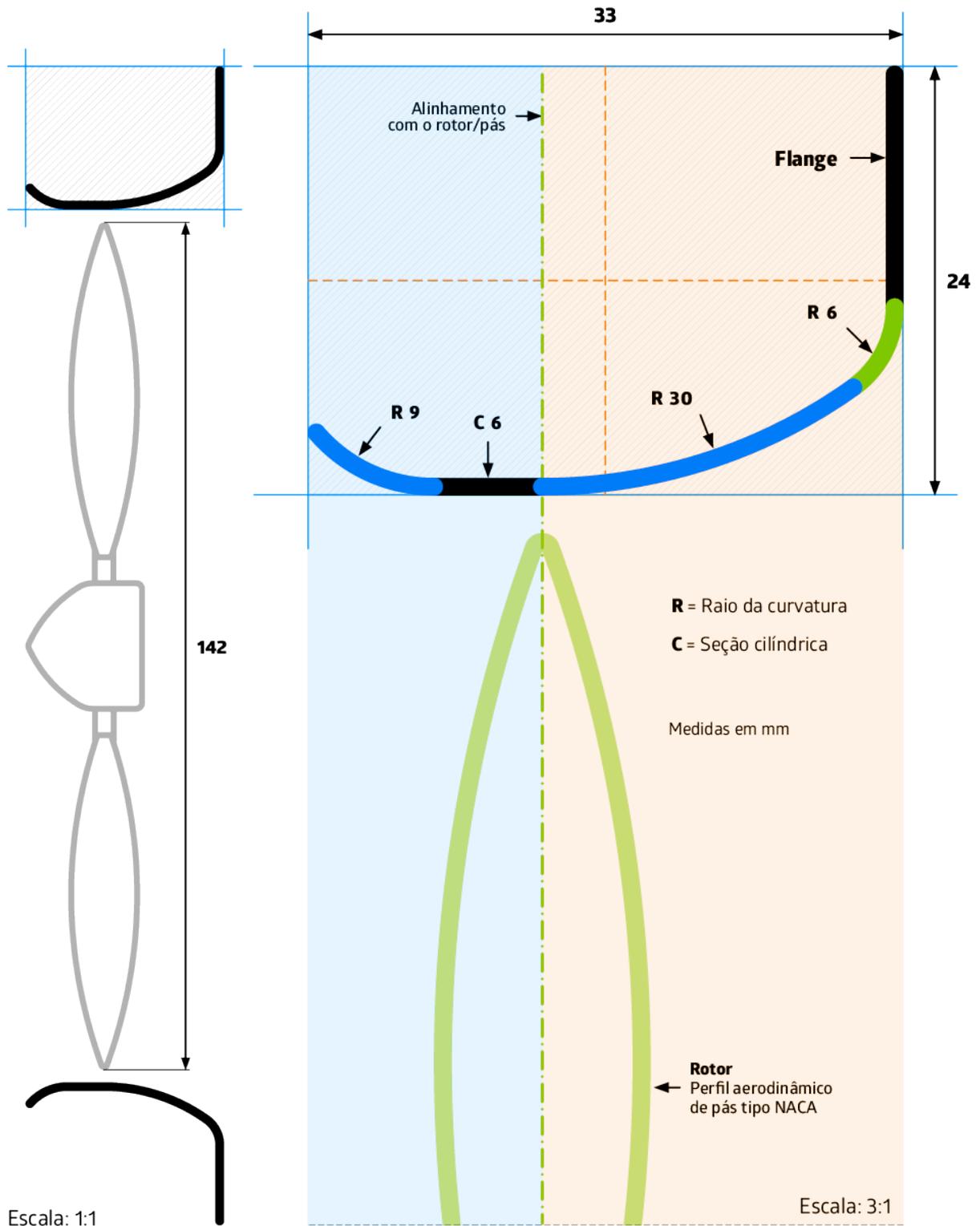
Difusor compacto-flangeado de ângulo semiaberto variação 4



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 10

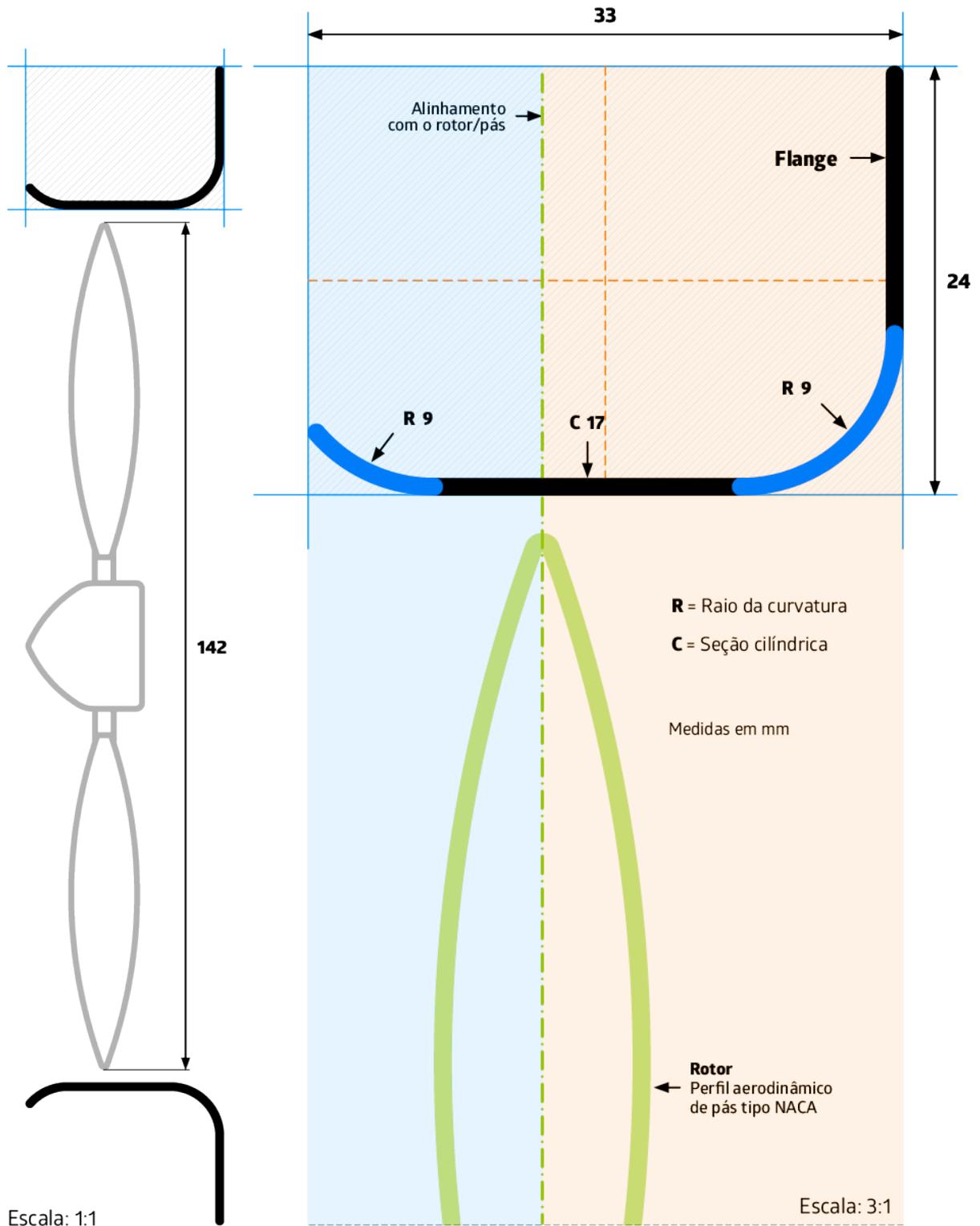
Difusor compacto-flangeado cilíndrico-divergente



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 11

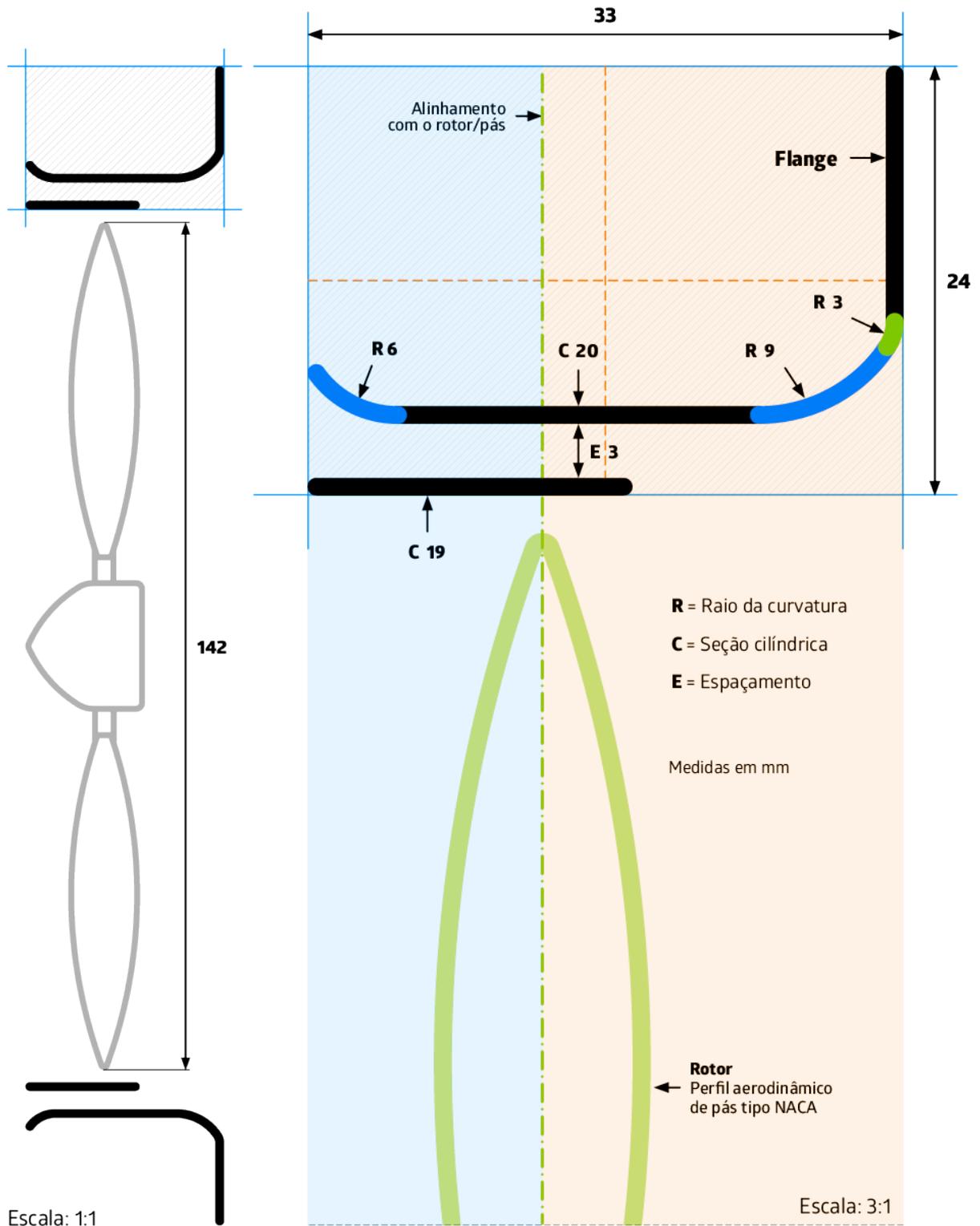
Difusor compacto-flangeado cilíndrico variação 2



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 12

Difusor compacto-flangeado duplo cilíndrico variação 1

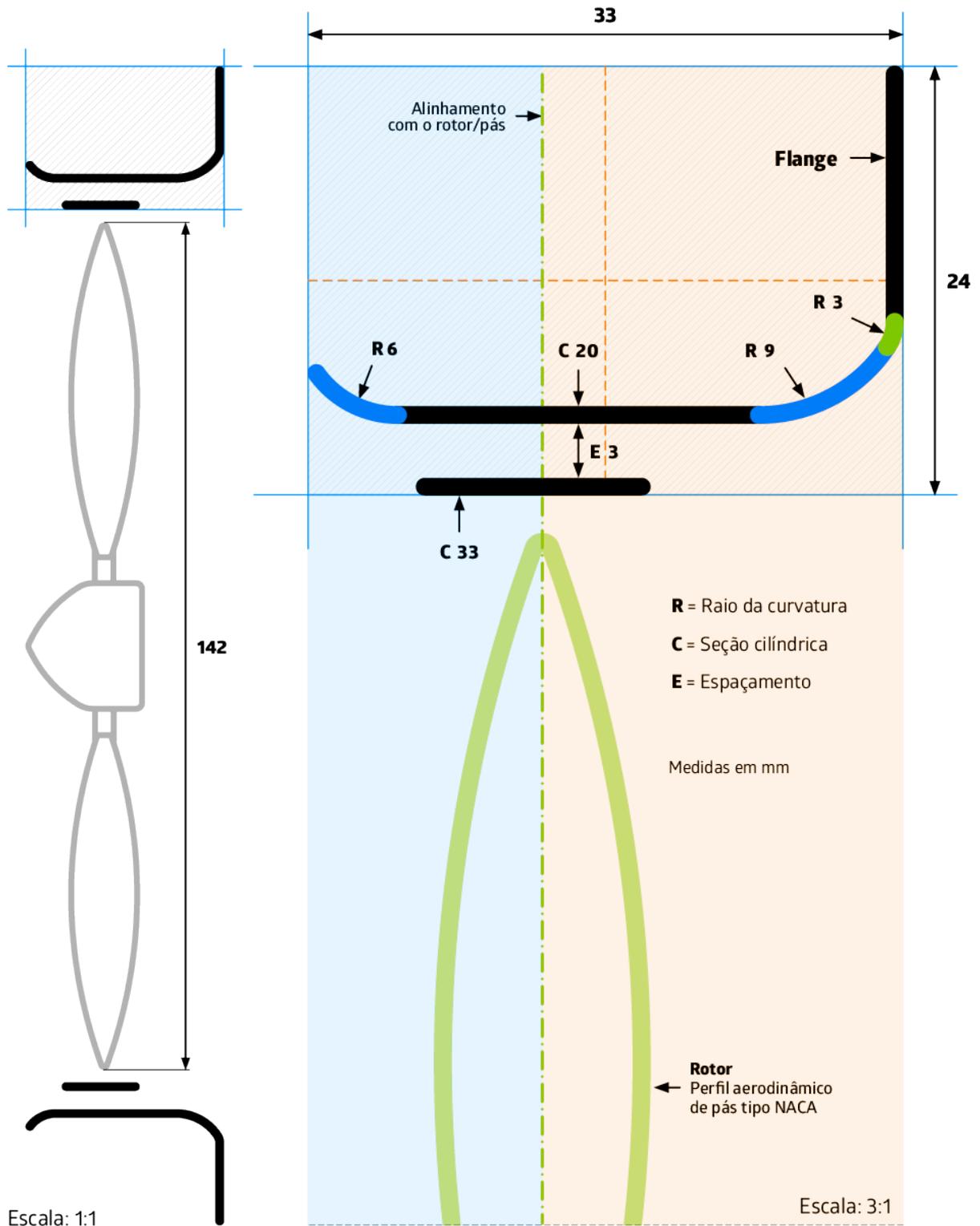




## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 14

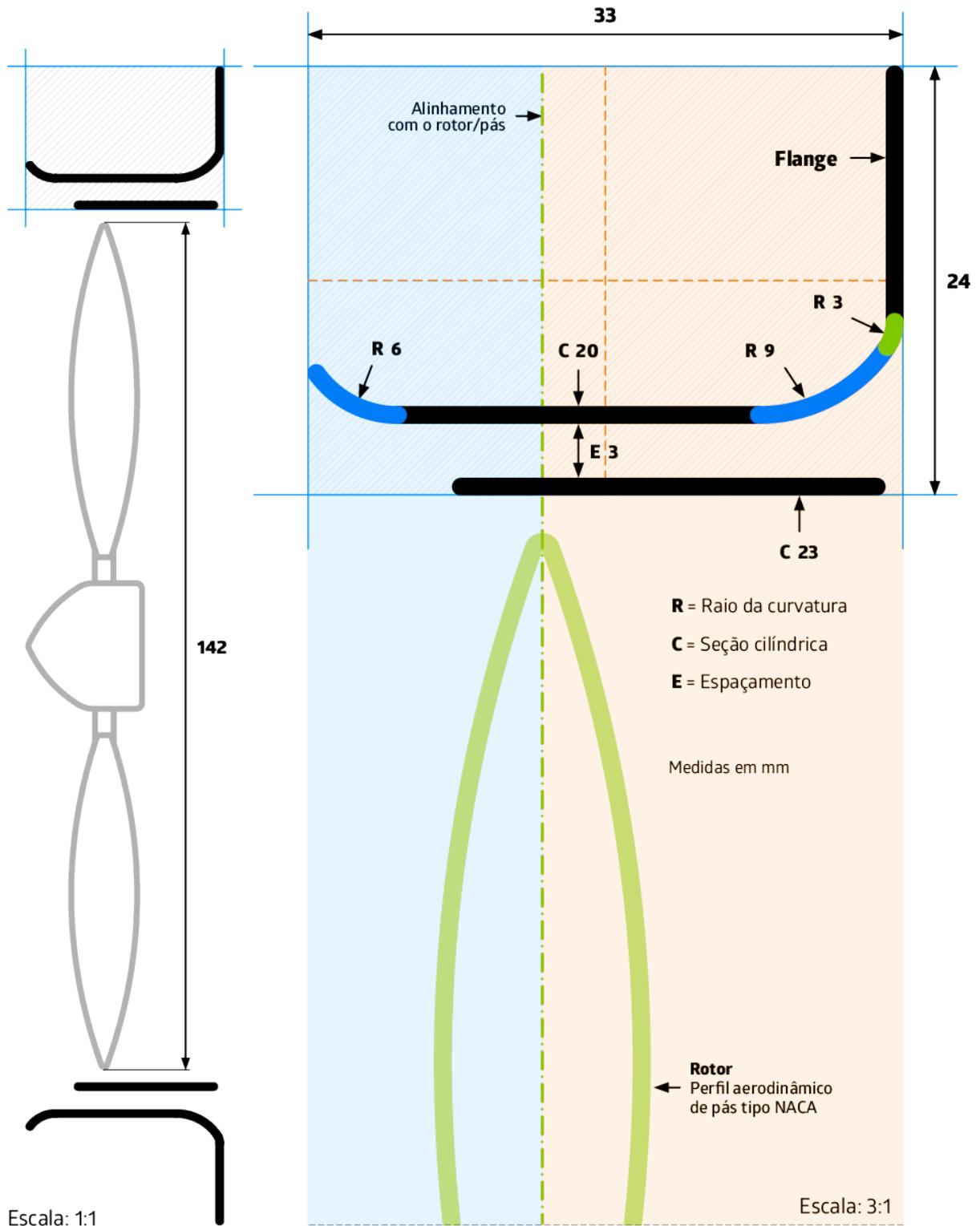
Difusor compacto-flangeado duplo cilíndrico variação 3



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 15

Difusor compacto-flangeado duplo cilíndrico variação 4





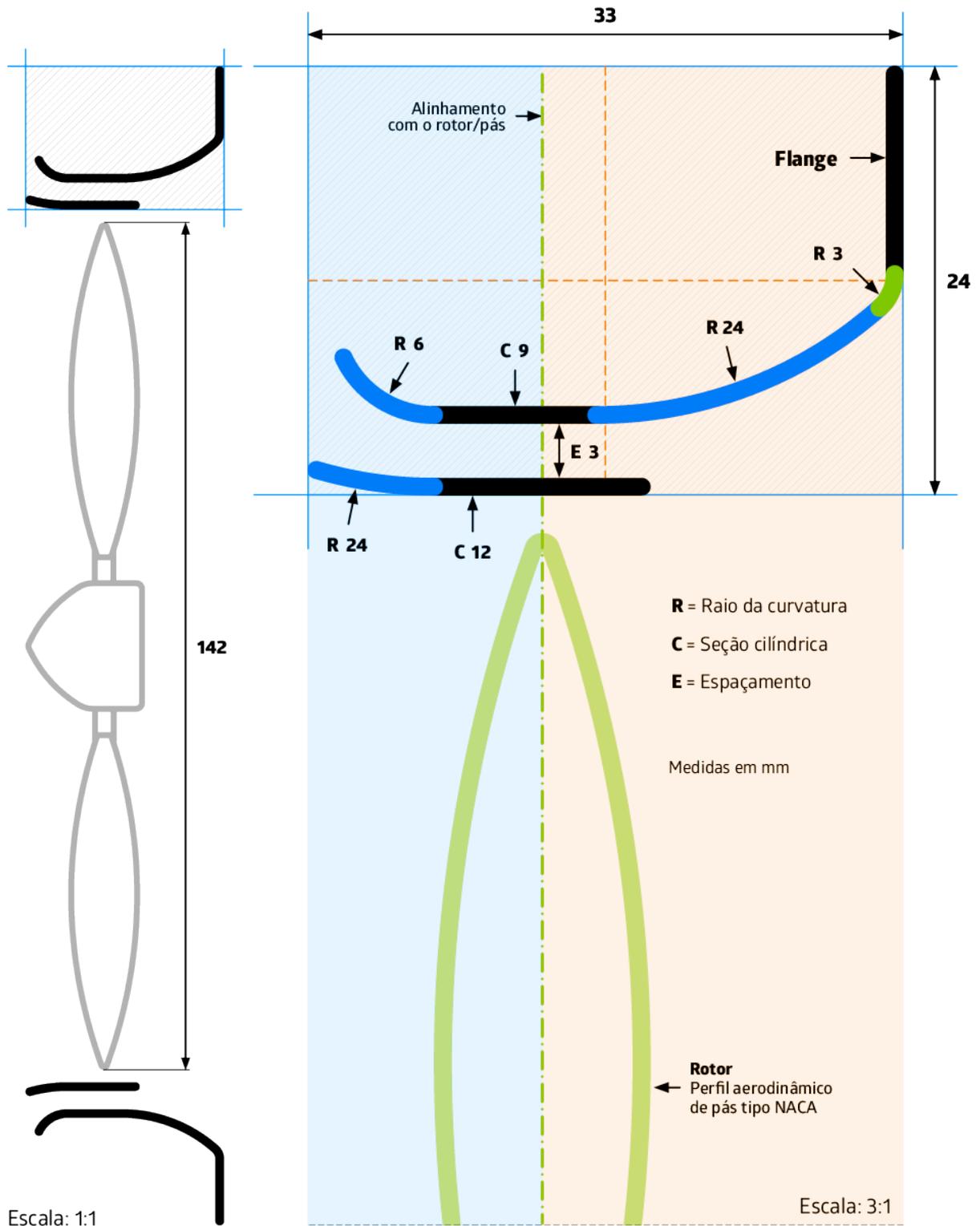




## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 19

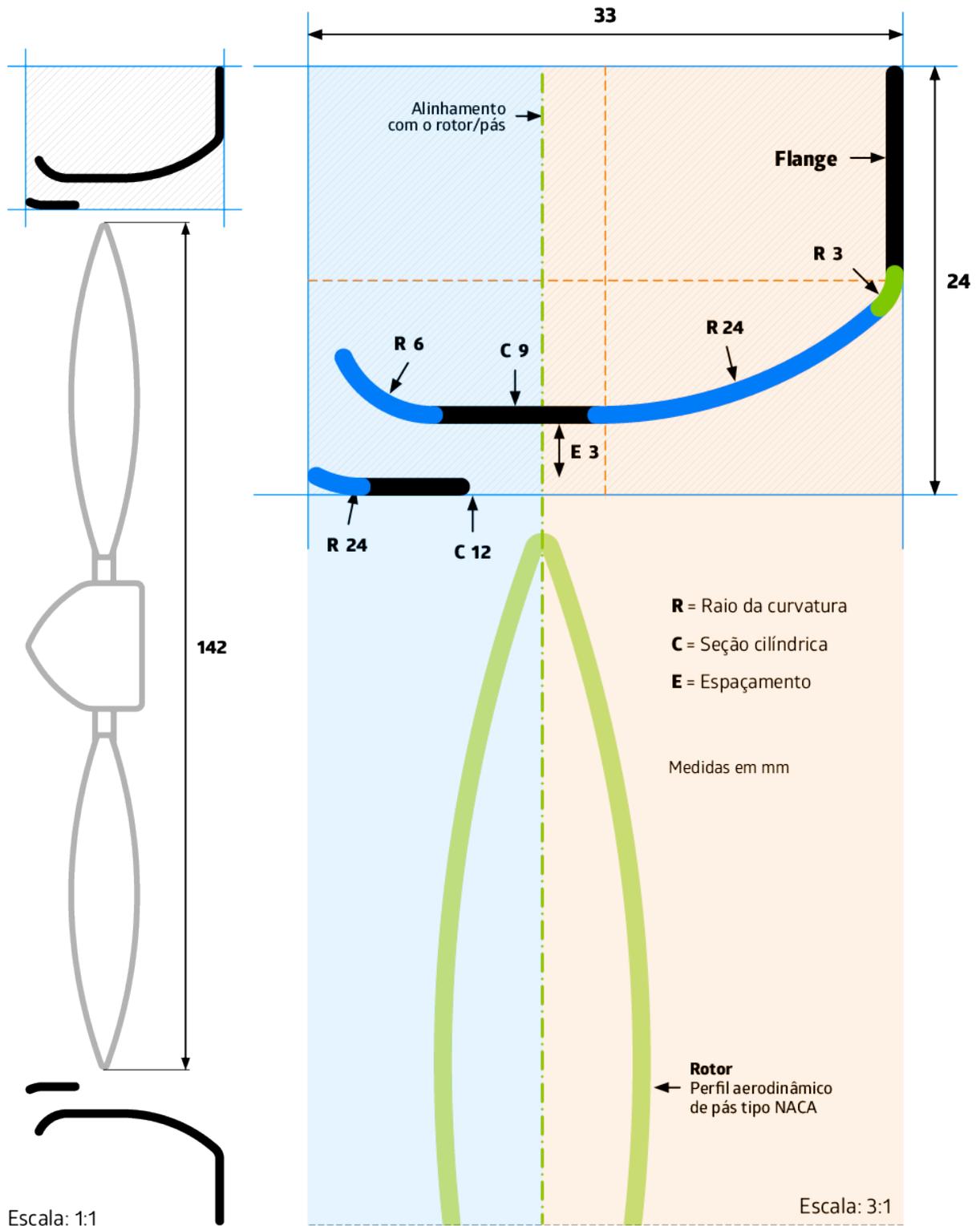
Difusor compacto-flangeado cilíndrico semi-divergente de curvatura dupla variação 2



## APÊNDICE D

### GEOMETRIA DOS DIFUSORES - MODELO 20

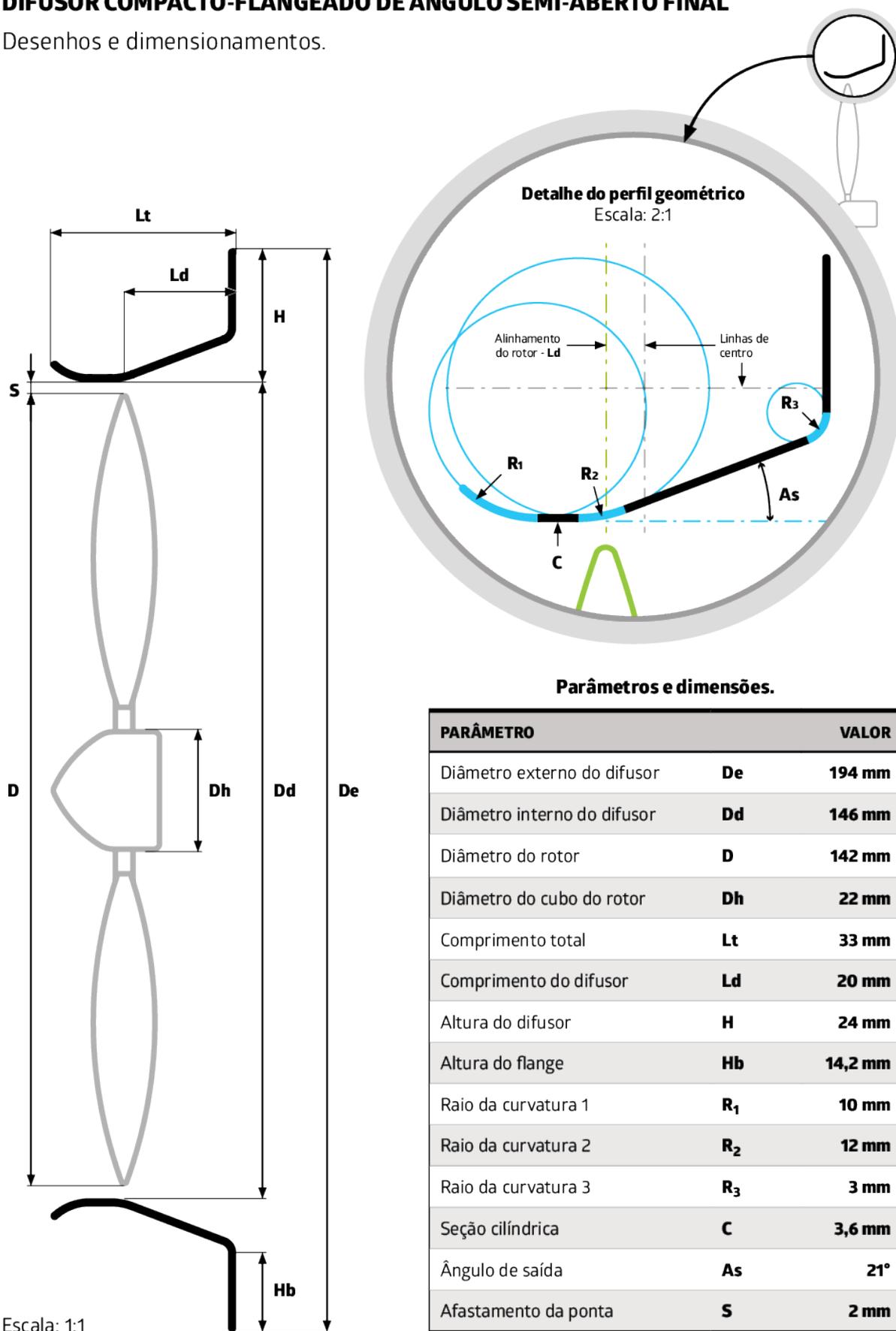
Difusor compacto-flangeado cilíndrico semi-divergente de curvatura dupla variação 3



## APÊNDICE E

### DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO DE ÂNGULO SEMI-ABERTO FINAL

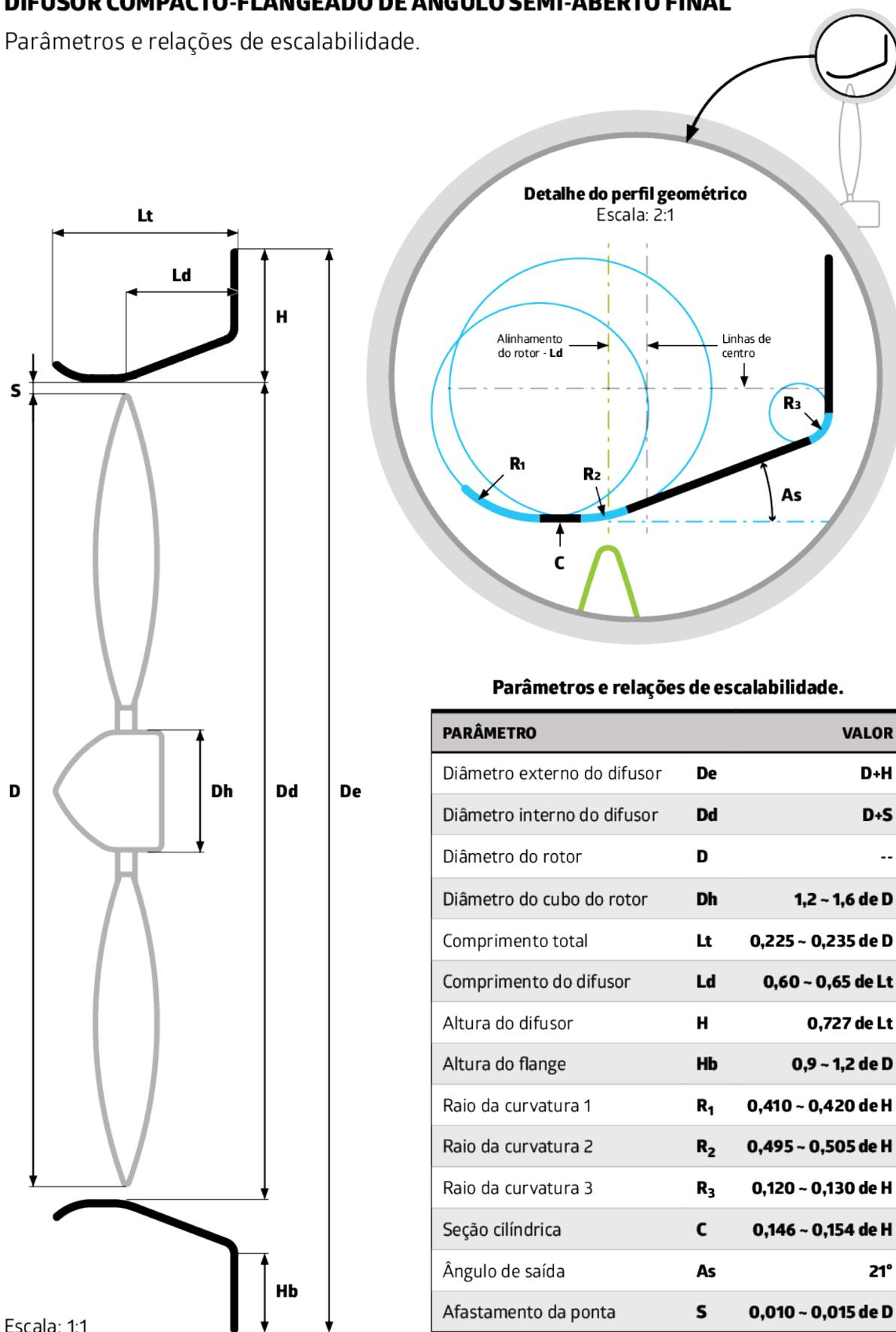
Desenhos e dimensionamentos.



## APÊNDICE E

### DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO DE ÂNGULO SEMI-ABERTO FINAL

Parâmetros e relações de escalabilidade.

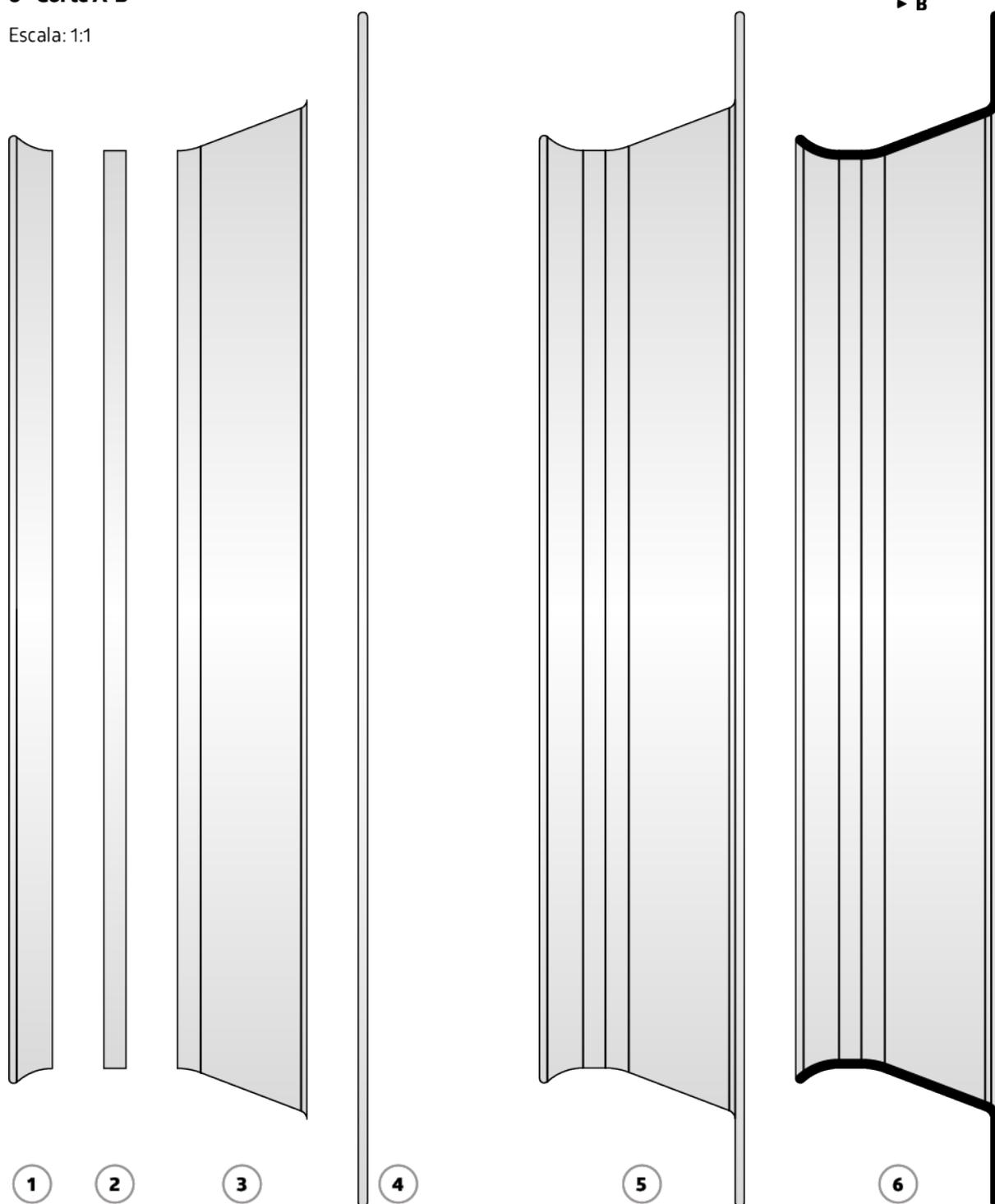


**APÊNDICE E****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO DE ÂNGULO SEMI-ABERTO FINAL**

Partes construtivas e corte transversal.

- 1 - Concentrador**
- 2 - Seção cilíndrica**
- 3 - Difusor**
- 4 - Flange**
- 5 - Vista lateral**
- 6 - Corte A-B**

Escala: 1:1

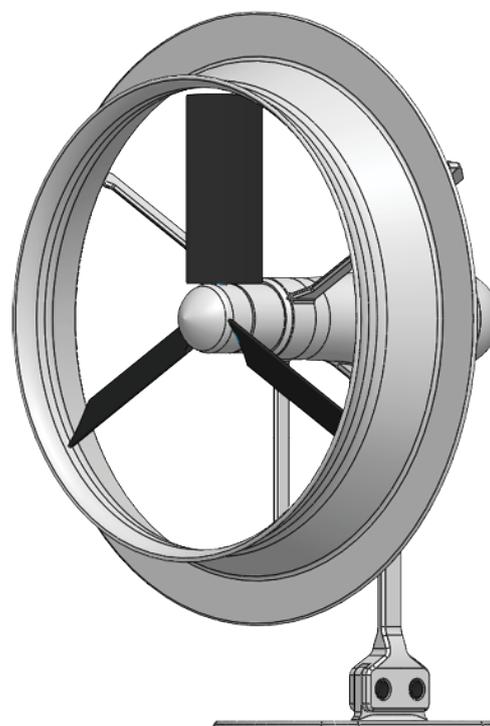


**APÊNDICE E****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO DE ÂNGULO SEMI-ABERTO FINAL**

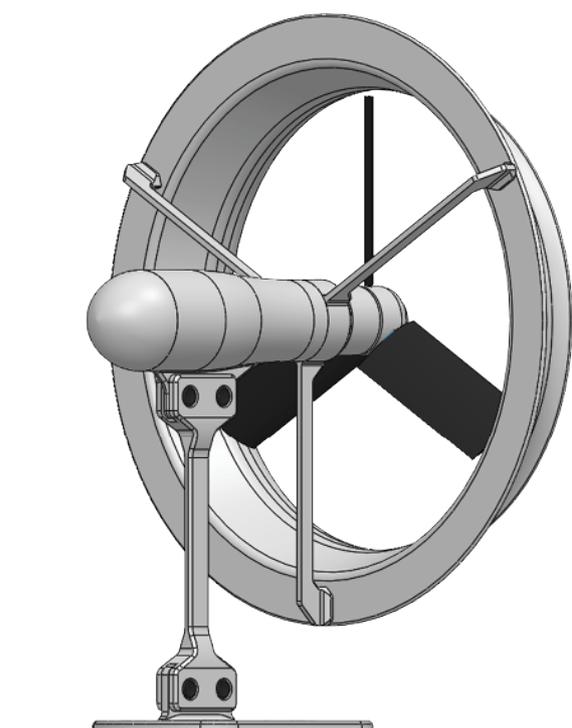
Vistas projetivas aplicadas.

**VISTA PERSPECTIVA FRONTAL**

Difusor acoplado em uma turbina eólica de pequena escala

**VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR**

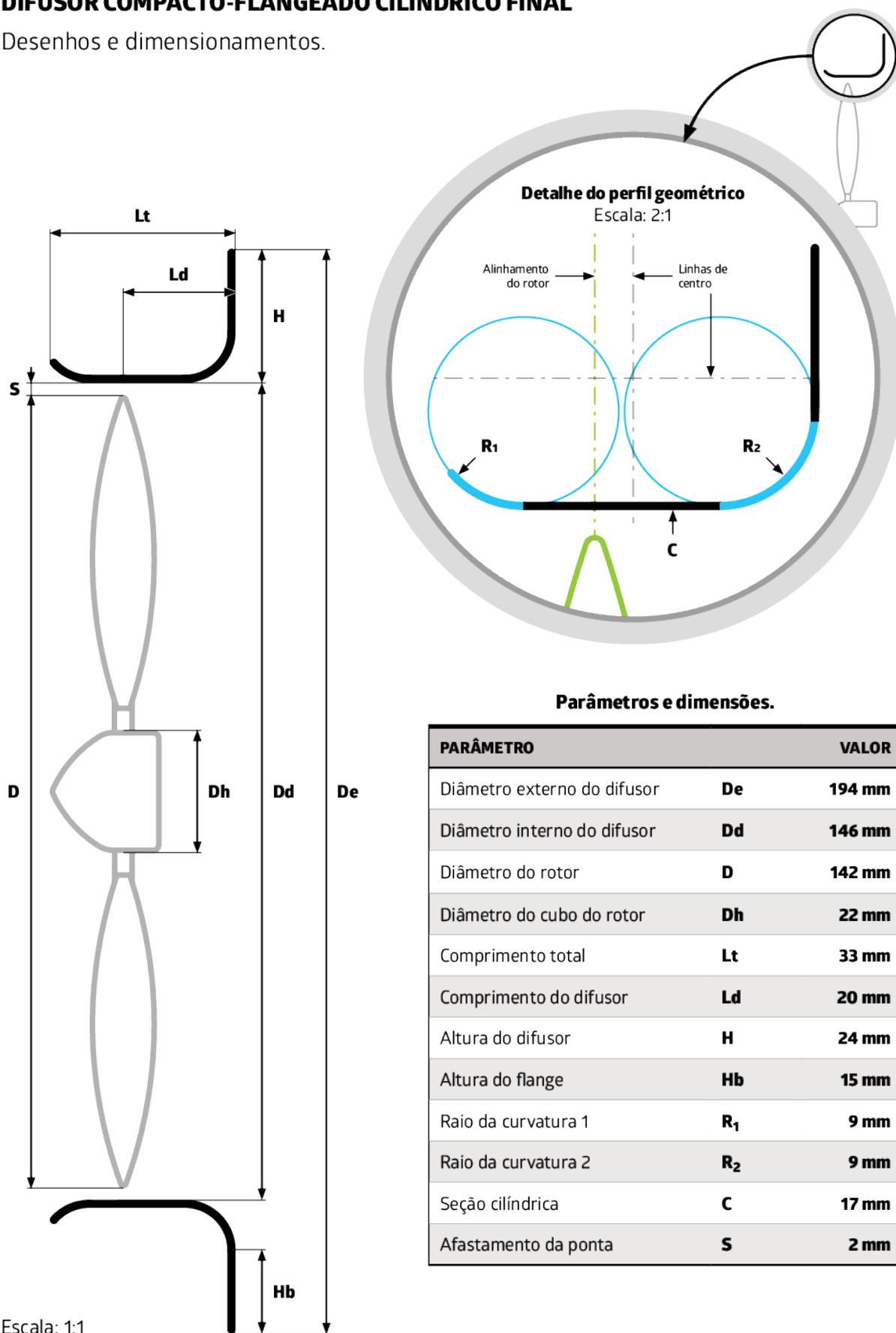
Difusor acoplado em uma turbina eólica de pequena escala



## APÊNDICE F

### DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO CILÍNDRICO FINAL

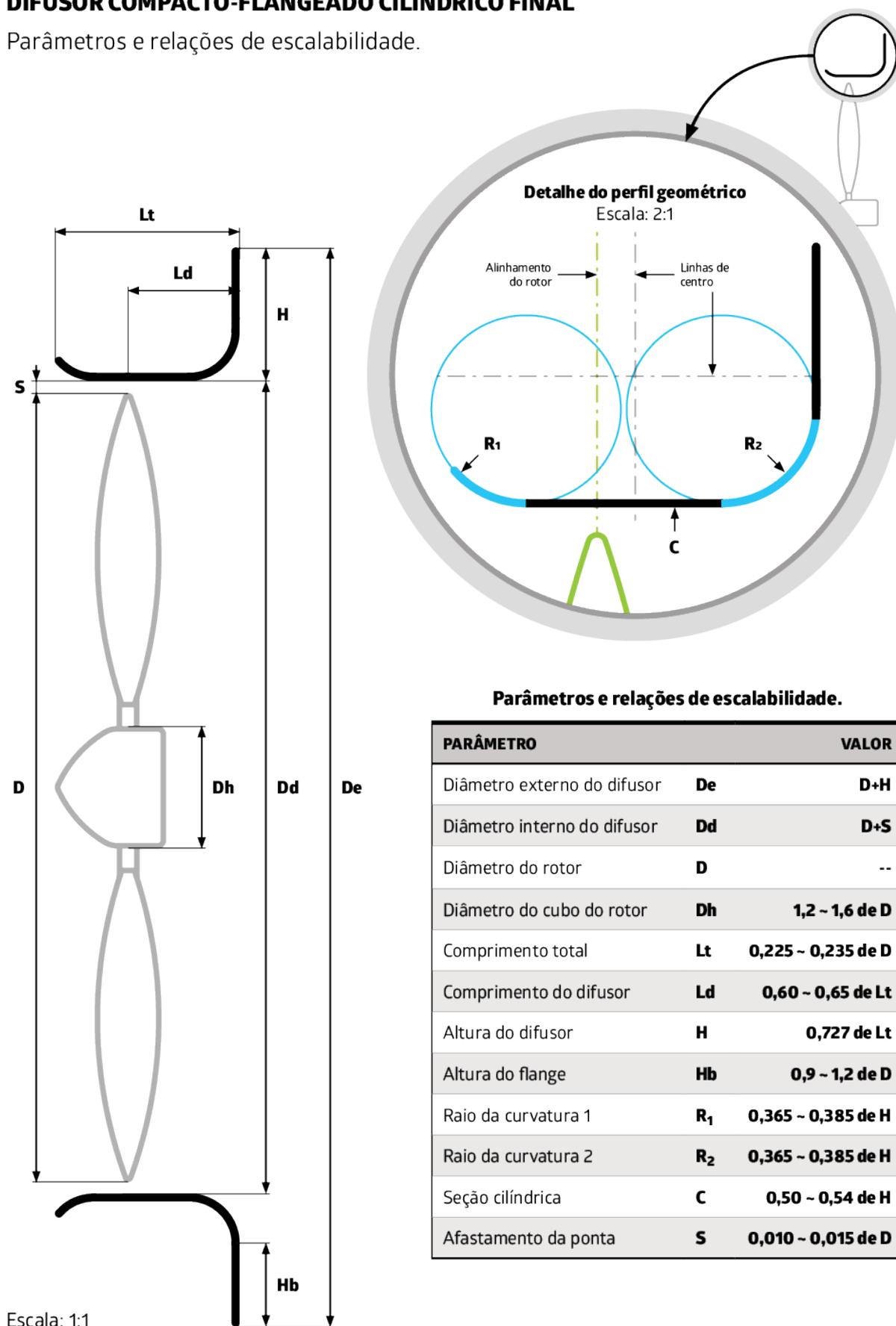
Desenhos e dimensionamentos.



## APÊNDICE F

### DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO CILÍNDRICO FINAL

Parâmetros e relações de escalabilidade.

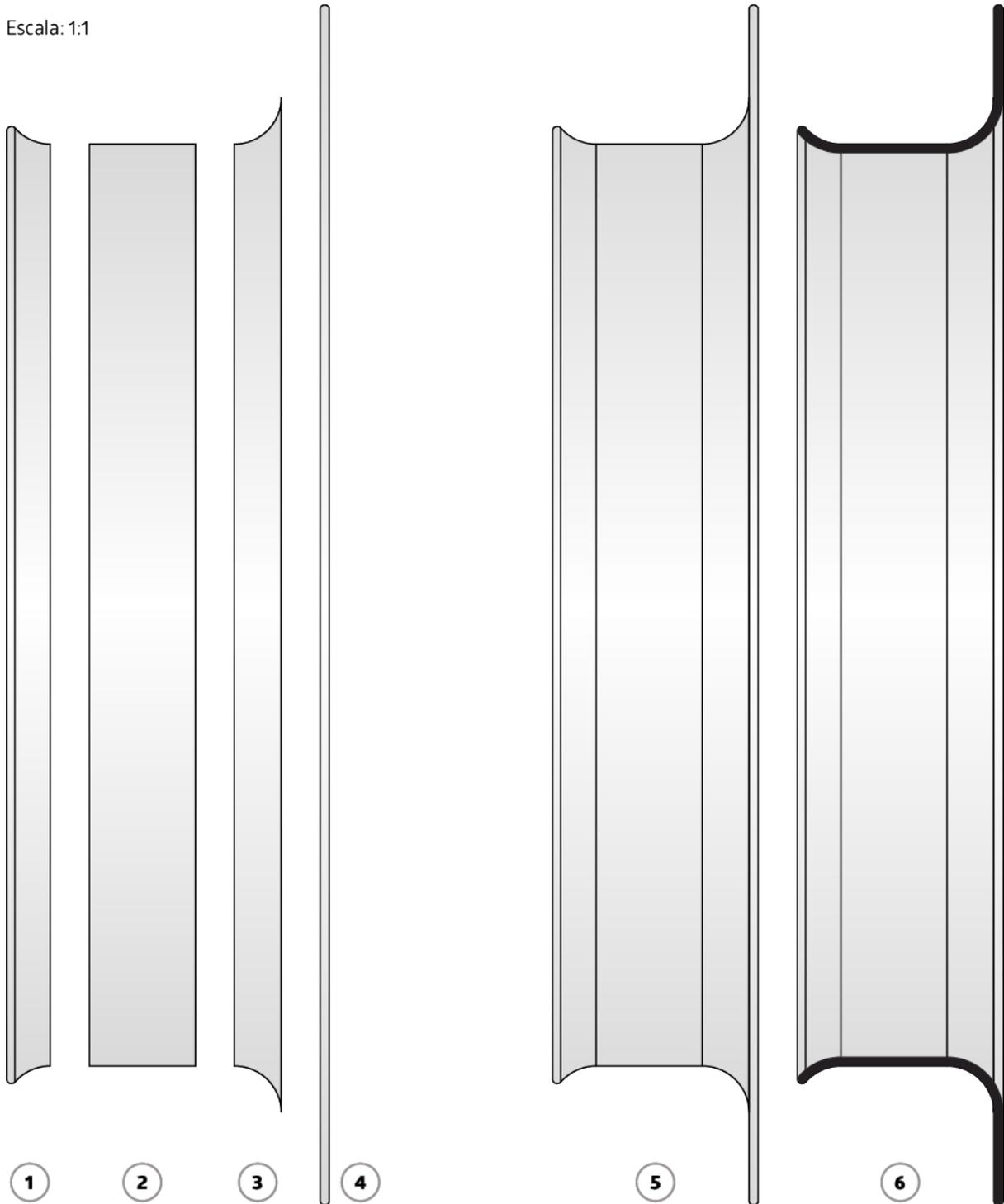


**APÊNDICE F****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO CILÍNDRICO FINAL**

Partes construtivas e corte transversal.

- 1 - Concentrador
- 2 - Seção cilíndrica
- 3 - Difusor
- 4 - Flange
- 5 - Vista lateral
- 6 - Corte A-B

Escala: 1:1

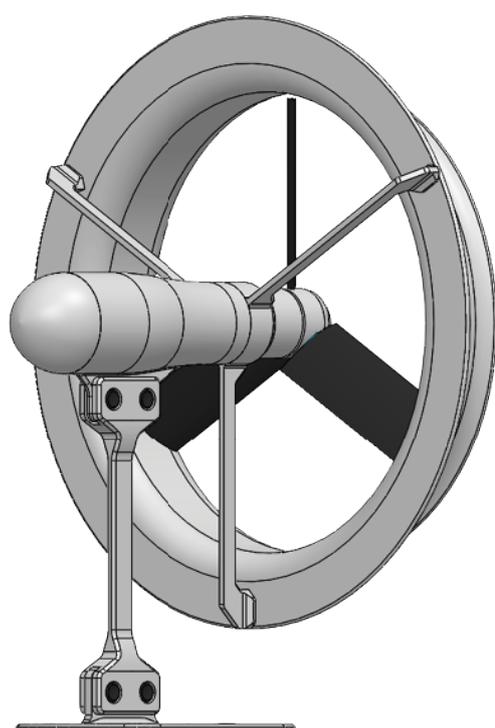
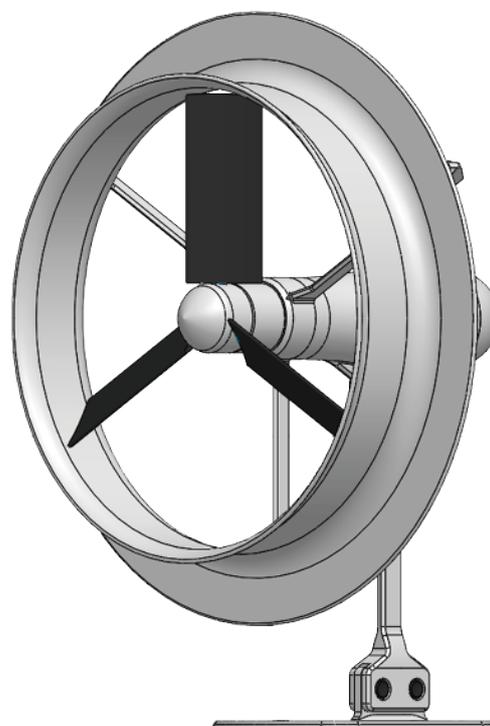


**APÊNDICE F****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO CILÍNDRICO FINAL**

Vistas projetivas aplicadas.

**VISTA PERSPECTIVA FRONTAL**

Difusor acoplado em uma turbina eólica de pequena escala

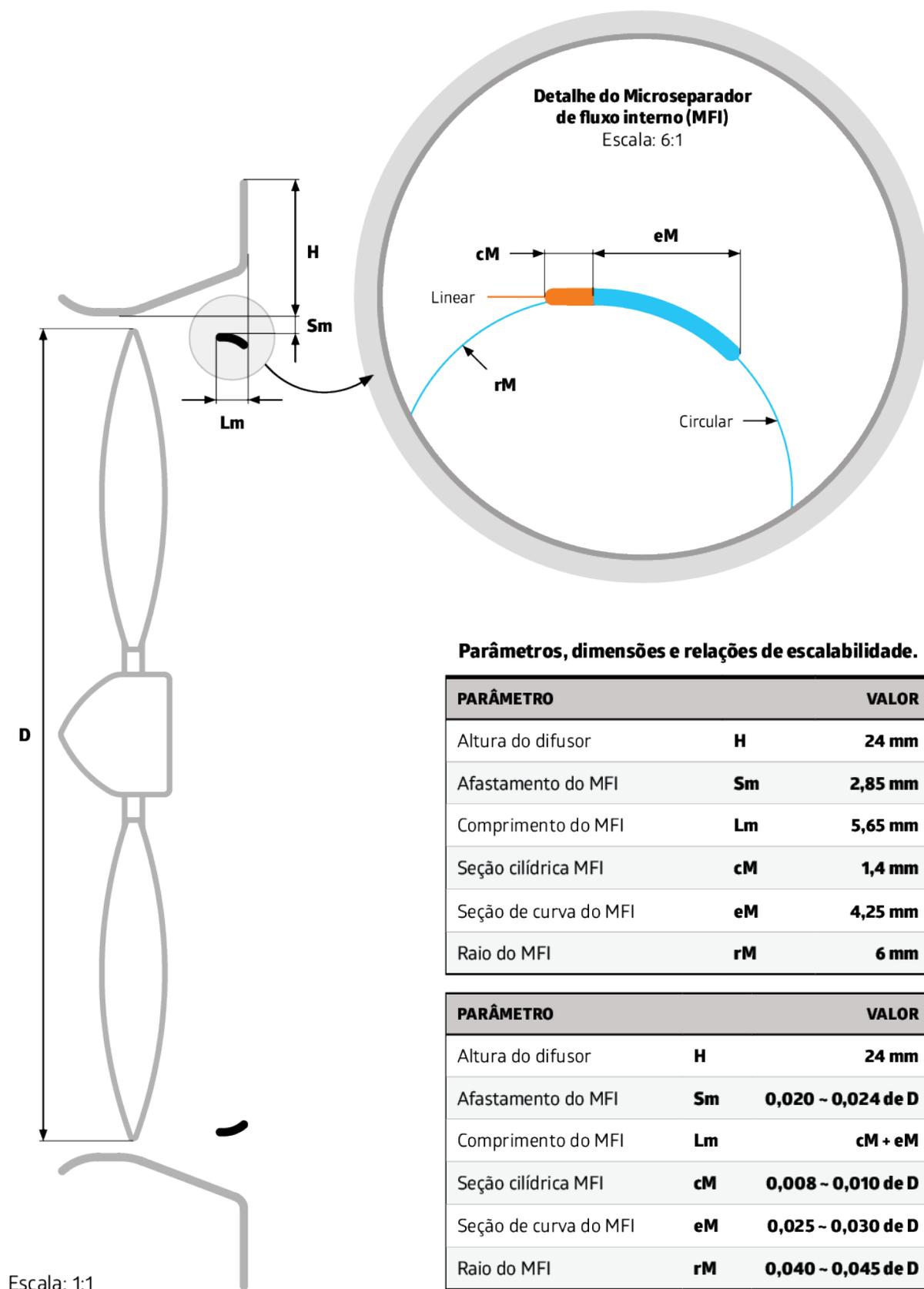
**VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR**

Difusor acoplado em uma turbina eólica de pequena escala

## APÊNDICE G

### MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)

Dimensões técnicas, parâmetros de configuração e de escalabilidade.



#### Parâmetros, dimensões e relações de escalabilidade.

PARÂMETRO		VALOR
Altura do difusor	<b>H</b>	<b>24 mm</b>
Afastamento do MFI	<b>Sm</b>	<b>2,85 mm</b>
Comprimento do MFI	<b>Lm</b>	<b>5,65 mm</b>
Seção cilíndrica MFI	<b>cM</b>	<b>1,4 mm</b>
Seção de curva do MFI	<b>eM</b>	<b>4,25 mm</b>
Raio do MFI	<b>rM</b>	<b>6 mm</b>

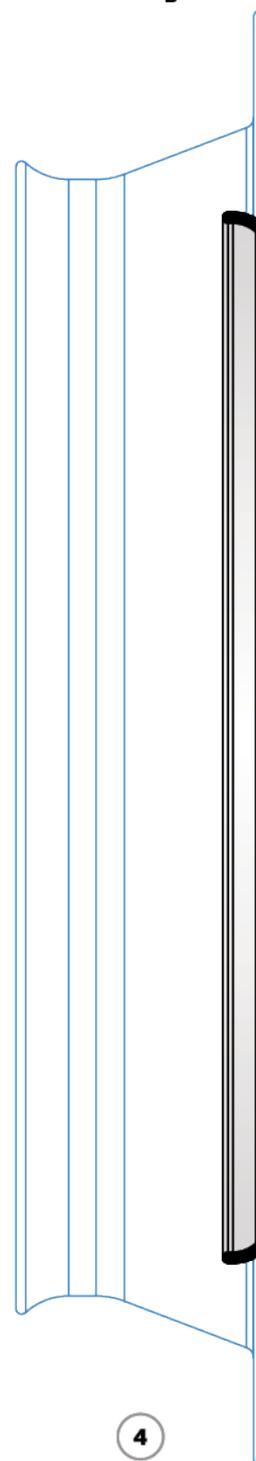
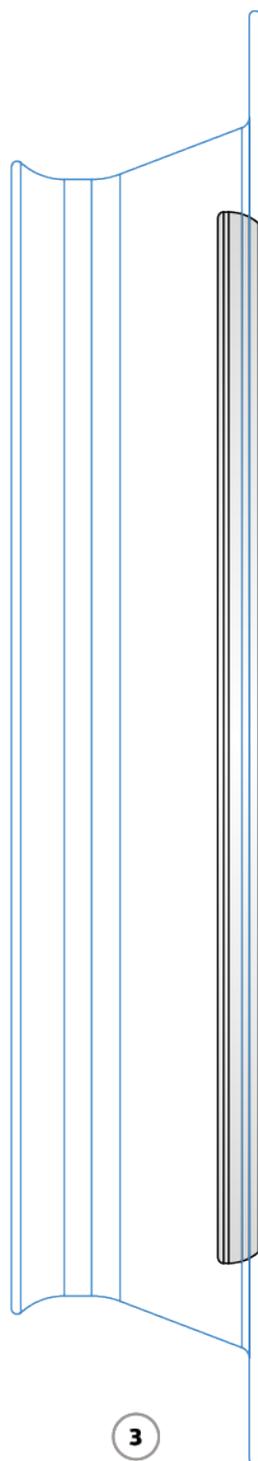
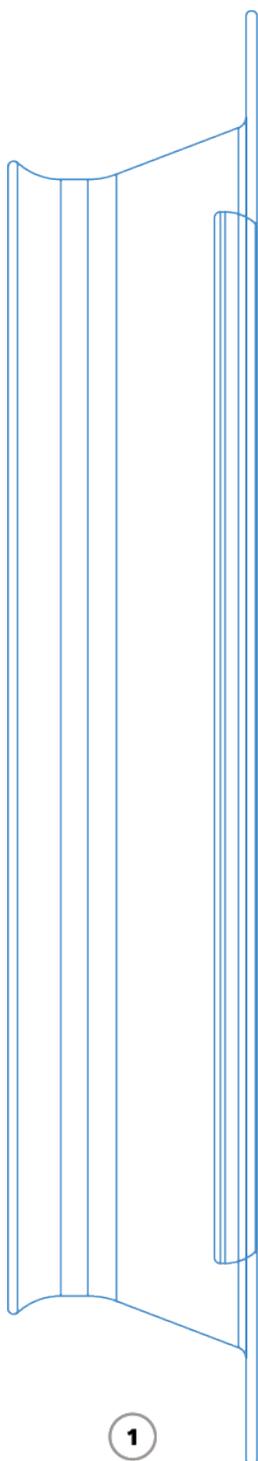
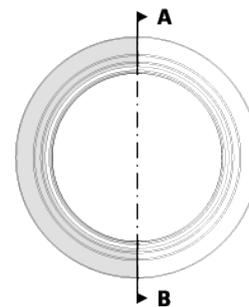
PARÂMETRO		VALOR
Altura do difusor	<b>H</b>	<b>24 mm</b>
Afastamento do MFI	<b>Sm</b>	<b>0,020 ~ 0,024 de D</b>
Comprimento do MFI	<b>Lm</b>	<b>cM + eM</b>
Seção cilíndrica MFI	<b>cM</b>	<b>0,008 ~ 0,010 de D</b>
Seção de curva do MFI	<b>eM</b>	<b>0,025 ~ 0,030 de D</b>
Raio do MFI	<b>rM</b>	<b>0,040 ~ 0,045 de D</b>

**APÊNDICE G****MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)**

Partes construtivas e corte transversal.

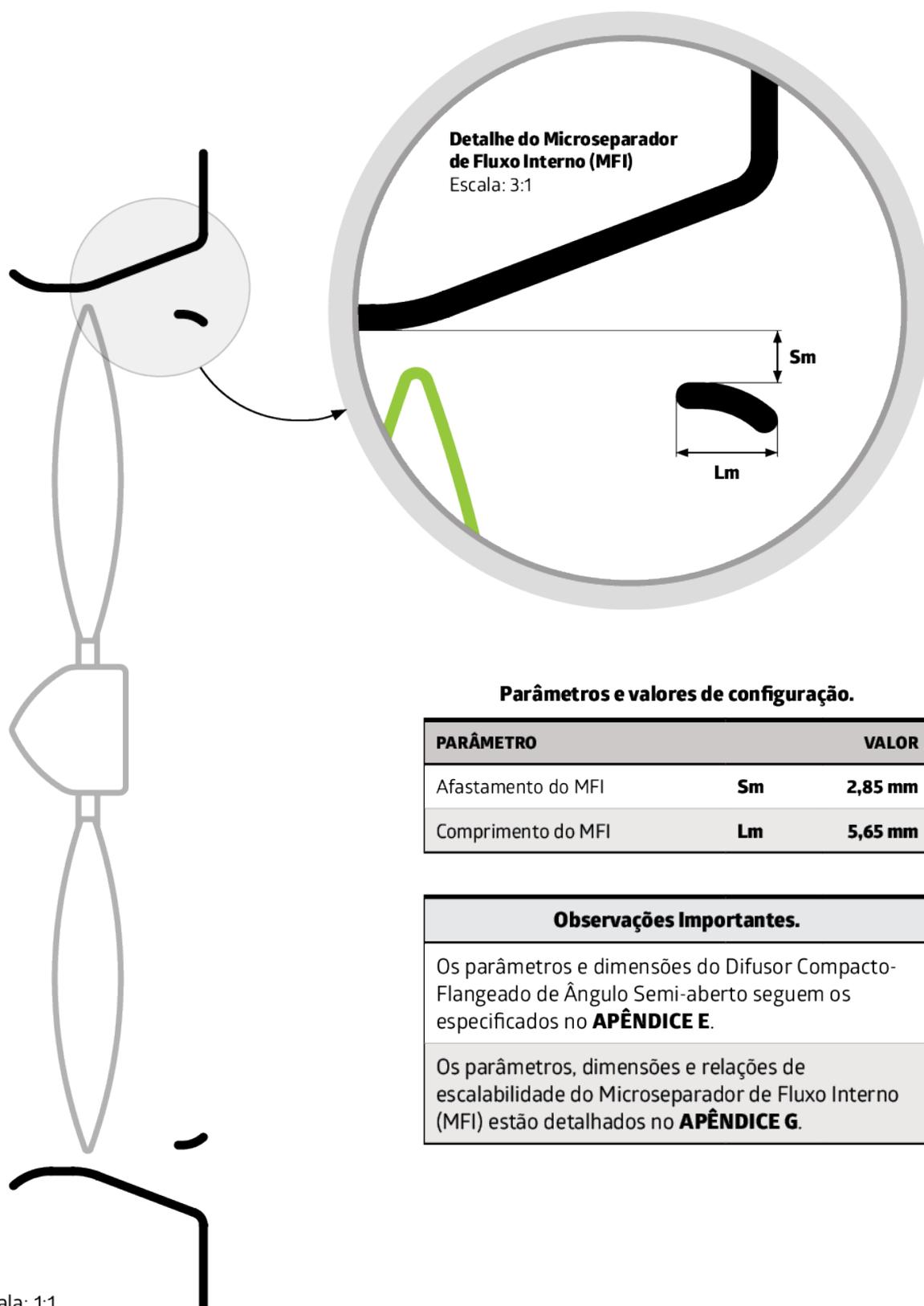
- 1 - Difusor completo**
- 2 - MFI**
- 3 - Vista lateral**
- 4 - Corte A-B**

Escala: 1:1



**APÊNDICE H****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO DE ÂNGULO SEMI-ABERTO  
COM MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)**

Dimensões técnicas e parâmetros de configuração.

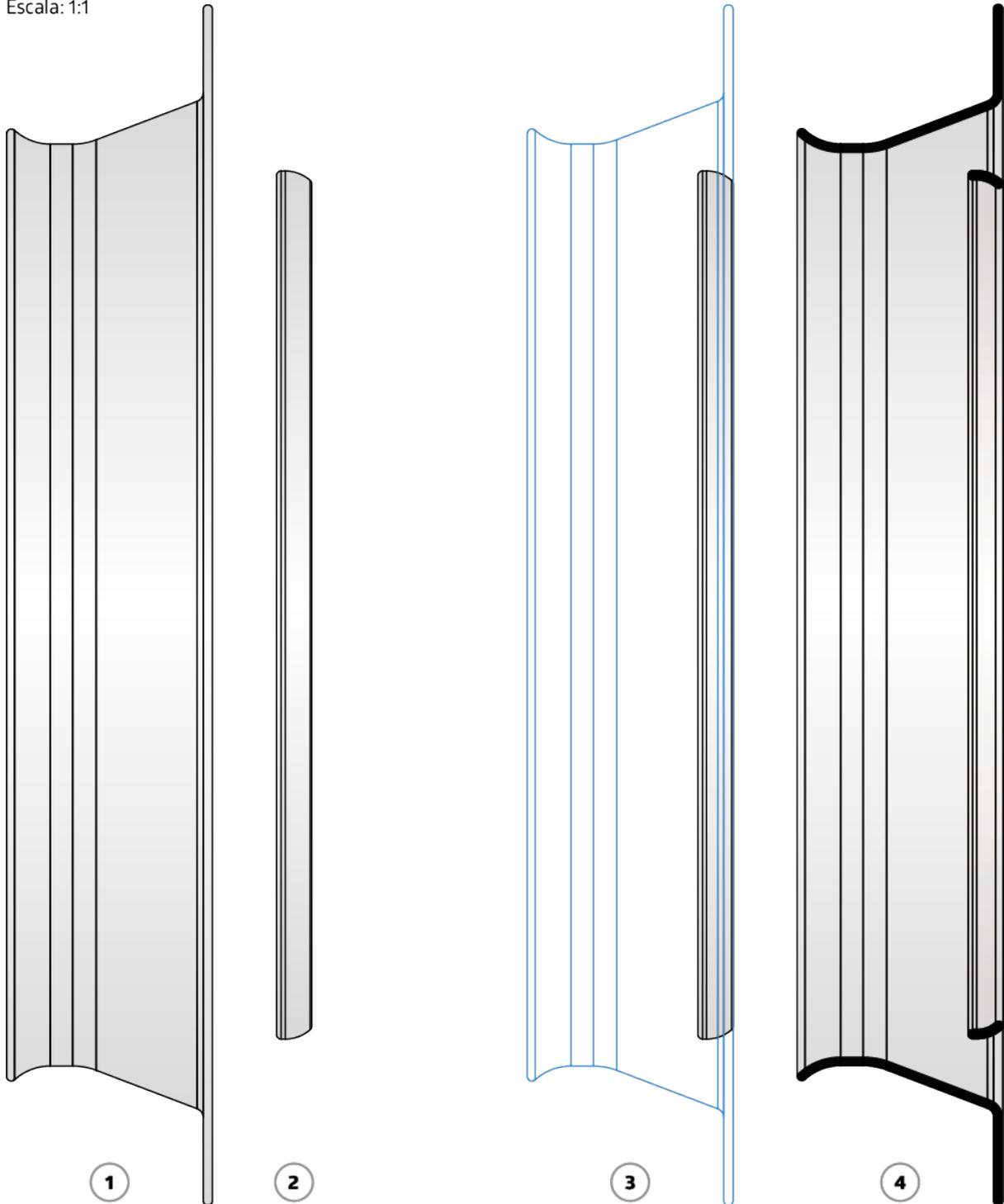


**APÊNDICE H****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO DE ÂNGULO SEMI-ABERTO  
COM COM MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)**

Partes construtivas e corte transversal

- 1 - Difusor completo**
- 2 - MFI**
- 3 - Vista lateral**
- 4 - Corte A-B**

Escala: 1:1

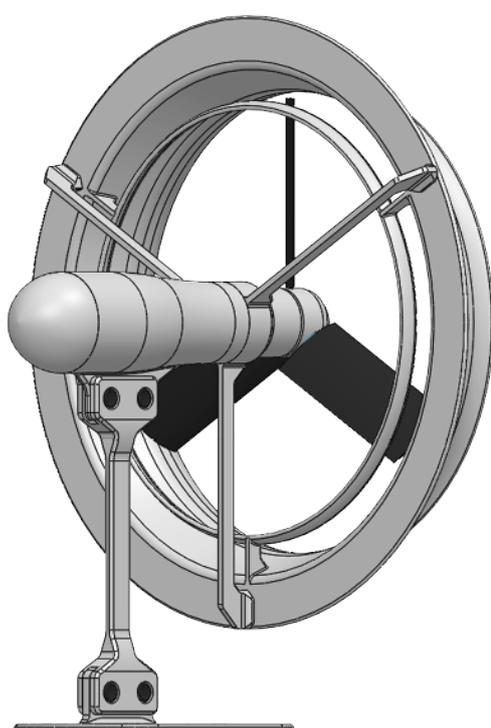
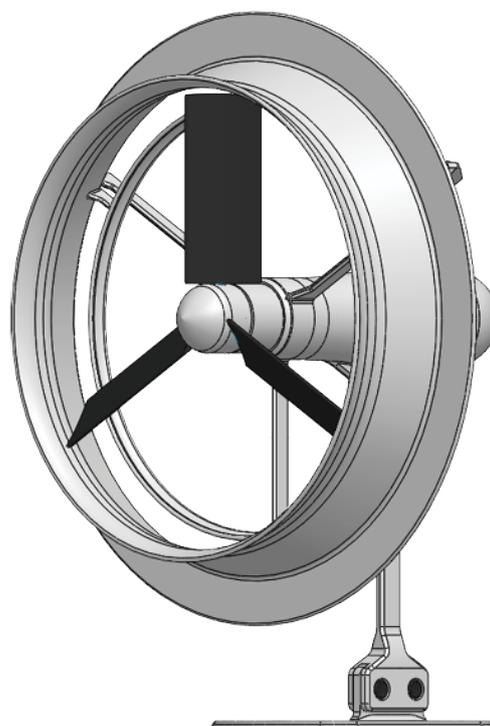


**APÊNDICE H****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO DE ÂNGULO SEMI-ABERTO  
COM COM MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)**

Partes construtivas e corte transversal

**VISTA PERSPECTIVA FRONTAL**

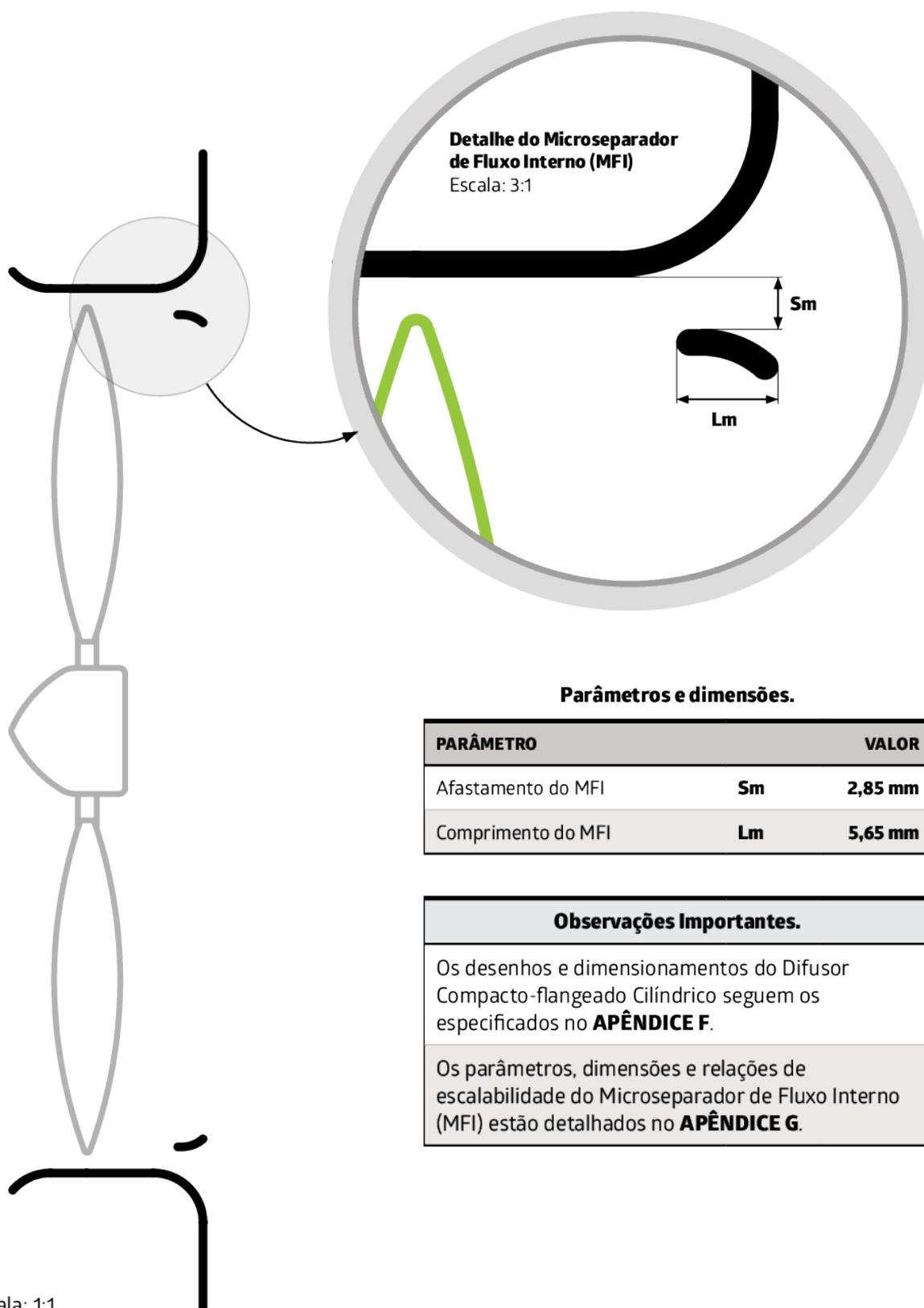
Difusor acoplado em uma  
turbina eólica de pequena escala

**VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR**

Difusor acoplado em uma  
turbina eólica de pequena escala

**APÊNDICE I****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO CILÍNDRICO  
COM MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)**

Desenhos e dimensionamentos.

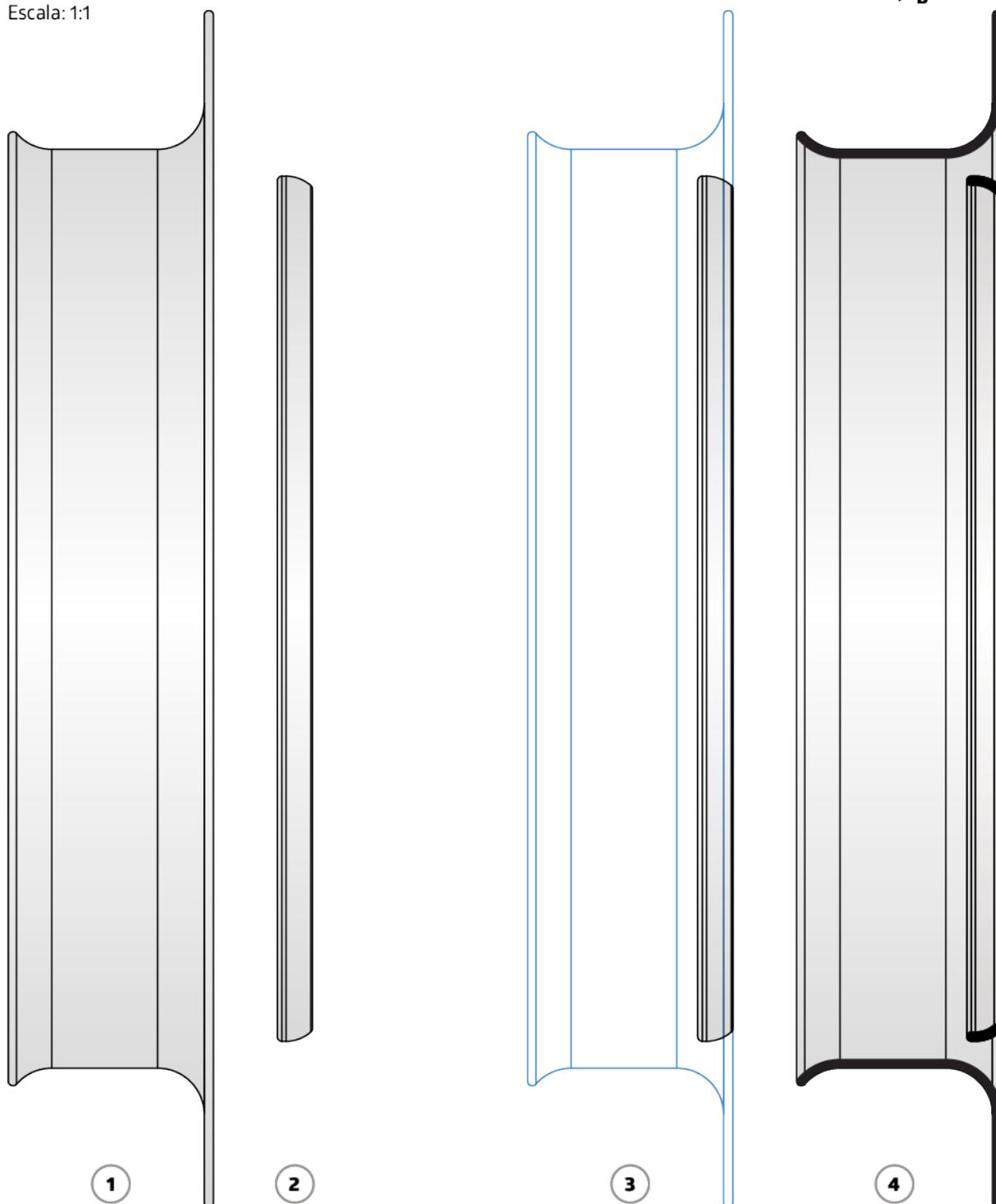


**APÊNDICE I****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO CILÍNDRICO  
COM MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)**

Partes construtivas e corte transversal.

- 1 - Difusor completo**
- 2 - MFI**
- 3 - Vista lateral**
- 4 - Corte A-B**

Escala: 1:1

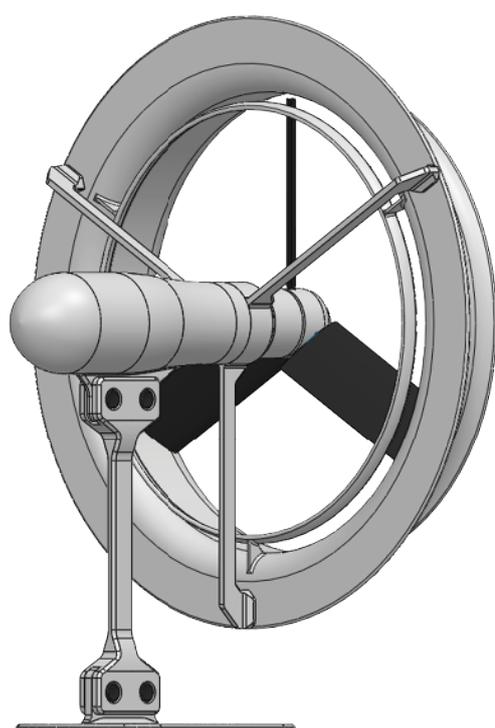
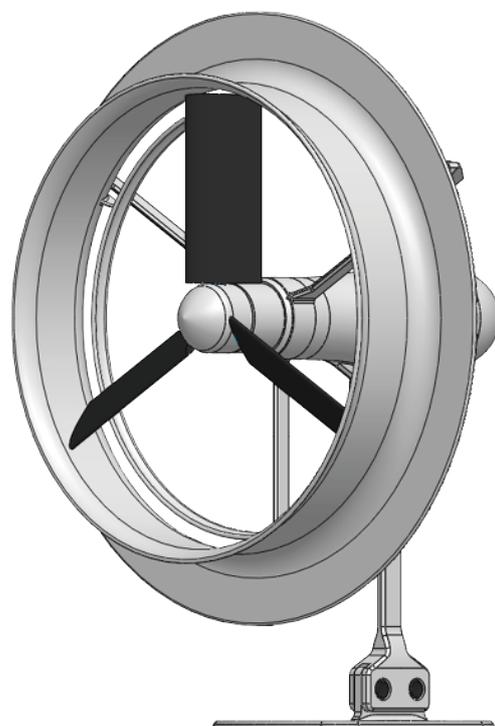


**APÊNDICE I****DIFUSOR COMPACTO-FLANGEADO CILÍNDRICO  
COM MICROSEPARADOR DE FLUXO INTERNO (MFI)**

Vistas projetivas aplicadas.

**VISTA PERSPECTIVA FRONTAL**

Difusor acoplado em uma  
turbina eólica de pequena escala

**VISTA PERSPECTIVA POSTERIOR**

Difusor acoplado em uma  
turbina eólica de pequena escala

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