



**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**

Silvana dos Santos Ramos

**DESIGN DE PÁS PARA MICROTURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2022

**SILVANA DOS SANTOS RAMOS**

**Design de pás para microturbinas eólicas de eixo horizontal**

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

2022

### CIP - Catalogação na Publicação

dos Santos Tamos, Silvana  
Design de pás para microturbinas eólicas de eixo  
horizontal / Silvana dos Santos Tamos. -- 2022.  
127 f.  
Orientador: Luís Henrique Alves Candido.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Design e tecnologia . 2. Design. 3.  
Microturbina eólica de microescala. 4. Pás. I. Alves  
Candido, Luís Henrique, orient. II. Título.

**Silvana dos Santos Ramos**

**DESIGN DE PÁS PARA MICROTURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 16 de dezembro de 2022.

---

**Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva**

Coordenador do Programa de Pós-graduação em Design da UFRGS

**Banca Examinadora:**

---

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

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG/ARQ/UFRGS)

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriane Prisco Petry**

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica  
(PROMECC/UFRGS) – Examinador Externo

---

**Prof. Dr. Hilton Albano Vieira Fagundes**

Departamento de Arquitetura  
(UNISINOS) – Examinador Externo

---

**Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior**

Departamento de Engenharia de Materiais  
(PGDESIGN/UFRGS) – Examinador Interno

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela estrutura disponibilizada, o que permitiu o desenvolvimento deste estudo, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que deu suporte à pesquisa por meio do apoio financeiro, o que tornou possível a dedicação exclusiva a esta pesquisa.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-graduação em Design da UFRGS, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Luís Henrique Alves Cândido, pelos ensinamentos durante o curso, oportunidades e pela confiança.

Em oportuno, agradeço também aos colegas de curso pelos momentos construção de conhecimento de forma colaborativa. Em especial, a Fernando, Regiane e Suzane, por compartilharem o conhecimento e pelo apoio sempre que necessário, o que fez toda a diferença nesta jornada.

Meu agradecimento também à minha família pelo apoio inestimável em todos os momentos desse processo: meu pai Alvino, e minha mãe Vera, minhas irmãs Raquel e Adriana, e meu irmão Márcio, por sempre me incentivarem e acreditarem que seria possível.

Ao meu companheiro Marcelo, obrigada por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis e me fazer sorrir.

Às minhas irmãs de coração, Aila, Juliana, Adriela e Isa, parceiras da vida, obrigada pelos momentos alegres e por estarem torcendo por mim.

O meu muito obrigada a todos os professores, colegas e amigos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para o sucesso deste trabalho.

*“O conhecimento nos faz responsáveis.”  
(Che Guevara)*

## RESUMO

RAMOS, S. S. **Design de pás para microturbinas eólicas de eixo horizontal**. 2022. 127 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

O aumento da demanda energética em nível mundial, em decorrência de mudanças nos padrões de vida, acarretou preocupações com o desenvolvimento de energia limpa, visto que a qualidade de vida de determinada sociedade parece estar associada a distintos aspectos, como o próprio consumo de energia. Com vistas a contribuir para a solução desta problemática, a energia eólica tem recebido investimentos. Nesse âmbito, aventa-se o potencial de aplicação das microturbinas eólicas, pois, por intermédio desses equipamentos, é possível propiciar eletricidade para distintas regiões ou pequenos dispositivos eletrônicos. Considerando essas particularidades, este estudo se concentra em estabelecer um design de pás para microturbina eólica de eixo horizontal, considerando aspectos de dimensionamento e geometria das pás em escala centimétrica, perfis aerodinâmicos, número de pás e ângulo de ataque. Isso porque o design de pás com uma geometria otimizada pode contribuir para melhor desempenho de microturbinas em regimes de ventos fracos ou turbulentos. A metodologia adotada tem abordagem quantitativa, e os procedimentos técnicos são caracterizados como experimentais, pois foram realizadas mensuração de dados. Com base na literatura, foram analisados dois modelos de pás — o tipo hélice e o tipo *loop-type*. Para o dimensionamento dos modelos de pás, utilizou-se a Teoria do Momento do Elemento de Pá (em inglês, *blade element-momentum* [BEM]), atribuindo o coeficiente de potência ótimo, conforme teoria de Betz. Após as definições de ângulos de torção e comprimento de corda de perfil, foram modeladas as duas formas de pás em *software* CAD 3D. Para avaliação dos modelos, foi realizada uma simulação de fluidodinâmica computacional entre as pás por meio do *software* ANSYS Discovery 2022 R2. Além disso, os modelos foram prototipados e testados em um túnel aerodinâmico. Observou-se que o modelo tipo *loop-type* apresenta maior conversão da energia cinética comparado ao modelo tipo hélice.

**Palavras-chave:** Design e tecnologia; microturbina eólica; pás; teoria do momento de elemento de pá; túnel de vento.

## ABSTRACT

RAMOS, S. S. **Design of blades for micro wind turbine horizontal axis**. 2022. 127 p. Thesis (Master in Design) – Engineering School / Faculty of Architecture, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

The increase in global energy demand due to changes in lifestyle patterns has raised concerns about the development of clean energy, as the quality of life of a society seems to be associated with various aspects, including energy consumption itself. In order to contribute to the solution of this issue, wind energy has received investments. In this context, the potential application of micro wind turbines has been considered, as these devices can provide electricity to different regions or power small electronic devices. Considering these characteristics, this study focuses on establishing a blade design for a horizontal-axis micro wind turbine, considering aspects of sizing and geometry of the blades at a centimeter scale, aerodynamic profiles, number of blades, and angle of attack. This is because a blade design with optimized geometry can contribute to better performance of micro turbines under weak or turbulent wind regimes. The methodology adopted has a quantitative approach, and the technical procedures are characterized as experimental since data measurements were performed. Based on the literature, two blade models were analyzed - the helix type and the loop-type type. For the sizing of the blade models, the Blade Element Momentum (BEM) theory was used, assigning the optimal power coefficient according to Betz's theory. After defining the twist angles and profile cord lengths, both blade forms were modeled in a 3D CAD software. To evaluate the models, a computational fluid dynamics simulation was conducted between the blades using ANSYS Discovery 2022 R2 software. Additionally, the models were prototyped and tested in a wind tunnel. It was observed that the loop-type model exhibits higher conversion of kinetic energy compared to the helix-type model.

**Keywords:** Design; Micro wind turbine; blades; blade element-momentum; wind tunnel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Infográfico das etapas de pesquisa .....	26
Figura 2 – Mudança global da produção de energia elétrica, 2015 a 2024 .....	29
Figura 3 – Evolução das alturas das turbinas eólicas .....	33
Figura 4 – Princípio da conversão.....	36
Figura 5 – Classificação das turbinas eólicas .....	37
Figura 6 – Modelos de TEEVs.....	38
Figura 7 – Turbinas <i>upwind</i> e <i>downwind</i> .....	39
Figura 8 – Componentes de um aerogerador .....	40
Figura 9 – Comparação dos tamanhos de turbinas .....	42
Figura 10 – Estudos revisados sobre microturbinas .....	44
Figura 11 – Design de pás <i>looping</i> .....	46
Figura 12 – Modelos comerciais de microturbinas.....	47
Figura 13 – Arquitetura e energia eólica .....	48
Figura 14 – Fluxo de vento através de uma turbina.....	50
Figura 15 – Curva de potência de uma turbina eólica.....	52
Figura 16 – Razão da velocidade da ponta da pá e Coeficiente de Potência .....	54
Figura 17 – Torque em função do raio da pá (mm).....	55
Figura 18 – Perfis aerodinâmico .....	56
Figura 19 – Ângulos e triângulo de velocidade .....	57
Figura 20 – Sustentação e estol.....	58
Figura 21 – Velocidades de fluxo, coeficientes aerodinâmicos e largura incremental ....	61
Figura 22 – Fluxograma da pesquisa .....	69
Figura 23 – Estrutura de aerogerador – estudo de referência 1 .....	72
Figura 24 – Turbina eólica <i>loop-type</i> – estudo de referência 2 .....	73
Figura 25 – Etapas desenvolvimento do modelo de referência.....	74
Figura 26 – Geometria dos perfis selecionados.....	76
Figura 27 – Bergey BW-3.....	78
Figura 28 – Perfil longitudinal e elementos da pá .....	79
Figura 29 – Etapas para modelagem tridimensional da pá.....	82
Figura 30 – Configurações do modelo de pá tipo hélice .....	83
Figura 31 – Configurações do modelo de pá <i>loop-type</i> .....	84
Figura 32 – Diagrama esquemático de modelagem da pá .....	85
Figura 33 – Comparação dos tipos de turbina A) turbina tipo hélice e B) tipo <i>loop-type</i> . 85	

Figura 34 – Detalhes adicionais para prototipação .....	86
Figura 35 – Impressoras Creality CR-200B e Creality Ender 3 .....	86
Figura 36 – Teste de filamento.....	87
Figura 37 – Balança de precisão.....	88
Figura 38 – Peças impressas .....	89
Figura 39 – Componentes da microturbina .....	90
Figura 40 – Mapeamento dos ensaios .....	91
Figura 41 – Interface do ANSYS Discovery .....	92
Figura 42 – Modelo k- $\omega$ SST.....	93
Figura 43 – Túnel de aerodinâmico do LDSM-UFRGS.....	93
Figura 44 – Seção de testes aerodinâmico.....	94
Figura 45 – Instrumentos de medição para os testes .....	95
Figura 46 – Ilustração da Guinada (Yaw) de eixo em relação ao vento incidente.....	95
Figura 47 – Distribuição da velocidade em torno das microturbinas .....	100

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação do número de Reynolds – BW-3 e A18 .....	81
Gráfico 2 – Comparativo velocidade inicial x velocidade final .....	99
Gráfico 3 – Rotação (RPM - mA) x Velocidade (m/s).....	102
Gráfico 4 – Rotação (RPM - mV) x Velocidade (m/s).....	103
Gráfico 5 – Corrente (mA) x Velocidade (m/s) .....	104
Gráfico 6 – Tensão (V) x velocidade (m/s).....	105
Gráfico 7 – Potência elétrica x Velocidade (m/s) .....	105

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos revisados sobre microturbinas - hélice.....	45
Quadro 2 – Classificação do túnel com base na velocidade do fluxo.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação quanto ao porte de turbinas eólicas .....	36
Tabela 2 – Resultados do Número de Reynolds.....	77
Tabela 3 – Eficiência dos perfis selecionados .....	77
Tabela 4 – Parâmetros do projeto definidos .....	79
Tabela 5 – Resultados do dimensionamento da corda e do ângulo de torção .....	80
Tabela 6 – Massas dos modelos.....	87
Tabela 7 – Parâmetros de impressão .....	88
Tabela 8 – Variação percentual entre V1 e V2 .....	98
Tabela 9 – Velocidade de partida.....	101
Tabela 10 – Variação de velocidade de partida .....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ABEEólica</b>	Associação Brasileira de Energia Eólica
<b>ABS</b>	Acrilonitrila butadieno estireno
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>BEM</b>	<i>Blade Element-Momentum</i> (Momento do Elemento de Pá)
<b>CAD</b>	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido 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>CLP</b>	Camada Limite Planetária
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>CRESESB</b>	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
<b>DMLS</b>	Sinterização Direta de Metal a Laser
<b>FA</b>	Faculdade de Arquitetura
<b>FDM</b>	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por Fusão e Deposição)
<b>GW</b>	Gigawatt (1 GW = $1 \times 10^9$ watts = 1 bilhão de watts)
<b>GWEC</b>	<i>Global Wind Energy Council</i> (Conselho Global de Energia Eólica)
<b>HAWT</b>	<i>Horizontal-axis wind turbine</i> (turbina eólica de eixo horizontal)
<b>IEA</b>	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
<b>kW</b>	Kilowatt (1 kW = $1 \times 10^3$ watts = 1 mil de watts)
<b>LDSM</b>	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
<b>LEDs</b>	<i>Light-emitting diode</i> (diodo emissor de luz)
<b>LES</b>	<i>Smagorinsky large eddy simulation</i>
<b>MW</b>	Megawatt (1 MW = $1 \times 10^6$ watts = 1 milhão de watts)
<b>NACA</b>	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
<b>NASA</b>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<b>ODS</b>	Objetivos de desenvolvimento sustentável
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>Pa</b>	Pascal
<b>PGDesign</b>	Programa de Pós-graduação em Design
<b>PLA</b>	Poliácido láctico
<b>RPM</b>	Rotações por minuto
<b>SBC</b>	<i>Schlumberger Business Consulting</i>

<b>SLA</b>	Estereolitografia
<b>SLS</b>	Sinterização seletiva a <i>laser</i>
<b>STL</b>	<i>Standard triangle language</i>
<b>TEEH</b>	Turbinas eólicas de eixo horizontal
<b>TEEV</b>	Turbinas com eixo vertical
<b>TSR</b>	<i>Tip-speed-radio</i> (Velocidade de ponta de pá)
<b>UFRGS</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<b>VAWT</b>	<i>Vertical-axis wind turbine</i> (turbina eólica de eixo vertical)
<b>W</b>	Watt
<b>TW</b>	Terawatts (1 TW = $1 \times 10^{12}$ watts = 1 trilhão de watts)
<b>SC</b>	<i>Smart city</i>
<b>SG</b>	<i>Smart grids</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos latinos

$A_1$	Área que a esteira aerodinâmica possui antes da turbina [m <sup>2</sup> ]
$A_3$	Área que a esteira aerodinâmica possui depois da turbina [m <sup>2</sup> ]
$A_{\text{útil}}$	Área útil da turbina [m <sup>2</sup> ]
$A$	Área varrida pelo rotor da turbina [m <sup>2</sup> ]
$C_p$	Coefficiente de potência [%]
$C_{p_{\text{Betz}}}$	Coefficiente de potência ideal [%]
$C_L$	Coefficiente de sustentação [-]
$L$	Comprimento [m]
$C_r$	Corda do perfil aerodinâmico [m]
$D$	Diâmetro externo [m]
$d$	Diâmetro interno [m]
$d_D$	Força de arrasto [N]
$d_L$	Força de sustentação [N]
$d_r$	Largura incremental [m]
$Ma$	Número de Mach [-]
$Re$	Número de Reynolds [-]
$P$	Potência de saída [W]
$P_d$	Potência disponível no vento [W]
$P_{\text{ext}}$	Potência extraída [W]
$P_{\text{mec}}$	Potência mecânica [W]
$P_n$	Potência nominal [W]
$r$	Raio local [m]
$R$	Raio da turbina [m]
$n_f$	Rotação do rotor da turbina
$n$	Número de pás [-]
$T$	Torque [Nm]
$V_1$	Velocidade de entrada [m/s]
$V_3$	Velocidade de saída [m/s]
$U$	Velocidade do fluxo [m/s]
$v_{\infty}$	Velocidade do vento [m/s]

$v_n$	Velocidade do vento nominal [m/s]
$W$	Velocidade relativa [m/s]
$V_2$	Velocidade retirada pela turbina [m/s]
$u_{(r)}$	Velocidade tangencial [rad/s]
$v_2$	Vento incidente [m/s]
$2D$	Duas dimensões: x;y
$3D$	Três dimensões: x;y;z

#### Símbolos gregos

$\alpha_A$	Ângulo de ataque [°]
$\beta(r)$	Ângulo de torção [°]
$\gamma$	Ângulo formado entre o vento relativo ( $W$ ) e vento incidente ( $v_2$ ) [°]
$\rho$	Densidade do ar [kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	Eficiência do sistema [-]
$\lambda$	Razão de ponta da pá [-]
$\omega$	Velocidade angular [rad/s]
$\mu$	Viscosidade dinâmica do ar [Kgfs/m <sup>2</sup> ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	21
1.2	PROBLEMA	22
1.3	HIPÓTESE	22
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	Objetivo Geral	22
1.4.2	Objetivos Específicos	22
1.5	JUSTIFICATIVA	23
1.6	ESTRUTURA DA PESQUISA	25
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>27</b>
2.1	REFLEXÕES SOBRE O CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS	27
2.2	ENERGIA EÓLICA	31
2.2.1	Turbinas eólicas	35
2.2.2	Tipos de turbinas eólicas	37
2.2.3	Microturbinas eólicas	41
2.3	DESIGN DE PÁS EÓLICAS	49
2.3.1	Velocidade nominal do vento	49
2.3.2	Coeficiente e curva de potência	50
2.3.3	Razão de velocidade de ponta de pá	53
2.3.4	Número de pás	54
2.3.5	Aerofólio	56
2.3.6	Número de Reynolds	59
2.3.7	Diâmetro da turbina	60
2.3.8	Dimensionamento: Teoria Momento de Elemento de Pá	61
2.4	TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS EXPERIMENTAIS	62
2.4.1	Túnel de vento e túnel aerodinâmico	63
2.4.2	Fluidodinâmica computacional	64
2.4.3	Impressão 3D	65
2.4.4	Instrumentos de medição	66
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>68</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	68
3.2	ETAPAS DA PESQUISA	68

3.3	PROBLEMATIZAÇÃO	71
3.3.1	Estudos de referência	71
3.3.2	Restrições do projeto	73
3.3.3	Determinação das variáveis do projeto	73
3.4	IDEAÇÃO	74
3.4.1	Geometrização	74
3.4.2	Parâmetros do projeto	79
3.4.3	Modelagem 3D	81
3.5	PROTOTIPAÇÃO	85
3.5.1	Microturbina	89
3.6	EXPERIMENTAÇÃO	90
3.6.1	Simulação CFD – análise da velocidade a jusante	91
3.7	ENSAIOS EM TÚNEL AERODINÂMICO	93
3.7.1	Determinação experimental de velocidade de partida	96
3.7.2	Determinação experimental – RPM	96
3.7.3	Levantamento de curva de potência elétrica	96
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>98</b>
4.1.1	Análise da velocidade à jusante	98
4.1.2	Determinação experimental de velocidade de partida	101
4.1.3	Determinação experimental da velocidade de angular	102
4.1.4	Levantamento de curva de potência elétrica	104
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>107</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	109
5.2	PRODUÇÃO ACADÊMICA E CIENTÍFICA COMPLEMENTAR	109
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS DE DESEMPENHOS DOS AEROFÓLIOS</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE B – IMPRESSÕES 3D</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE C – TÚNEL AERODINÂMICO</b>	<b>121</b>
	<b>APÊNDICE D – LISTA DE CHECAGEM</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE E – DADOS TABULADOS</b>	<b>125</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços industriais e tecnológicos do século XX transformaram a relação entre a sociedade e o meio ambiente, incluindo a extração de recursos energéticos. Com o aumento do desenvolvimento tecnológico, além de ser utilizada para crescimento industrial e melhoria do padrão de vida, a energia passou a ser também imprescindível para suprir as necessidades cotidianas provenientes dessa evolução, o que gerou alta demanda desse recurso.

Atualmente, a principal fonte de energia mundial é procedente de recursos não renováveis originados de combustíveis fósseis. Em decorrência, o uso desses combustíveis provoca distintos impactos ambientais, como a produção de gases de efeito estufa, que aumentam a temperatura média dos oceanos e da atmosfera e causam aquecimento global (ROSA, 2015). Ao mesmo tempo, também tem sido observada uma preocupação em repensar o uso de recursos energéticos, pois, além de suprir as necessidades do presente, é preciso conservá-los para as futuras gerações — um dos pontos centrais da sustentabilidade (W.C.E.D, 1987).

Neste cenário, tecnologias energéticas sustentáveis, oriundas de recursos continuamente abastecidos pela natureza, como energias solar, eólica, geotérmica, hídrica e biomassa, são cada dia mais importantes para diminuição dos prejuízos ambientais. Isso significa que elas podem ser usadas como fontes alternativas para prover as necessidades energéticas e econômicas mundiais, considerando as discussões sobre desenvolvimento sustentável.

No Brasil, a principal fonte da matriz elétrica advém de usinas hidrelétricas, seguidas da biomassa. Atualmente, contudo, a energia eólica parece ser uma das mais promissoras fontes de energia, cuja contribuição vem aumentando progressivamente (EPE, 2022), e, embora tenha sido observado avanço relacionado às energias advindas de fontes naturais, ainda é preciso aprimorar as questões políticas, para melhores planejamento e uso desses recursos em longo prazo, ponderando fatores sociais, econômicos e climáticos.

Em âmbito mundial, a energia eólica cresceu significativamente nos últimos anos e pode ser caracterizada como uma fonte de energia limpa, capaz de promover desenvolvimento econômico local. Isso porque os parques eólicos podem ser usados simultaneamente para a agricultura e geração de energia, por exemplo.

O processo de transformação de energia eólica, que ocorre quando as turbinas, em contato com o vento, produzem energia mecânica, está intrinsecamente associado à densidade do ar, à área coberta pela rotação das pás e à velocidade do vento.

Considerando um aspecto mais específico, há o conceito de mini e microgeração de energia elétrica, que engloba sistemas de fonte de energia renovável com potência igual ou até 75kw, possibilitada pela instalação de pequenas turbinas eólicas (ANEEL, 2015; BRASIL, 2022). Para melhor desempenho, o tempo de inicialização da máquina e proveito do potencial eólico, em ventos de baixa velocidade, são imprescindíveis para um projeto de microturbinas eólicas.

As microturbinas eólicas assumem grande potencial de aplicação, pois podem prover eletricidade para regiões remotas ou suprir a demanda de pequenos dispositivos eletrônicos. Para isso, um bom projeto aerodinâmico de pá, elemento da turbina responsável por interagir com o vento, convertendo parte da energia cinética em trabalho, é fator fundamental para a eficiência da máquina.

Ainda, é preciso inovar e criar soluções eficazes e acessíveis, com a possibilidade de aplicar a energia em produtos industriais que, atualmente, geram impacto no ecossistema. Assim, o desafio do design é propor inovações energéticas que solucionem as necessidades sociais, as quais ultrapassam fatores ecológicos e tecnológicos.

Com fundamento nesses aspectos, a presente pesquisa busca desenvolver um design de pás otimizado para microturbinas de eixo horizontal, com a finalidade de produzir microgeração de energia em ventos de baixa velocidade. O estudo se concentra no dimensionamento e na geometria das pás em escala centimétrica, analisando o comportamento aerodinâmico, como a velocidade de partida e a potência. Também objetiva gerar informações técnico-científicas para futuros projetos na área de Design. A pesquisa é caracterizada metodologicamente como quantitativa e, quanto aos procedimentos técnicos, define-se como experimental mediante a mensuração de dados, em que são utilizados ensaios controlados, analisados por meio de ferramentais virtuais, e túnel de vento, com uso instrumentos de medição.

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo se concentra em estabelecer um design de pás para microturbina eólica de eixo horizontal, considerando aspectos de dimensionamento e geometria das pás em escala centimétrica, perfis aerodinâmicos, número de pás e ângulo de ataque. O design de pás é um aspecto importante no desenvolvimento de turbinas eólicas, pois é o elemento que, em contato com o fluido, cria o diferencial entre pressões, o que resulta em sustentação. Com relação ao vento, o projeto é previsto para um ambiente urbano, caracterizado por ventos de baixa velocidade, altos níveis de turbulência e direção com velocidade instável. Além disso, verificou-se um potencial de investigação através da

pesquisa realizada no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) do PGDesign da UFRGS, em que foram identificados perfis *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) para design de pás para microturbinas, com análise da variação de ângulos de passos.

## 1.2 PROBLEMA

A problematização da pesquisa está fundamentada na seguinte investigação: como otimizar a geometria de pás para microturbina eólica visando à melhor relação entre a velocidade de partida e a potência em baixas velocidades de vento?

## 1.3 HIPÓTESE

O design de pás com uma geometria otimizada — considerando os perfis aerodinâmicos, ângulos de ataque, dimensionamento longitudinal, ângulo de torção e harmonização da forma — pode contribuir para melhor desempenho de microturbinas em regimes de ventos fracos ou turbulentos. Isso porque a geometria é essencial para que o microgerador eólico comece a produzir energia mecânica em baixas velocidades de vento.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral desenvolver um design de pás otimizado para microturbinas de eixo horizontal para microgeração de energia.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- apontar os principais conceitos de design de pás para microturbina eólica;
- estabelecer parâmetros projetuais para os modelos tridimensionais;
- elaborar modelos físicos para os ensaios experimentais;
- analisar e comparar o desempenho dos modelos desenvolvidos por intermédio da simulação fluidodinâmica computacional e ensaios experimentais.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Pensar em formas de amenizar os prejuízos provocados ao meio ambiente com a extração de recursos energéticos, na equidade social e na prosperidade econômica é um dos grandes desafios contemporâneos. Percebe-se, contudo, o interesse público em minimizar os impactos causados pela produção de energia e, por isso, buscam-se alternativas a esse cenário.

Projetar com foco na sustentabilidade tem se tornado cada vez mais relevante, e as inovações tecnológicas e científicas possibilitam novas abordagens de desenvolvimento de tecnologias energéticas renováveis. Ao analisar a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, proposta em 2015 pela Organização das Nações Unidas (ONU), por chefes de Estado e pela sociedade civil, nota-se um esforço conjunto para promover um crescimento econômico sustentável, inclusivo e equitativo, sobretudo se considerados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) sustentados nesse plano de ações. Um dos mencionados objetivos está relacionado ao acesso confiável, sustentável, moderno e com preços acessíveis de energia para todas as pessoas e propõe o aumento de fontes renováveis na matriz energética global. É importante mencionar que cerca de 10% da população do planeta não tem acesso a serviços de eletricidade (ONU, 2015, 2021). Logo, o desenvolvimento de estudos referentes a essa temática de pesquisa vai ao encontro do acordo global sobre mudança climática.

Em tal contexto, o design pode propiciar novas propostas para a sociedade, contribuindo com o conceito de desenvolvimento sustentável. O designer, como criador de soluções e de concepções de produtos, apresenta-se como colaborador importante para tal processo. Investigar a inovação de produtos com tecnologias energéticas sustentáveis integra áreas temáticas relevantes para o design de produtos e, por esse motivo, é interdisciplinar e compreende implementações de métodos e procedimentos que consideram questões ecológicas, sociais e culturais (MANZINI, EZIO; VEZZOLI, 2005; PEREIRA, 2003; REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

Muitas tecnologias de produção de energia sustentável atingiram certo nível de maturidade e são utilizadas em sistemas de distribuições de energia para pequenos, médios e grandes consumidores. Porém, a aplicação deste tipo de tecnologia em produtos está além dessas possibilidades. É possível que, ao utilizar esses recursos no design de produtos e serviços, sejam criadas alternativas energeticamente eficientes (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

No contexto urbano, o planejamento das cidades com o foco na sustentabilidade vem ganhando espaço em debates de âmbito social, econômico e ecológico nos últimos

anos. O processo de crescimento urbano ocorreu rapidamente e, em algumas metrópoles, ocasionou problemas ambientais e organizacionais, econômicos e sociais, o que gera uma reflexão sobre a tomada de ações frente a essas questões. Debater o futuro das cidades é essencial, visto que os impactos do crescimento urbano demandam soluções criativas, inclusivas e inovadoras.

Algumas propostas para solução desses problemas são apresentadas na literatura científica com os seguintes termos: cidades inovadoras; cidades sustentáveis; cidades criativas; cidades digitais; cidades globais; e, mais recentemente, *smart city* (SC) ou cidades inteligentes. No último termo, propõe-se uma espécie de desenvolvimento que converge com o conceito de desenvolvimento urbano inteligente e sustentabilidade, com foco na melhoria de vida dos cidadãos (DAROS; KISTMANN; ZAINA, 2014).

Segundo Neirotti *et al.* (2014), alguns aspectos devem ser considerados para aplicações de soluções voltadas à SC, como o uso e a exploração e otimização de ativos tangíveis; por exemplo: recursos naturais e energia e infraestrutura, além de ativos intangíveis, como capital humano e intelectual. Várias abordagens sobre a definição de SC dizem respeito a dois fatores: como as cidades podem se orientar para atingir esse objetivo de otimização e os domínios mais críticos para o uso mais inteligente dos recursos urbanos. Os recursos naturais e a energia, no contexto de atuação na SC, estão relacionados a *smart grids* (SG), redes de eletricidades inteligentes que utilizam a tecnologia de informação e comunicação com foco em eficiência, confiabilidade, sustentabilidade e autossuficiência (DAROS; KISTMANN; ZAINA, 2014).

Segundo Daros, Kistimann e Zaina (2014), o design pode contribuir com a transformação da sociedade, entendendo as necessidades materiais e comportamentais dos indivíduos e indicando soluções. Aplicando os conceitos de SC, é possível propor produtos que reaproveitem ou gerem energia para produtos, sistemas ou, ainda, habitações, assim como desenvolver meios de transporte elétrico ou que utilizem energia renovável e identificar oportunidades de desenvolvimento de produtos que busquem a geração de energia. O desenvolvimento de dispositivos, equipamentos, eletrodomésticos, veículos elétricos que incorporem soluções, como painéis solares e fotovoltaicos, energia eólica, também pode ser considerado nesse contexto.

Com fundamento no exposto, justificam-se as pesquisas sobre microturbinas eólicas, pois se constituem em uma alternativa de fonte de energia limpa e renovável. Além disso, aprofundar estudos que aprimoram a escala e a eficiência por meio de projetos de pás destinadas à microturbina pode gerar novas soluções de produtos com foco no desenvolvimento sustentável. Conforme Pinto (2013), algumas microturbinas

eólicas são produzidas para que seja possível a execução de várias tarefas simultaneamente, quais sejam, carregar baterias de veículos elétricos, fornecer energia para iluminação e gerar potência para residências localizadas em locais remotos, onde não há fornecimento de eletricidade por concessionária.

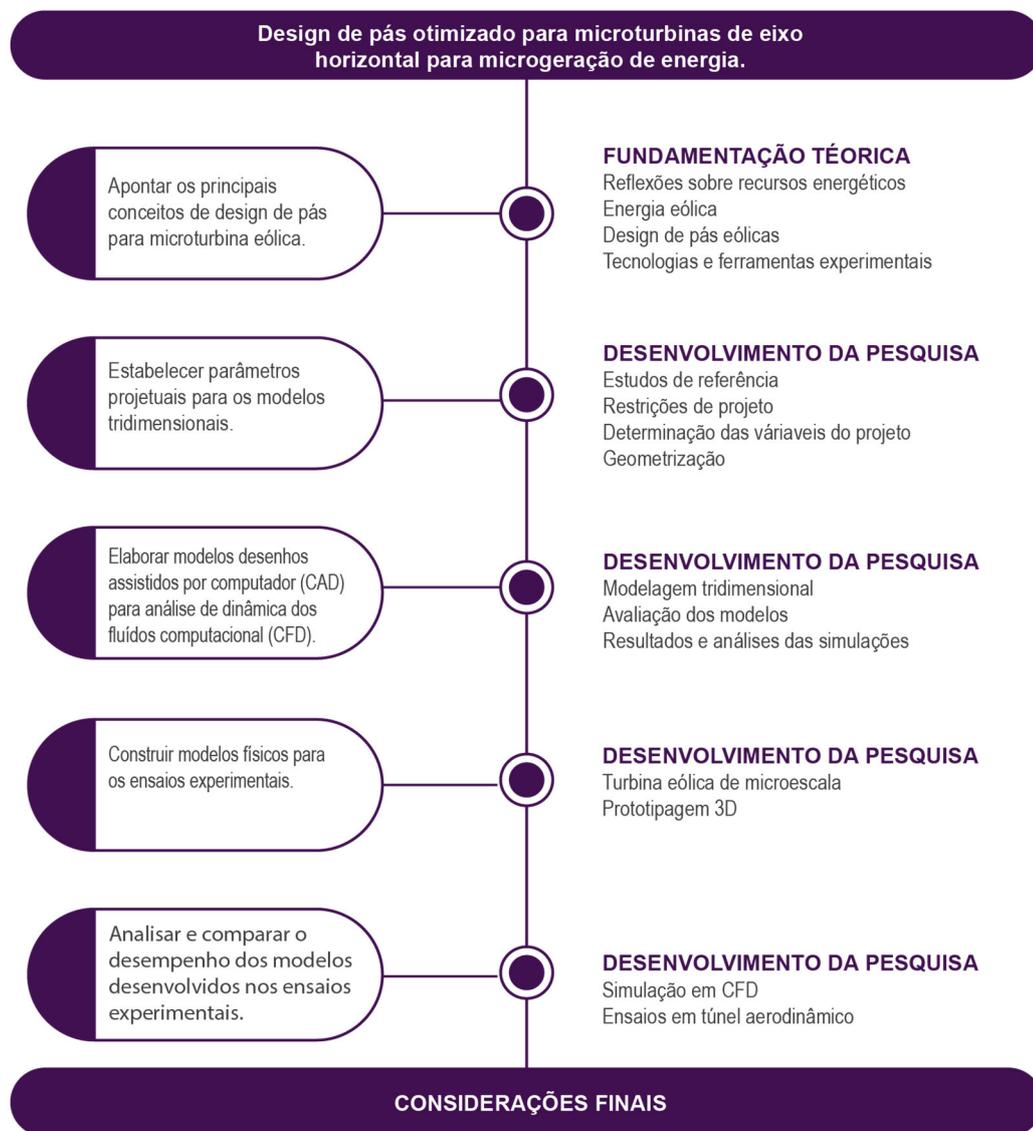
Por fim, outro aspecto que justifica este estudo é a colaboração com pesquisas relacionadas à microgeração de energia eólica já desenvolvidas no LDSM da UFRGS, o que torna pertinentes a continuidade da discussão e a investigação dessa temática com vistas a contribuir para consolidação acadêmica na área do design de microgeradores de energia.

## 1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este estudo está organizado em cinco capítulos. No primeiro, apresentam-se a introdução, a delimitação do tema, os objetivos e a hipótese justificativa do estudo. No segundo capítulo, inicia-se a fundamentação teórica; nesta etapa, serão discutidos assuntos relacionados à temática, como recursos energéticos, energia eólica, design de pás eólicas, além de tecnologias e ferramentas experimentais. No terceiro capítulo, são apresentadas a metodologia do estudo e as etapas da pesquisa, especificando-as para atingir os objetivos. No quarto capítulo, é apresentado o desenvolvimento da pesquisa e, no quinto capítulo, são expostos os resultados e as considerações finais.

Para sistematizar didaticamente todas as etapas da pesquisa, foi desenvolvido um esquema visual, em forma de infográfico, associando-se com os objetivos específicos, conforme Figura 1.

Figura 1 – Infográfico das etapas de pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresentam-se sucintamente os principais conceitos relativos ao tema da pesquisa. Para tanto, a fundamentação teórica foi organizada em quatro etapas: reflexões sobre o consumo de recursos energéticos, em que se discorre sobre alguns conceitos de energia e a relação com a sociedade; considerações sobre energia eólica, em que há breves apontamentos sobre energia eólica, evolução de turbinas, contextualização da energia eólica no cenário mundial e nacional, tipos de turbinas eólicas, microturbinas e estudos relevantes. Ainda, são discutidas ponderações sobre design de pás eólicas, em que se apresentam conceitos sobre perfis aerodinâmicos, número de pás em turbinas eólicas, número de Reynolds ( $Re$ ) e parâmetros de projeto para pás de turbinas eólicas; e, por fim, aspectos relacionados a tecnologias e ferramentas experimentais, em que se abordam considerações sobre túnel de vento aerodinâmico virtual e físico, bem como dispositivos de mensuração.

### 2.1 REFLEXÕES SOBRE O CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS

A energia se conserva na natureza, e uma parcela da energia que a Terra recebe do sol não é aproveitada. Segundo Rosa (2015), existe um equilíbrio entre a entrada e a saída de energia no planeta. A entrada de energia é praticamente proveniente da radiação solar, cuja quantidade gira em torno de 173.000TW. Além disso, há contribuições das marés (3TW) e das fontes de calor internas do próprio planeta, a maioria radioativa (32TW). Esse equilíbrio é oscilatório, porém teme-se que, com o aumento de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) observado nas últimas décadas — provocado por destruições de florestas e combustão de uma vasta quantidade de combustíveis fósseis —, possa haver um aquecimento mundial geral, o que resultaria no derretimento parcial das geleiras e na consequente alteração das condições climáticas.

A utilização da energia pelo homem depende de vários fatores e, analisando tecnicamente, relaciona-se “com a transformação da energia de que dispomos na natureza em formas de energia de que necessitamos. A ideia de energia mais comum está na capacidade de realizar trabalho” (SIMABUKULO *et al.*, 2017).

A energia apresenta-se de diversas formas: térmica, mecânica, cinética, potencial, elétrica, magnética, química e nuclear. Existem diversos processos que a transformam de uma forma para outra, tornando-se úteis para as necessidades do homem. O processo de transformação da energia é regido pelos princípios da termodinâmica, área da física

que explica os mecanismos de transferência de energia térmica para realizar algum tipo de trabalho (MANZINI, EZIO; VEZZOLI, 2005).

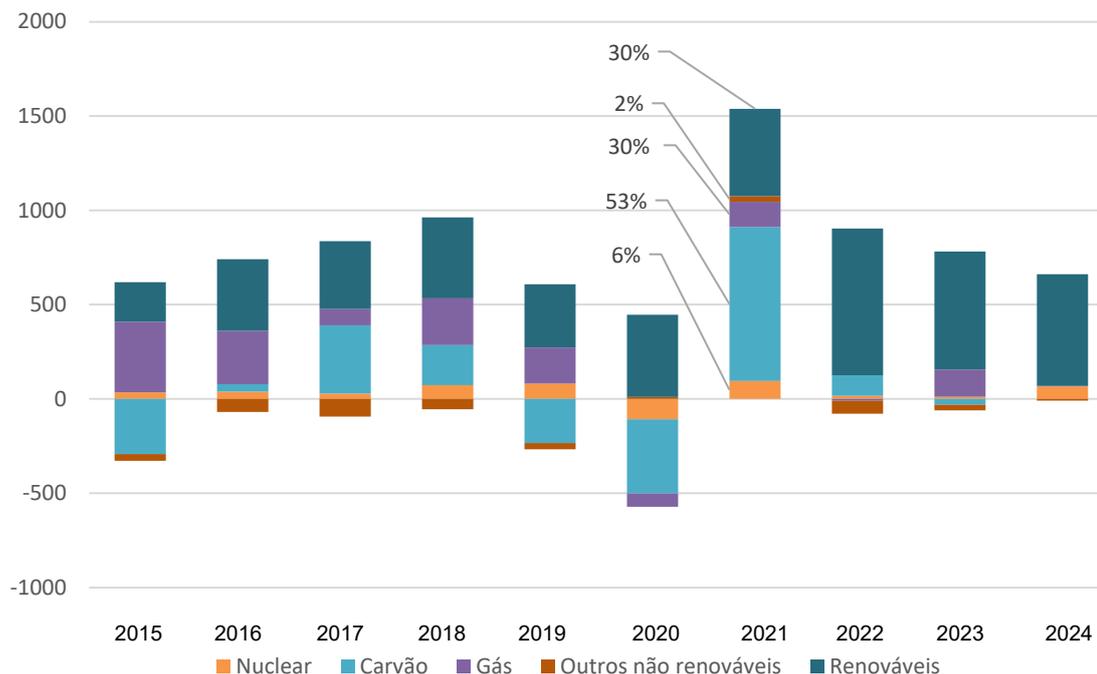
No que diz respeito às fontes de energia, as quais formam a matriz energética, é possível encontrar fontes fósseis, provenientes de petróleo, carvão mineral, gás natural, xisto betuminoso, entre outras, que são fruto de um processo de longas eras, ou seja, a matéria orgânica dos seres que pereciam se acumulou no subsolo terrestre. Elas foram categorizadas como não renováveis, pois sua reposição requer um longo tempo geológico. Ainda, existem as fontes repostas imediatamente pela natureza, denominadas fontes de energia renováveis, as quais envolvem potenciais hidráulicos, eólicos, energia das marés e das ondas, radiação solar, energia geotermal e biomassa (LUCON; GOLDEMBERG, 2007).

Atualmente, a maior parte da energia utilizada no mundo provém de fontes não renováveis — cerca de 85% da energia utilizada no momento prescinde de combustível fóssil (NEWELL; RAIMI; ALDANA, 2019). Observa-se que o uso de energia vem crescendo gradativamente: a demanda por energia primária aumentou 5,8% em 2021, superando os níveis de 2019 em 1,3%. Esse avanço, além de ser impulsionado pelo crescimento populacional e econômico, resulta das emissões de carbono, que cresceram 2,9% (BP, 2022).

A demanda de energia elétrica global aumentou 6% em 2021, ritmo mais acelerado desde 2010. As energias renováveis e nuclear atenderam boa parte do crescimento e, além disso, a produção de energia por usinas de carvão e gás natural cresceram consideravelmente (IEA, 2022). De acordo com Dale (2019), a metade do aumento da demanda global de energia está relacionada com o setor de energia elétrica, em resposta ao maior consumo de eletricidade, cujo crescimento pode ser atribuído às mudanças nas condições climáticas. Nos últimos anos, a necessidade de uso condicionamento térmico artificial do ambiente construído, principalmente no durante o verão, foi significativamente maior, como exemplo, em 2018 foi considerado o quarto ano mais quente já registrado em todos os tempos. Da mesma forma, os invernos na América do Norte, cujas temperaturas estiveram abaixo da média, aumentaram o alerta sobre o aquecimento global (DALE, 2019).

Na Figura 2, é possível observar as mudanças globais na geração de eletricidade, de 2015 até 2021 e as projeções para 2022 a 2024. Nota-se que, em 2021, grande parte da demanda energética é proveniente de fontes não renováveis, como carvão, petróleo, gás natural e energia nuclear. As energias renováveis representam apenas 30% da matriz energética, o que demonstra a possibilidade de ampliação dessas fontes energéticas.

Figura 2 – Mudança global da produção de energia elétrica, 2015 a 2024



Fonte: Adaptada de IEA (2022).

Uma tendência significativa evidenciada pelo gráfico é a transição para fontes de energia renovável. A participação da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, como energia eólica, solar, hidrelétrica e biomassa, está em constante crescimento. Isso reflete os esforços para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Por outro lado, observa-se um declínio na geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis, como carvão e gás natural. Isso está relacionado às preocupações com as emissões de gases poluentes e ao desejo de reduzir a dependência de combustíveis não renováveis.

Essas tendências destacam o reconhecimento global da necessidade urgente de lidar com as mudanças climáticas e promover uma transição para fontes de energia mais sustentáveis.

No cenário brasileiro, as fontes renováveis contribuem com 48,4% de participação na matriz energética, ao passo que, no mundo, é de aproximadamente de 6%. A matriz energética elétrica do País é bem diversificada, e sua principal base é a hidráulica, seguida das energias fósseis e eólica. Assim como no resto do mundo, a utilização da energia eólica tem avançado também no Brasil (EPE, 2022).

Embora a contribuição da energia renovável tenha aumentado em 2021 na matriz energética mundial, de acordo Rosa (2015), é lamentável que a maioria dos recursos

renováveis — como os geotérmicos, a biomassa, o solar e o eólico — pouco contribuiu no cenário de energia. Muitas fontes de petróleo facilmente acessíveis já foram utilizadas e, para as que restam, há um processo de extração cada vez mais oneroso. Portanto, além da questão ecológica, parte do problema para uso dessa fonte também é econômico.

Por volta dos últimos cinco anos, houve rápido crescimento de energia renovável aliado à redução do consumo de carvão, o que levou a uma melhoria na intensidade de carbono do emitido pelo setor elétrico, de modo que o impacto do aumento da demanda de energia sobre a emissão de CO<sub>2</sub> foi parcialmente compensado. Esse crescimento, porém, não é suficiente para “descarbonizar” o setor de energia elétrica com rapidez suficiente para compensar a demanda populacional (DALE, 2019).

Considerando que, por um lado, o principal desafio nas economias ocidentais e emergentes é reduzir o consumo de energia e adaptar-se a conversões energéticas sustentáveis, nota-se, por outro lado, que grande parte da humanidade ainda não tem acesso a serviços de energia (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012). No mundo, em 2017, o número de pessoas sem acesso à eletricidade foi reduzido para cerca de 10%, mas, apesar do avanço, o progresso continua desigual (IEA, 2018): para muitas pessoas que vivem na Ásia e na África subsaariana, por exemplo, onde o grau de disponibilização de rede elétrica é baixo, esse serviço ainda não foi disponibilizado. O desenvolvimento de soluções energéticas para essa parte da população mundial é um desafio, e o acesso universal a serviços energéticos acessíveis e confiáveis é um dos ODS estabelecidos pela ONU, com a intenção de serem alcançados até 2030 (ONU, 2015).

A falta de energia, principalmente elétrica, contribui para as dificuldades em suprir necessidades básicas, como educação, saúde, segurança, assistência médica, infraestrutura adequada, fornecimento de água limpa e de saneamento básico. Além da parcela que não possui acesso à eletricidade, há ainda situações em que a população está conectada à rede, porém a qualidade do fornecimento de energia elétrica não é estável, com duração apenas entre minutos e horas por dia. Consequentemente, nessas situações, é necessário o uso de geradores a diesel ou de fontes de iluminação alternativas, como velas, lanternas de querosene e lâmpadas a gás, para fornecer luz, sobretudo à noite (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

Acredita-se que o acesso à energia limpa, acessível e confiável é fator fundamental para crescimento econômico e sustentável, bem como para o bom desenvolvimento social. Segundo Gradl e Knobloch (2011), a energia é necessária para muitas áreas da sociedade: assim como os agricultores precisam de bombas para irrigar seus campos, as oficinas necessitam de energia para alimentar máquinas e fornecer serviços por meio de

computadores e dispositivos de telecomunicações modernos; em hospitais, a energia também é fundamental para manter vacinas e recursos em funcionamento. Além disso, a energia também proporciona perspectivas de crescimento social, permitindo que os alunos, por exemplo, estudem durante à noite com iluminação adequada e tenham acesso aos meios de comunicação, enquanto equipamentos domésticos modernos, como refrigeradores e fogões, reduzem encargos das famílias e ajudam a elevar os padrões de vida.

Com fundamento no cenário apresentado, é possível perceber a importância da energia não só para satisfazer as necessidades básicas, mas também para propiciar conforto e entretenimento ao homem. Logo, além da questão ambiental, há motivos essenciais para aumentar o consumo de fontes de energia renováveis, como o relevante impacto no desenvolvimento social e econômico, complementando e substituindo parte dos tipos convencionais de produção de energia baseada em combustíveis fósseis mais prevalentes hoje. Para que isso ocorra, é fundamental refletir sobre novas soluções de energia eficientes e acessíveis em forma de produtos e serviços. Neste ponto, concentra-se também o desafio do design: gerar inovações energéticas que busquem soluções para as necessidades da sociedade e extrapolem os fatores ecológicos e tecnológicos.

## 2.2 ENERGIA EÓLICA

Como recurso eólico, os ventos consistem no ar em movimento gerado pela circulação das camadas de ar, provocada pelo aquecimento desigual do planeta. Esse fenômeno leva a gradientes de pressão atmosférica, responsáveis por movimentos de massa de ar. Os ventos têm características estocásticas que variam constantemente tanto em direção quanto em velocidade. Dessa forma, pode-se considerar que o ar em movimento produz energia e que a energia cinética desse movimento é a energia eólica (CUSTÓDIO, 2013; DUTRA, 2008; PINTO, 2013).

De acordo com Dutra (2008), estima-se que 2% da energia solar absorvida pela Terra seja convertida em energia cinética dos ventos, o que representa um grande potencial anual quando comparado às centrais elétricas no mundo. Além disso, os ventos de escala global e os que se manifestam em pequena escala são influenciados por distintos aspectos, entre os quais se destacam a variação da velocidade com a altura, a rugosidade do terreno, os obstáculos nas redondezas e o relevo, que podem causar aceleração ou desaceleração do escoamento do ar.

Segundo Pinto (2013), pode-se caracterizar o vento por alguns meios, como o anemômetro, para mensurar a velocidade do vento, e a rosa dos ventos, que auxilia na verificação da direção. Além disso, o estudo de frequência da distribuição de Weibull<sup>1</sup> geralmente é usado como ponto de partida para caracterizar as estatísticas da velocidade do vento. Com base nesses dados, é possível determinar a melhor posição das turbinas eólicas.

Há muito séculos, o vento vem sendo usado como forma de energia – lembra-se que, antigamente, era empregado, por exemplo, para impulsionar barcos a velas. Há indícios de que, por volta de 3.000 a.C., os egípcios utilizavam o vento para elevação da água. Os primeiros registros de uso de máquinas movidas a vento, que faziam o trabalho de moer grãos, remonta à antiga Pérsia, em torno de 200 a.C., e à China, em 300 a.C. (CUSTÓDIO, 2013; ROSA, 2015).

Ao analisar a literatura, percebe-se que a evolução tecnológica associada ao desenvolvimento da energia eólica oscilou ao longo dos anos — ou seja, o interesse nem sempre seguiu uma ascensão —, visto que está ligada a importantes períodos de transição para a humanidade, como a própria Revolução Industrial, o avanço das redes elétricas, bem como a outros fatos históricos significativos, como os conflitos bélicos da Segunda Guerra Mundial. Acredita-se que, somente após a crise do petróleo na década de 1970, é que de fato o interesse pela energia eólica foi consolidado, após o uso intensivo de combustíveis fósseis e de um longo período sem estímulos para pesquisas relacionadas com energias alternativas (DUTRA, 2008; PINTO, 2013; ROSA, 2015).

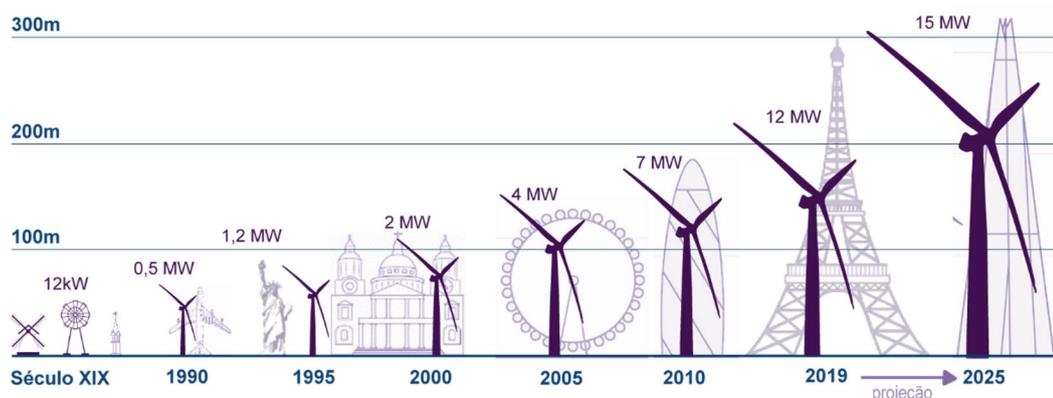
Esse tipo de energia para produzir eletricidade apresenta vantagens, pois há baixas emissões de CO<sub>2</sub> durante todo o ciclo de vida de fabricação, instalação, operação e desativação (BURTON *et al.*, 2001). Desde a década de 1980, quando foram primeiramente desenvolvidas, as turbinas eólicas comerciais evoluíram rapidamente em tecnologia e dimensão (DUTRA, 2008; PINTO, 2013; ROSA, 2015). Como é possível observar na Figura 3, nos últimos 30 anos, houve aumento na altura e no diâmetro do rotor e, enquanto a tecnologia e os estudos científicos de engenharia mostraram aperfeiçoamento, foi possível desenvolver materiais inovadores e aprimorar a

---

<sup>1</sup> Em probabilidade e estatística a distribuição Weibull é usada para modelar dados de confiabilidade. É frequentemente utilizada na análise de energia eólica para modelar a distribuição da velocidade do vento. Ela permite descrever a probabilidade de ocorrência de diferentes velocidades de vento em uma determinada localidade. Os parâmetros da distribuição Weibull são estimados a partir de dados históricos de velocidade do vento, permitindo prever a disponibilidade e a produção de energia eólica em uma área específica. I.

infraestrutura, elementos que possibilitaram um novo dimensionamento das turbinas eólicas.

Figura 3 – Evolução das alturas das turbinas eólicas



Fonte: Adaptada de SBC Energy Institute (2013) e GE (GE, 2019).

Segundo o Conselho Global de Energia Eólica — em inglês, Global Wind Energy Council (GWEC) —, em 2021, a capacidade de instalação de energia eólica no mundo foi de 837GW. No mesmo ano, foram adicionados 96,6GW de geração de energia eólica, e a China lidera as novas instalações no setor, com 50,91%, seguida pelos Estados Unidos (13,58%) e pelo Brasil (4,06%).

No Brasil, são 812 parques eólicos em 12 Estados. Somente em 2021, foram adicionados 110 novos parques, ano recorde de instalações, o que garantiu a 6ª colocação no *ranking* global de capacidade instalada. Cerca de 20% do país é abastecido por energia eólica nos períodos de altas de vento, e a capacidade instalada é de 22GW (ABEEÓLICA, 2022).

Há grandes argumentos a favor da energia eólica. Conforme Rosa (2015), além da crescente atratividade econômica desse tipo de energia, parques eólicos não emitem CO<sub>2</sub>, a operação das turbinas não libera resíduos perigosos (como ocorre nas usinas nucleares), os custos das turbinas eólicas são muito inferiores se comparados a outros tipos de usinas energéticas (especialmente, se equiparados a geradores nucleares) e as terras ocupadas pelos parques eólicos podem ser usadas simultaneamente (em atividades agrícolas, por exemplo). Os benefícios, portanto, vão além do menor impacto ambiental. Conforme a ABEEólica (2022), alguns indicadores mostram que a fonte eólica influencia positivamente a localidade em que está instalada, pois são criados projetos sociais, culturais, de educação em saúde e educação ambiental para o desenvolvimento

da comunidade local. Como é possível perceber, a energia eólica apresenta-se como uma boa opção de produção de energia acessível e limpa.

Ressalta-se que, apesar dos aspectos positivos, há fatores contraproducentes, pois alguns estudos revelam impactos ambientais e sociais relacionados à instalação de parques eólicos em que se encontram turbinas de grande porte. De acordo com Dai *et al.* (2015), seria possível agrupar os principais problemas em impactos com efeitos ecológicos, prejuízos aos seres humanos e às questões relacionadas ao clima.

As principais questões ecológicas associadas à instalação de turbinas de grande porte estão associadas à segurança da fauna silvestre e à perturbação do biosistema local. Ainda, há outros riscos, como mortalidade de pássaros causada por possíveis colisões com as turbinas eólicas e a destruição do *habitat*, que impacta no comportamento, na reprodução e na alimentação de aves. Além dos prejuízos às aves, também pode haver aumento da mortalidade de outros animais, como os morcegos locais e migratórios, que sofreriam com a queda de pressão ao voar próximos às turbinas, levando a hemorragias internas e consequente óbito. Esses problemas podem estar associados com a altura das torres, que vem aumentando nos últimos anos (ARAÚJO; MOURA, 2017; DAI *et al.*, 2015).

Outras adversidades teriam relação com a fase de construção e fundações dos parques eólicos, em que a construção de estradas e o desmatamento podem afetar o biosistema local, levando à erosão do solo. Além disso, as águas residuais e o óleo do local da construção podem se infiltrar no solo subterrâneo e provocar sérios problemas ambientais (ARAÚJO; MOURA, 2017; DAI *et al.*, 2015).

Os impactos causados especificamente aos seres humanos pela instalação de turbinas de grande porte estão relacionados com a emissão de ruídos, que podem ser mecânicos, aerodinâmicos e de baixa frequência, e afetariam os moradores próximos às turbinas. Além disso, há o impacto visual causado pela altura, pelo diâmetro e quantidade de pás dos aerogeradores de grande porte, que inevitavelmente alterariam a paisagem local. Ainda que sejam subjetivas, essas modificações devem ser, portanto, consideradas. Da mesma forma, citam-se outras ponderações a serem analisadas previamente à instalação: embora seja extremamente fraco, o próprio campo eletromagnético de uma turbina eólica pode criar interferências nesse sentido e, além disso, as torres de turbinas eólicas, às vezes, podem refletir ondas de rádio por causa dos materiais refletivos com que são construídas (ARAÚJO; MOURA, 2017; DAI *et al.*, 2015; PINTO, 2013).

As questões relacionadas ao clima, por sua vez, estão associadas à circulação do padrão do ar, que, modificada pelos parques eólicos, altera localmente a temperatura, os

ventos e o regime de chuvas, podendo afetar em longo prazo a vida selvagem e os padrões climáticos regionais (ARAÚJO; MOURA, 2017; DAI *et al.*, 2015).

Assim, com base nesses principais impactos ambientais, humanos e climáticos, é necessário considerar aspectos que envolvem os conflitos entre a produção de energia eólica e a conservação da biodiversidade. Segundo Neri *et al.* (2019), há um grande número de parques eólicos no Brasil atualmente em operação ou cujas instalações estão planejadas em áreas já mapeadas e caracterizadas como de prioridade muito alta e extremamente alta para conservação da biodiversidade. Ainda, de acordo com os autores, para atingir os ODS, entende-se como imprescindível que a expansão de parques eólicos seja acompanhada de mais proteção à biodiversidade e, ainda, redução dos níveis de desigualdade econômica.

Assim como outros materiais, os componentes das turbinas eólicas também possuem um ciclo de vida útil e, ao fim, geram resíduos — isso depende do que foi utilizado em sua composição. Estudos sobre avaliações do ciclo de vida mostram que os materiais usados na fabricação das turbinas representam 70 a 80% do impacto ambiental desse tipo de energia. Logo, garantir a reciclagem no fim da vida útil desses produtos, além de representar interesse econômico e ambiental, está de acordo com os princípios de transição rumo a uma economia circular (JENSEN, 2019; LIU; MENG; BARLOW, 2019).

Com base nos pontos apresentados neste tópico, é possível concluir que a energia eólica tem distintas vantagens, mas, ao mesmo tempo, características que devem ser bem avaliadas para reduzir seus impactos, principalmente o ambiental, ao mínimo possível. Encontrar soluções alternativas, como a microgeração, pode ser um caminho de produção de energia mais amigável. Isso mostra a relevância de estudos com essa temática.

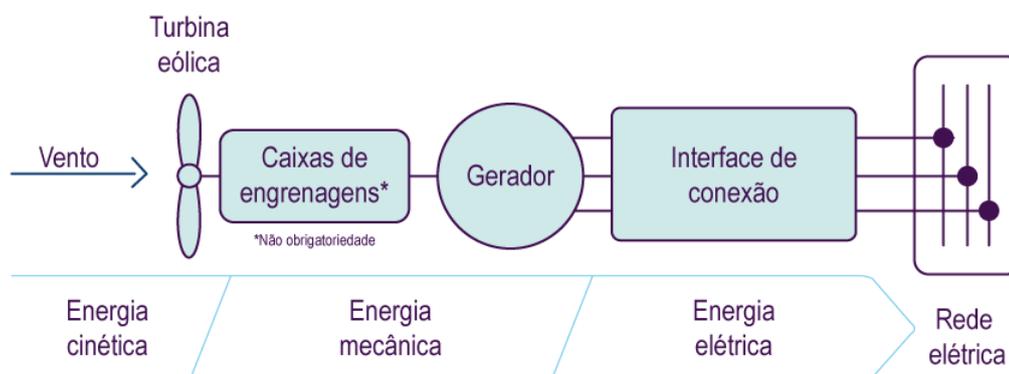
### **2.2.1 Turbinas eólicas**

As turbinas eólicas podem ser definidas como máquinas que, independentemente da aplicação, do tipo ou design, convertem parte da energia cinética do vento em energia mecânica pela rotação das pás (CUSTÓDIO, 2013; GASCH; TWELE, 2011; PINTO, 2013).

Segundo Pinto (2013), nas turbinas com foco em eletricidade, também conhecidas como aerogeradores, a conversão da energia ocorre em duas etapas: primeiro, a turbina remove a porção da energia cinética disponível para conversão em energia mecânica;

depois, gerador, que recebe a energia mecânica, a converte em energia elétrica, que é então transmitida para a rede da concessionária, conforme é apontado na Figura 4.

Figura 4 – Princípio da conversão



Fonte: Adaptada de Pinto (2013).

A classificação das turbinas quanto ao tamanho está associada com a potência, o diâmetro do rotor e a área varrida, de acordo com o abordado na Tabela 1. Segundo Gipe (2009), ainda não há uma classificação com regras estabelecidas em relação ao porte das turbinas e algumas designações podem ser arbitrárias. O tamanho da turbina impacta em sua aplicação, visto que turbinas de pequeno porte geralmente são utilizadas em residências, áreas isoladas e fazendas; as de porte intermediário, por sua vez, são aplicadas em geração distribuídas ou sistemas híbridos; por fim, as turbinas de grande porte são destinadas a parques eólicos e têm geração distribuída (CRESESB, 2008).

Tabela 1 – Classificação quanto ao porte de turbinas eólicas

Classificação	Rotor (metros)	Área varrida (m <sup>2</sup> )	Potência
Micro	0,5–1,25	0,2–1,2	10–250W
Mini	1,25–3	1,2–7,1	250W–1,4kW
Doméstica	3–10	7–79	1,4–16kW
Pequeno porte	10–20	79–314	25–100kW
Médio porte	20–50	314–1963	100kW–1 MW
Grande porte	50–100+	1.963–8.000+	1MW–3 MW+

Fonte: Adaptada de Gipe (2009).

As turbinas eólicas podem ser empregadas em sistemas isolados, para armazenamento de energia, em baterias, com objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia gravitacional, com intuito de armazenar a água bombeada em

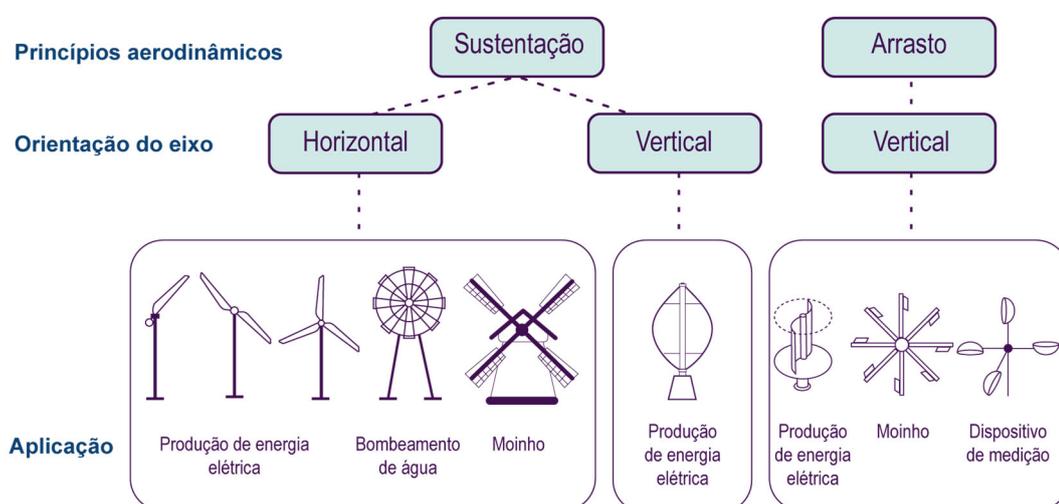
reservatórios. Algumas situações não necessitam de armazenamento, como é o caso do uso de irrigação, em que toda a água bombeada é diretamente consumida.

As turbinas eólicas podem, também, ser empregadas em conjunto com outras fontes de energia, como sistema híbrido, por exemplo, em que são associadas a geradores a diesel ou a módulos fotovoltaicos. Os aerogeradores podem ser utilizados em sistemas interligados à rede em que toda a produção é entregue diretamente à rede elétrica (CRESESB, 2008).

## 2.2.2 Tipos de turbinas eólicas

Existem algumas configurações propostas para classificar as máquinas eólicas, sejam os princípios aerodinâmicos, arrasto e sustentação, seja a orientação do eixo com o qual as pás das turbinas giram, que pode ser horizontal e vertical, conforme Figura 5. Há, ainda, as turbinas baseadas no efeito Magnus e as usinas eólicas com vórtices, componentes que auxiliam na eficiência da máquina, como difusores, mas, atualmente, quase todas as turbinas de grande porte são de sustentação e de eixo horizontal (PINTO, 2013; ROSA, 2015).

Figura 5 – Classificação das turbinas eólicas



Fonte: Adaptada de Gash (2011).

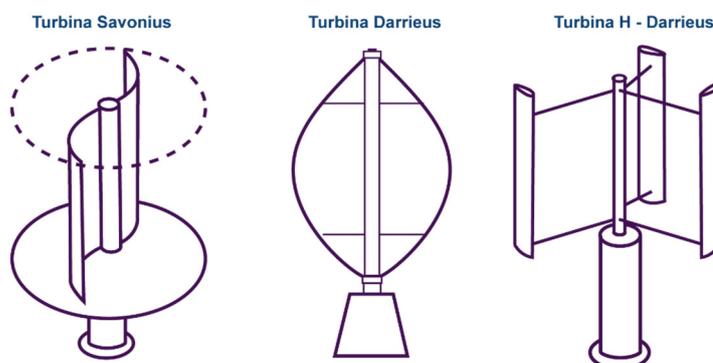
Também é possível encontrar turbinas com outras configurações, como aquelas em que são usados acessórios (difusores e concentradores), as turbinas eólicas com multirrotores e turbinas com combinações (Darrieus e Savonius). Neste trabalho, foram citados apenas alguns exemplos, mas é possível verificar uma grande variedade de configurações.

Este estudo discutirá as turbinas com eixo horizontal (TEEHs) — em inglês, *horizontal axis wind turbine* (HAWT) —, e sucintamente serão discorridas considerações sobre as turbinas com eixo vertical (TEEVs) — em inglês, *vertical wind turbine* (VAWT) —, porque são consideradas configurações comuns.

### 2.2.2.1 Turbinas eólicas com eixo vertical

As TEEVs podem ser de arrasto ou de sustentação. São os projetos mais antigos de rotores eólicos; no início, entretanto, eram construídos com simples rotores de arrasto. A principal vantagem das máquinas de eixo vertical é que elas não precisam de controle de ajuste para mantê-las na direção do vento. Há, ainda, outro aspecto positivo: o maquinário pesado de engrenagens e outros componentes mecânicos podem ser acomodados ao solo, o que facilita a manutenção da máquina. Em contrapartida, cita-se uma série de desvantagens, incluindo baixo desempenho, sobretudo das turbinas de arrasto. Como as pás ficam relativamente perto do solo, a velocidade do vento é bem menor. Esses ventos também podem ser turbulentos, o que aumenta a tensão sobre a máquina TEEV (CUSTÓDIO, 2013; PINTO, 2013; ROSA, 2015). Na Figura 6, são apresentados modelos de TEEVs.

Figura 6 – Modelos de TEEVs



Fonte: Adaptada de Custódio (2013) e Pinto (2013).

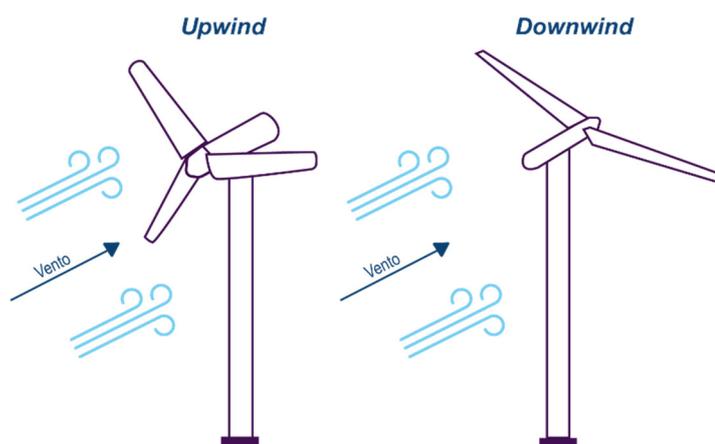
### 2.2.2.2 Turbinas eólicas com eixo horizontal

As TEEHs são conduzidas pelos princípios aerodinâmicos de sustentação. O rotor necessita manter-se perpendicular à direção do vento para capturar o máximo de energia (CUSTÓDIO, 2013). São vantagens de uma TEEH o acesso a ventos de maiores velocidades, por causa da altura da torre, o melhor controle, em razão do ajuste do ângulo de passo, e a alta eficiência; porém, existem algumas desvantagens, como complexidade

de construção e de instalação da torre, além de dificuldades no transporte dos equipamentos (PINTO, 2013).

As máquinas que possuem seu eixo de rotação na posição horizontal são concebidas pelo conceito das hélices. Algumas turbinas eólicas são projetadas para operar com as hélices a favor do vento, chamadas de *upwind*; outras, com as hélices contra o vento, denominadas *downwind*, conforme Figura 7.

Figura 7 – Turbinas *upwind* e *downwind*



Fonte: Adaptada de Gasch (2011).

As turbinas *downwind* permitem que o vento por si só controle o ajuste, ou seja, ela naturalmente se orienta em respeito à direção do vento. Como desvantagem, há o efeito sombra causado pela torre, o que ocorre todas as vezes em que a pá passa atrás da torre e encontra um curto período em que o vento é reduzido, fazendo a flexão da pá. Isso pode levar à fadiga, além de aumentar o ruído e reduzir o potencial de saída. Já as turbinas *upwind* necessitam de algum modo de ajuste para manter as pás voltadas para o vento; em contrapartida, a máquina opera mais suavemente e fornece mais potência (PINTO, 2013).

No projeto de uma TEEH, há limites de vento predeterminados e, em vento de alta velocidade, o problema é manter a máquina nos limites do projeto, daí a necessidade de meios aerodinâmicos efetivos para limitar a potência e a velocidade rotacional. Para tanto, podem ser utilizadas duas formas conhecidas de controle de potência: controle por estol e controle de passo.

O controle por estol ou passivo (*passive stall* ou *stall control*) reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas e não podem girar em torno do eixo longitudinal. No design das pás, o ângulo de ataque é escolhido para que, em altas velocidades, o fluxo

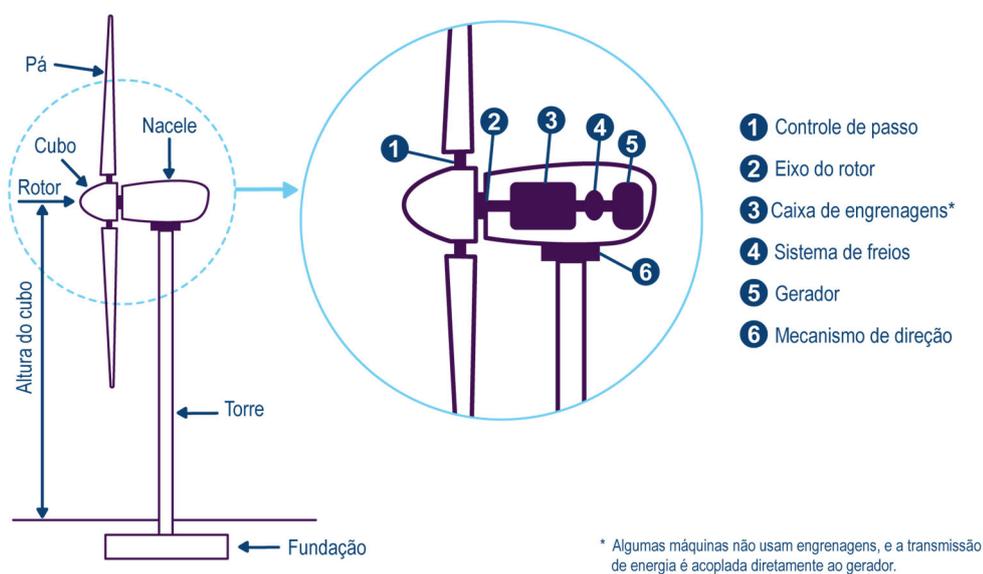
em torno do perfil da pá se descole da superfície (estol). Esse tipo de controle é aplicado em turbinas mais simples, ou melhor, são menos complexas porque não necessitam de controle de passo. Além disso, a estrutura e a manutenção são mais acessíveis (CUSTÓDIO, 2013; PINTO, 2013).

No controle de passos (*pitch control*), ou ativo, há um sistema eletrônico que monitora quando a saída da potência ultrapassa do limite estabelecido e, com isso, as pás giram em torno do eixo longitudinal, mudando o ângulo de passo. Geralmente, esse sistema, usado em máquinas mais sofisticadas, permite controle de potência sob diversas condições de vento, produzindo maior energia sem diminuir a eficiência na adaptação ao estol da pá (CUSTÓDIO, 2013; PINTO, 2013).

É possível combinar os dois tipos de controle de potência, o que se denomina controle híbrido ou estol ativo (*active stall*). Nesse sistema, o rotor gira para que as pás atinjam menor sustentação (CUSTÓDIO, 2013; PINTO, 2013).

Os componentes divergem conforme o tipo, o porte e local de instalação da turbina. Os aerogeradores em geral apresentam os seguintes elementos: torre, nacele, cubo, pás, caixa de engrenagens e gerador (Figura 8).

Figura 8 – Componentes de um aerogerador



Fonte: Adaptada de Pinto (2013) e Ximenes (2018).

As turbinas eólicas podem utilizar mecanismo para mantê-las na direção do vento. O controle de giro (*yaw system*), ou sistema de guinada, dispõe de um sistema eletrônico que verifica a direção do vento usando uma veleta e, por meio de rolamentos, a nacela é girada junto com o rotor, na direção do vento. No caso das turbinas eólicas de pequeno

porte, costuma-se utilizar um leme de orientação, que é o responsável por esse alinhamento (CUSTÓDIO, 2013; GIPE, 2009; PINTO, 2013).

Os tipos de turbinas mais utilizados em parques eólicos são os aerogeradores de eixo horizontal com sistema de guinada e controle ativo, proteção mais eficiente contra o excesso de velocidade (especialmente em grandes turbinas eólicas); além disso, o formato das pás do rotor pode ser otimizado aerodinamicamente.

A literatura mostra que um projeto alcança sua eficiência máxima quando a sustentação aerodinâmica é levada ao nível máximo (PINTO, 2013). Como vantagens das TEEHs, destacam-se o acesso a ventos de maiores velocidades (por causa da altura da torre), o melhor controle relacionado ao ajuste do ângulo de passo e a alta eficiência, uma vez que as pás encaram perpendicularmente o vento (CUSTÓDIO, 2013; PINTO, 2013).

### **2.2.3 Microturbinas eólicas**

Enquanto a tendência atual é evoluir no que diz respeito ao tamanho das turbinas eólicas, há outra perspectiva de pesquisas relacionadas à miniaturização desses produtos (CÂNDIDO; GARAY, 2015). Existem microturbinas disponíveis comercialmente, e algumas mostram eficiência nos objetivos a que se propõem. Elas são simples e podem ser montadas facilmente e em pouco tempo (PINTO, 2013).

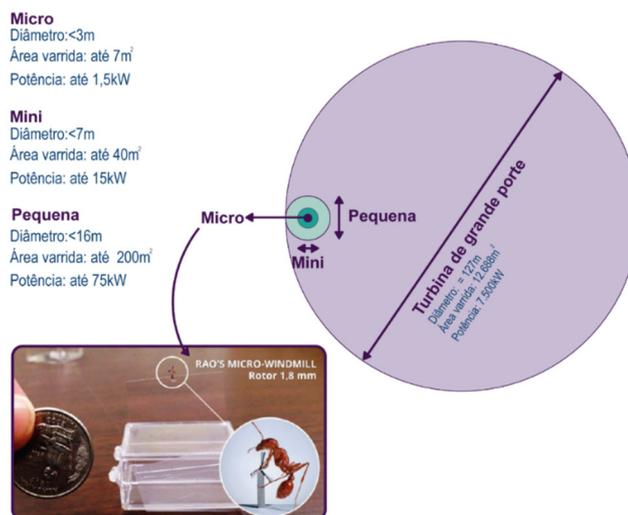
De acordo com Kishore, Coudron e Priya (SWEPT, 2013), há divergências quanto à nomenclatura das turbinas eólicas de pequena e microescala. Esses autores caracterizam as turbinas de microescala como aquelas com tamanho inferior a 10cm. Para Gipe (2009), por sua vez, a microturbina é caracterizada pelo tamanho do rotor inferior a 1,25m. A ANEEL (2015), em conformidade com as Resoluções Normativas, estabelece um conceito de microgeração distribuída que engloba sistemas de geração de energia a partir de ventos com potência igual ou até 75kW. A Comissão Eletrotécnica Internacional (em inglês, International Electrotechnical Commission [IEC]), que estipula padrões para pequenas turbinas eólicas, em sua IEC 61400-2, define-as como rotores com a área varrida inferior a 200m<sup>2</sup>, o que corresponde a aproximadamente uma potência nominal não superior a 75kW de até 16m de diâmetro. A IEC ainda cria categorias para pequenas turbinas, considerando microturbina aquela com diâmetro inferior a 3m e área varrida<sup>2</sup> pelas pás da turbina de até 7m<sup>2</sup>, como mostra a Figura 9 (ESTANQUEIRO;

---

<sup>2</sup> A área varrida, de acordo com Pinto (PINTO, 2013), pode ser definida como a área da seção transversal da turbina.

SIMÕES, 2010; REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012). Neste estudo, para fins de padronização, será utilizada a nomenclatura “microturbina”, que é a definição mais comumente encontrada para o porte do projeto que se pretende desenvolver.

Figura 9 – Comparação dos tamanhos de turbinas



Fonte: Adaptada de Reinders, Diehl e Brezet (2012) e Fite (2014).

As pequenas turbinas, dependendo de sua potência de saída, podem ser utilizadas para bombeamento, carregamento de baterias, emprego em telecomunicações e eletrificação rural e de embarcações (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012). Já as microturbinas podem ser empregadas para alimentação de pequenos dispositivos eletrônicos, como sensores de movimento, produtos em *light-emitting diode* (LEDs) ou pequenos sensores de sem fio (*wireless*) (KISHORE; VUČKOVIĆ; PRIYA, 2014; RANCOURT; TABESH; FRÉCHETTE, 2007).

Segundo Kishore, Vučković e Priya (2014), projetar uma microturbina eólica para operar em baixas velocidade de vento é bastante diferente do que projetar uma turbina eólica convencional de grande porte. Existem vários parâmetros, como perfil do aerodinâmico, ângulo de torção, comprimento da corda e número de pás, que precisam ser otimizados simultaneamente de acordo com as condições de operação em baixos números de Reynolds.

Semelhantes às turbinas de grande porte, a maioria das microturbinas e pequenas turbinas eólicas são máquinas *upwind*, de eixo horizontal, com controle por estol. Seu sistema de controle de giro (*yaw system*) utiliza um leme de orientação localizado na parte traseira para guiar o rotor a favor do vento (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

Os coeficientes de potência geralmente mais baixos resultam em um projeto e sistemas mais simples. Reinders, Diehl e Brezet (2012) citam alguns parâmetros gerais referentes a pequenas turbinas: com a altura do cubo de até 40m do solo, a velocidade de partida fica em torno de 3,5m/s e a velocidade de corte é de 15m/s, e o coeficiente de potência ( $C_p$ ) varia entre 25 e 35%. De acordo com Akour *et. al* (2018), as microturbinas em escala centimétrica (2 a 12cm de diâmetro) mostram o  $C_p$  entre 5 e 10%, geralmente têm 3 a 12 pás. Assim, o motivo da diferença de  $C_p$  remonta ao design da pá e à área varrida pelo rotor.

A qualidade dessas turbinas é muito heterogênea, visto que algumas turbinas disponíveis não estão em conformidade com padrões e normas internacionais, o que causa insegurança na operação. Considerando tais aspectos, destaca-se que o planejamento adequado é essencial para garantir bom desempenho e longevidade do produto. Uma localização ruim pode reduzir consideravelmente a potência total, que, em associação a um fluxo turbulento alto, pode diminuir significativamente a expectativa de vida de uma microturbina eólica (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

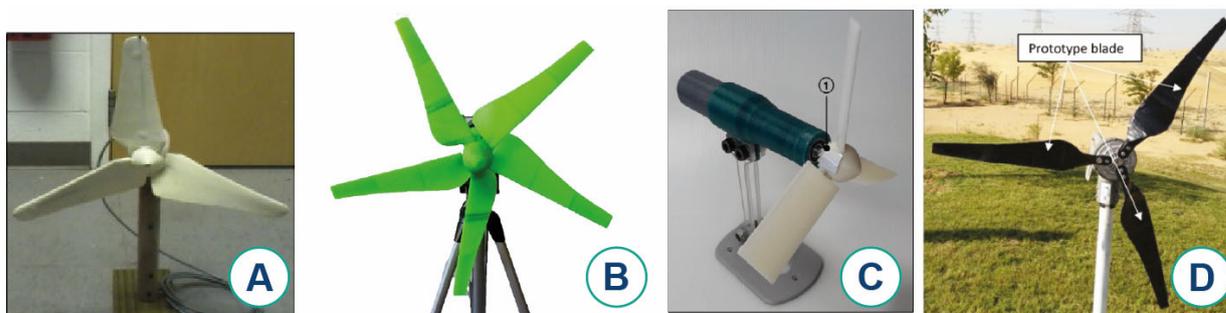
A precisão da estimativa de rendimento, ou seja, a produção anual de energia depende muito dos dados disponíveis sobre potencial eólico local. Como esses dados geralmente são desconhecidos, pois em geral é oneroso realizar medições no local em que não há torres anemométricas, a velocidade do vento pode ser estimada por meio de atlas eólicos e banco de dados de velocidade de vento, o que permite deduções muito aproximadas da produção anual de energia (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

O uso de pequenas turbinas eólicas em ambientes urbanos é controverso e desafiador por razões de segurança, engenharia estrutural e vibração. No meio urbano, o vento é perturbado, turbulento e com várias alterações de direção em segundos. Habitualmente, as microturbinas são instaladas próxima ao solo, onde as velocidades de ventos são baixas e, nesse ambiente, os problemas aerodinâmicos das turbinas eólicas envolvem instabilidade e funcionamento com baixo número de Reynolds, além da necessidade de altos ângulos de ataque (SUNDERLAND *et al.*, 2013). Outro aspecto a ser observado é o ruído aerodinâmico, visto que, quanto menor o diâmetro, mais ruído a máquina pode produzir, o que possibilita reduzir sua razão de velocidade da ponta pá (em inglês, *tip-speed-radio* [TSR]) (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

### 2.2.3.1 Estudos revisados sobre microturbinas

Neste ponto, foram abordados alguns estudos desenvolvidos com relação ao tema apresentado nesta dissertação. A partir dessa análise, busca-se gerar conhecimento e entendimento sobre o assunto, com vistas a auxiliar a tomada de decisão. Muitas pesquisas contribuíram para melhor compreensão do enfoque deste trabalho, mas, para fins de sistematização, foi estabelecido um recorte das informações, referentes aos últimos 10 anos, de turbinas de eixo horizontal em que o rotor não ultrapassasse 0,50m de diâmetro, conforme apresentado na Figura 10. As bases de dados para essa pesquisa foram a Scopus, ScienceDirect e Lume, a partir das seguintes palavras-chaves: *small wind turbine*, *micro-wind turbine*, *blade design*, *horizontal axis*; *micro scales*.

Figura 10 – Estudos revisados sobre microturbinas



A) Turbina portátil; B) Microturbina; C) Turbina com perfis Naca; D) Microturbina.

Fonte: Adaptada de Kishore, Vučković e Priya (2013); Garré (2015); Oliveira (2017); Akour *et al.* (2018).

Kishore, Vučković e Priya (2013) apresentaram um projeto e o desenvolvimento de uma turbina portátil de energia eólica de pequena escala destinada a operar em baixas da velocidade do vento, a 5m/s (Figura 10A). As características de desempenho aerodinâmico da turbina de pequena escala foram examinadas experimentalmente em túnel de vento. Além disso, foi projetado um difusor usando simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD).

No trabalho de Garré (2015), Figura 10C, foi apresentada a avaliação experimental em túnel aerodinâmico de dois aerogeradores de pequeno porte com cinco pás. Para isso, utilizando-se de prototipagem 3D, foram construídos dois modelos, os quais foram avaliados primeiramente utilizando-se pás ótimas de Betz e depois pás ótimas de Betz modificadas.

A dissertação de Oliveira (2017), que serviu como ponto de partida para esta pesquisa, foi desenvolvida no LDSM do PGDesign da UFRGS. A autora identificou perfis

NACA para design de pás de microturbina, e aqueles que obtiveram melhor desempenho foram NACA 0012, NACA 1412 e NACA 6409 (Figura 10D).

Akour *et al.* (2018), Figura 10D, realizaram estudo experimental com modelos fabricados através de impressão 3D e utilização do perfil BW-3. A microturbina foi testada em ambientes abertos, em velocidade de vento de 5m/s. O objetivo do estudo foi desenvolver um design aprimorado, utilizando a Teoria BEM, que é usada para dimensionar a corda de pá de turbina eólica aliadas com o número de Reynolds.

O Quadro 1 sintetiza alguns parâmetros dos estudos expostos. Os resultados são referentes aos melhores desempenhos dos experimentos realizados com as microturbinas.

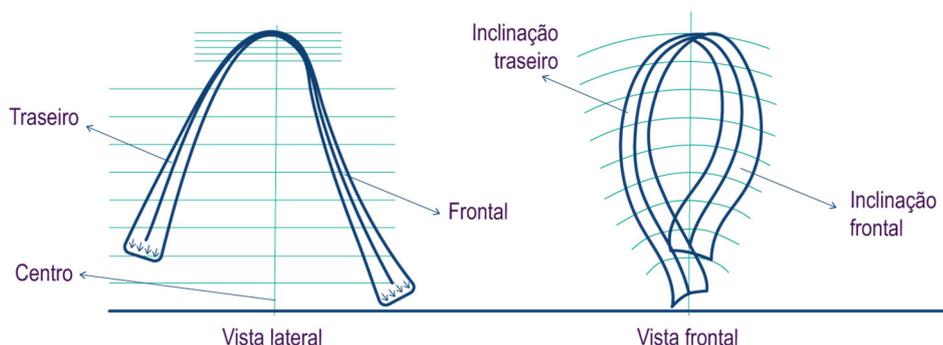
Quadro 1 – Estudos revisados sobre microturbinas - hélice

<b>Autores</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Velocidade de partida (m/s)</b>	<b>Velocidade nominal (m/s)</b>	<b>Potência nominal (W)</b>	<b>Coefficiente de potência (%)</b>	<b>Perfis</b>
<b>Kishore, Vučković e Priya (2013)</b>	34,4	2,7	5	0,83	14	-
<b>Garré (2015)</b>	50	1,9	10	38	37,6	NACA 0012
<b>Oliveira (2017)</b>	14,2	1,6	5	0,00187	-	NACA 0012 NACA 1412 NACA 6409
<b>Akour <i>et al.</i> (2018)</b>	50	2	10	25	38	BW-3

Fonte: Elaborada pela autora

Além dos designs tipo hélice, configuração mais comum utilizada para turbinas de eixo horizontal, foram analisados estudos que abordaram o design de pá dos tipos *loop-type*, *ribbon*, *looping*, ou, em português, tipo laço. Para essa análise, buscou-se um panorama de estudos realizados até o momento desse formato de pá.

A forma da pá consiste em uma lâmina alongada, em que as extremidades se conectam em posições distintas ao eixo, em forma de “U”. Segundo Yoshida (2007), o design foi desenvolvido em 1999 na Faculdade e Engenharia de Tóquio, com foco em microturbinas eólicas, representado na Figura 11. O projeto tem como objetivos captura do vento tridimensional, mesmo com ventos turbulentos, auxiliar no torque e na transição do fluxo de vento, eliminar vórtices na ponta de pá e diminuir o ruído aerodinâmico.

Figura 11 – Design de pás *looping*

Fonte: Adaptada de Yoshida (2007).

O estudo de Aung *et al.* (2019) apresenta a fabricação e a análise de desempenho de uma TEHH do tipo *loop-type*, que se destina a operar em baixa velocidade de rotação sem reduzir sua eficiência energética, aumentando a potência da turbina. O design é projetado levando em consideração a Teoria do Momento Angular, a Teoria BEM. O diâmetro do rotor é de 1,5m, com três pás, e foi utilizado o perfil NASA SC(2)-0402.

Jeon *et al.* (2020) desenvolveram uma turbina *loop-type* de eixo horizontal. Para a validação do modelo, foram realizadas simulações de fluidodinâmica computacional e feitos ensaios experimentais. O estudo partiu de uma pesquisa realizada por Kim *et al.* (2017), que desenvolveu uma turbina de pequeno porte com a mesma configuração. Esse estudo não foi considerado nesta pesquisa, pois não está como acesso livre.

Além desses estudos, analisou-se o artigo Kasner e Baldowska-witos (2021), que prototiparam uma turbina *loop-type*, em aço, aplicando o método *technology readiness levels* (TRL), porém não foi considerado, pois o estudo em questão tinha como objetivo a validação do método, e não da turbina.

Os dois formatos de pá “hélice” e “*loop-type*”, denominados assim nesta pesquisa, darão suporte para o desenvolvimento dos modelos. Ressalta-se que os estudos sobre microturbinas com o diâmetro de até 50cm (conforme Tabela 1), que apresentam resultados como velocidade de partida, velocidade nominal, potência nominal e coeficiente de potência, foram realizados com diversos métodos de aferição, entretanto, para fins descritivos, considerou-se pertinente a apresentação desses dados.

### 2.2.3.2 Aplicações da energia eólica em produtos e arquitetura

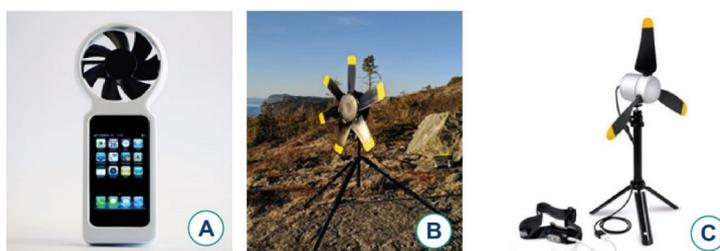
Com objetivo de analisar as possíveis aplicações da microprodução de energia eólica em produtos e serviços, realizou-se um levantamento de dispositivos que faz o emprego de energia eólica. Em 2010, o designer holandês Tjeerd Veenhoven

desenvolveu um protótipo conceitual de um dispositivo que permite que um celular seja carregado com energia eólica em até 6 horas. Ifan (Figura 12. A) é o nome do protótipo, que consiste em um estojo de borracha com um sistema eletrônico personalizado, no qual é acoplada uma ventoinha. Embora o projeto não tenha sido disponibilizado comercialmente pelo designer, muitos produtos similares foram oferecidos para venda em plataformas on-line. "

Exemplificando alguns modelos comerciais de microturbinas, a microturbina portátil de 3 em 1 da *startup* Canadense Seaformatics Systems tem como conceito produzir energia em quase qualquer lugar. O produto denominado WaterLily (Figura 12. B) promete carregar equipamentos eletrônicos utilizando fontes de vento, rios, córregos, riachos e pela força humana a partir de uma manivela. A turbina portátil é capaz de carregar dispositivos de até 12V. Para se transformar em microturbina eólica, é necessário alterar partes da microturbina, como as pás e o suporte. Esse *kit*, lançado em 2020, é vendido separadamente e se chama WindLily. O tempo para carregar um telefone celular varia entre 20 e 30% por hora, dependendo da capacidade da bateria do equipamento.

Outro modelo é a microturbina eólica portátil Infinite air (Figura 12. C), produzida pela empresa Texienergy. O produto visa atender à demanda de pessoas que dependem da energia e estão fora da rede elétrica convencional. Ainda, seu uso é previsto em cenários de emergências e desastres naturais, com intuito de auxiliar médicos e trabalhadores humanitários. Menciona-se que não foram encontrados dados técnicos com relação ao desenvolvimento desses dispositivos.

Figura 12 – Modelos comerciais de microturbinas



A) Ifan; B) Microturbina WindLily; C) Microturbina Infinite air;

Fonte: Adaptada de Veenhoven (2010); Adaptada de Water Lily Turbine (2020)  
Adaptada de TexEnergy (2019).

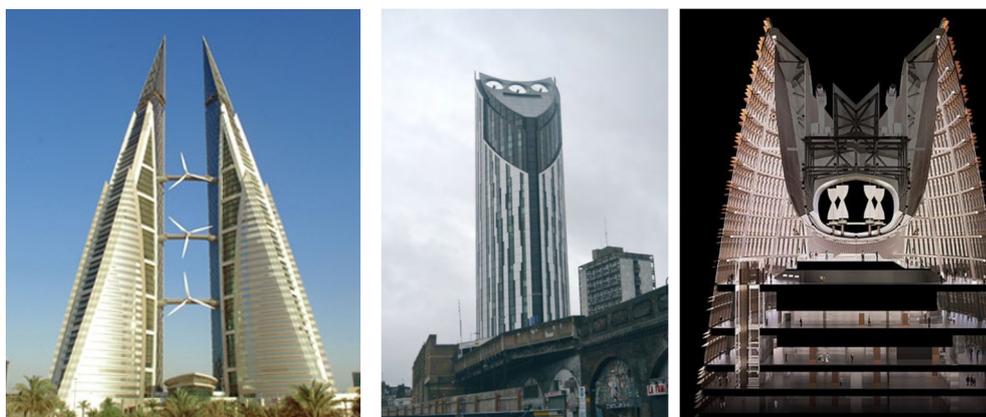
Geralmente, a utilização de turbinas e microturbinas eólicas está concentrada em áreas rurais ou afastada dos grandes centros urbanos (PINTO, 2013). Porém, é possível observar projetos arquitetônicos em grandes centros urbanos com foco na sustentabilidade, que empregam princípios de eficiência energética e estrutura, além de

redução de resíduos, habilitações para reutilização e reciclagem, qualidade de vida do entorno e dos habitantes, design bioclimático e aplicação de energia renovável. Esses tipos de construções, denominadas *green building*, surgem como oportunidade para minimizar impactos climáticos e ambientais negativos (AL-KODMANY, 2014).

Nesse âmbito, encontram-se projetos que integram a produção de energia eólica à construção, em que a turbina eólica faz parte do projeto de edifício, como é o caso do Bahrain World Trade Center (Figura 13A), arranha-céu localizado em Bahrein, no Golfo Pérsico. Projetado pelo grupo Atkins, suas duas torres têm 240m de altura. Esse complexo foi uns dos pioneiros a incorporar esteticamente turbinas eólicas no projeto arquitetônico. Suas torres possuem uma forma otimizada, que auxilia a canalizar o vento em direção às 3 turbinas eólicas de eixo horizontal de 29m de diâmetro. Outro exemplo é o The Strata Tower (Figura 13B), localizado em Londres. São observadas turbinas eólicas de eixo horizontal de 9m de diâmetro no topo do arranha-céu de 148m de altura. Projetado pelo escritório de arquitetura BFLS, o prédio foi concluído em 2010, e suas turbinas produzem energia para as áreas em comuns do edifício.

O exemplo mais recente é o Pertamina Energy Tower, na Indonésia (Figura 13C), no qual a energia é o principal fator de design. Visando estratégias sustentáveis, o projeto arquitetônico da torre possui uma forma afunilado no topo, formando um “funil de vento”, que permite aproveitar e aumentar a velocidade dos ventos predominantes. Nos andares superiores, a torre conta com quatro TEEV para produzir energia. Apesar de inovador, a execução da entrega estava prevista para 2020, porém até o momento, o projeto não foi iniciado.

Figura 13 – Arquitetura e energia eólica



**A** Bahrain World Trade Center

**B** The Strata Tower

**C** Pertamina Energy Tower

Fonte: Figuras A e B Adaptada de Al-kodmany (2014); Som (2020).

Como se pode observar, as aplicações de dispositivos voltados à produção de energia eólica — inserida, inclusive, no conceito nos projetos arquitetônicos — apresentam espaço para inovação e desenvolvimento de produtos comerciais, visando várias demandas de públicos.

Ainda, o estudo de novas abordagens da energia eólica pode contribuir para a implementação de sistemas autônomos de produção de energia, principalmente no atual contexto de desenvolvimento digitalização, em que há demanda de energia para alimentar dispositivos portáteis eletrônicos que desempenham papel importante nas SC e na internet das coisas (IoT) (EUNICE AKIN-PONNLE *et al.*, 2022).

## 2.3 DESIGN DE PÁS EÓLICAS

As pás são os elementos responsáveis pela interação do vento, compostas de perfis aerodinâmico. Uma vez otimizadas, as pás de microturbinas podem produzir energia comparável às pás maiores e menos otimizadas (KARTHIKEYAN *et al.*, 2015). Há vários parâmetros aerodinâmicos que devem ser determinados na geometria de uma pá para obter o comportamento esperado do fluido.

Desse modo, este tópico abordará os aspectos que devem ser considerados para o projeto de pás de turbinas eólicas e técnicas de dimensionamento do perfil longitudinal e design da geometria.

### 2.3.1 Velocidade nominal do vento

A primeira etapa para um projeto de pás de um rotor eólico consiste em estabelecer a velocidade média do vento a que a máquina será submetida. A avaliação dos recursos eólicos, a estimativa de produção e a localização são elementos fundamentais no planejamento um sistema eólico. A velocidade média do vento, parâmetro mais importante para a caracterização do recurso eólico, é idealmente medida no local e na altura do cubo da pequena turbina eólica planejada. A precisão da estimativa de rendimento, ou seja, a produção anual de eletricidade depende muito dos dados disponíveis sobre a energia eólica local (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).

Para um bom projeto de turbina eólica, é recomendável que o valor de velocidade nominal ( $v_n$ ) seja da ordem de 1,2 a 2 vezes o valor de velocidade média de certa região (COUTINHO, 2008). Na instalação de grandes aerogeradores em parques eólicos, existem várias informações captadas em torres anemométricas dispostas pelo território nacional, que auxiliam como fonte de dados para estimativa do potencial eólico.

Todavia, com relação a projetos de microturbinas, em que fatores como localização e altura são diversos, desconhece-se o potencial eólico do local por falta de mensuração de dados e, muitas vezes, realizar essas medições mediante contratação de serviços privados pode onerar o custo do projeto. Considerando o exposto, uma alternativa para obter essas informações sobre recursos eólicos pode ser a realização de cálculos aproximados da produção anual de eletricidade com base em atlas eólicos e bancos de dados de velocidade de vento de determinada região (GARRÉ, 2015).

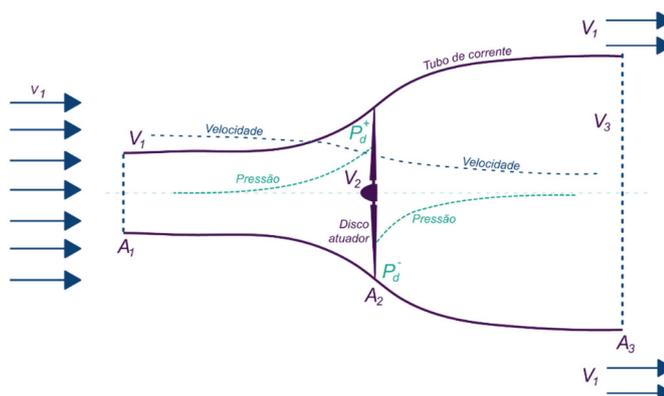
### 2.3.2 Coeficiente e curva de potência

De acordo com Gasch e Twele (2011), a potência disponível em uma massa de ar, que flui em uma velocidade ( $v$ ), em uma área varrida pelo rotor ( $A$ ) e densidade do ar ( $\rho$ ), pode ser descrita na equação 2.1:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^3 \quad (2.1)$$

No entanto, somente uma parte da potência disponível pode ser convertida em energia mecânica pela turbina. Albert Betz, físico alemão, a partir de suas pesquisas, demonstrou que a potência máxima a ser obtida por uma turbina eólica ocorre quando a velocidade do vento posterior das pás  $V_3$  corresponde a um terço da velocidade de vento não perturbada pelas pás turbinas  $V_1$ . Esse modelo é baseado na teoria da Quantidade de Movimento Axial. A análise atribui um volume de controle, em que suas fronteiras são as superfícies de um tubo de corrente e duas seções transversais, como é apontado na Figura 14. A turbina é representada por um disco atuador, que cria uma descontinuidade na pressão do ar, que escoam através do tubo de corrente (ALVES, 2011).

Figura 14 – Fluxo de vento através de uma turbina



Fonte: Adaptada de Burton *et al.* (2001) e Garré (2015).

O coeficiente de potência ( $C_p$ ) é a relação entre a potência extraída pelo vento e a potência disponível do vento. Nesse contexto, Betz constatou que o máximo coeficiente de potência teórico de uma TEEH é de 0,593 (59,3%), de acordo com equação 2.2:

$$C_{p_{Betz}} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{V_3}{V_1} \right| \quad (2.2)$$

$$C_{p_{Betz}} = \frac{16}{27} = 0,593$$

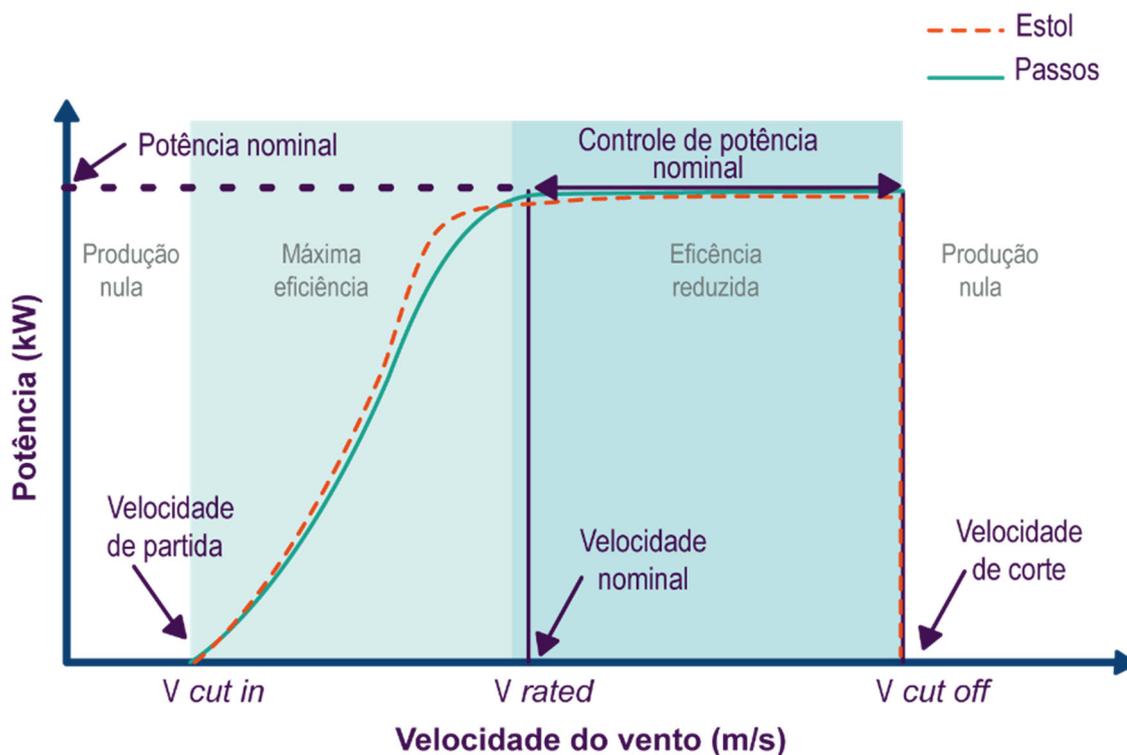
Segundo Custódio (2013), em uma turbina real, haverá a extração de uma parte desse máximo, o que resulta no coeficiente de potência, representado na equação 2.3, em que  $P_{ext}$  é a potência extraída,  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área varrida pelo rotor da turbina e  $v$  é a velocidade de vento em m/s:

$$C_p = \frac{P_{ext}}{\frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^3} \quad (2.3)$$

A potência de uma turbina está associada à velocidade do vento e à área do rotor. De acordo com Garré (2015), geralmente é caracterizada por uma curva de potência, que relaciona a velocidade do vento não perturbado na altura do eixo da turbina com a potência de saída, como é representado na Figura 15. São fatores importantes na curva de potência:

- velocidade de partida (*cut-in speed*) — mínima velocidade de vento em que a máquina entrará em potência útil; em baixas velocidade vento, não há torque suficiente para fazer a turbina iniciar; essa velocidade encontra-se entre 3 e 4m/s;
- velocidade nominal do vento (*rate output wind speed*) — velocidade na qual a potência nominal é alcançada; em algumas situações, é a potência máxima; enquanto a velocidade de vento ultrapassa a velocidade nominal, a energia elétrica se eleva (esse limite está associado à potência nominal), e geralmente a velocidade nominal corresponde à faixa de 12 a 17m/s;
- velocidade de corte (*cut off, cut-out speed*) — máxima velocidade de vento permitida, limitada pelo projeto, pela engenharia e por restrições de segurança; nesta situação, é acionado algum tipo de controle para evitar situações prejudiciais.

Figura 15 – Curva de potência de uma turbina eólica



Fonte: Adaptada de Pinto (2013).

Cada turbina possui uma curva característica de desempenho e, a partir dela, é possível prever a produção de energia gerada, desconsiderando fatores técnicos. A Figura 15 indica a produção máxima de energia elétrica em diferentes velocidades de vento (DUTRA, 2008). Cada fabricante de turbinas eólicas fornece uma linha de máquinas com diâmetros diversos e geradores variados, desejando atender ao perfil do vento esperado pelo seu cliente; além disso, as curvas de potência são disponibilizadas pelos fabricantes e obtidas por intermédio de testes padronizados (PINTO, 2013).

A potência de uma turbina varia com o cubo de velocidade do vento e com área do rotor. Para calcular a potência, utiliza-se a equação 2.4, em que  $P$  é a potência de saída,  $C_p$  é o Coeficiente de potência da turbina,  $\rho$  é a massa específica do ar,  $v_n$  é a velocidade nominal de vento (m/s),  $A$  é a área varrida pelo rotor da turbina e  $\eta$  a eficiência do sistema:

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_n^3 \cdot A \cdot \eta \quad (2.4)$$

O torque em uma TEEH é resultante quando as pás são submetidas à força resultante entre a sustentação e o arrasto. Esse torque é dado pela equação 2.5, em que  $P_{mec}$  é a potência mecânica em *watts* e  $\omega$  é a velocidade angular tangencial em rads/s:

$$T = \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (2.5)$$

### 2.3.3 Razão de velocidade de ponta de pá

No momento em que a pá da turbina gira, a velocidade na ponta da pá é maior do que a velocidade no meio da pá, sendo que a eficiência de um rotor é associada à taxa na qual o rotor gira. O rotor, ao girar lentamente, reduz sua eficiência, pois boa parte do vento passará livremente pelo espaço entre as pás do rotor. Por outro lado, se o rotor gira rápido demais, a eficiência também é reduzida, pois a área coberta pelas pás funcionará como um bloqueio contra o vento. Um bom projeto de rotor pode ser obtido a partir da razão da TSR ou  $\lambda$  (PINTO, 2013). A TSR é a relação entre a velocidade tangencial na ponta da pá da turbina e a velocidade do vento, conforme a equação 2.6, em que  $TSR = \lambda$  é a razão de ponta da pá,  $u_{(r)}$  é a velocidade tangencial,  $v_n$  é a velocidade do vento nominal,  $\omega$  velocidade angular da pá da turbina (rad/s) e  $R$  é o raio da turbina (m):

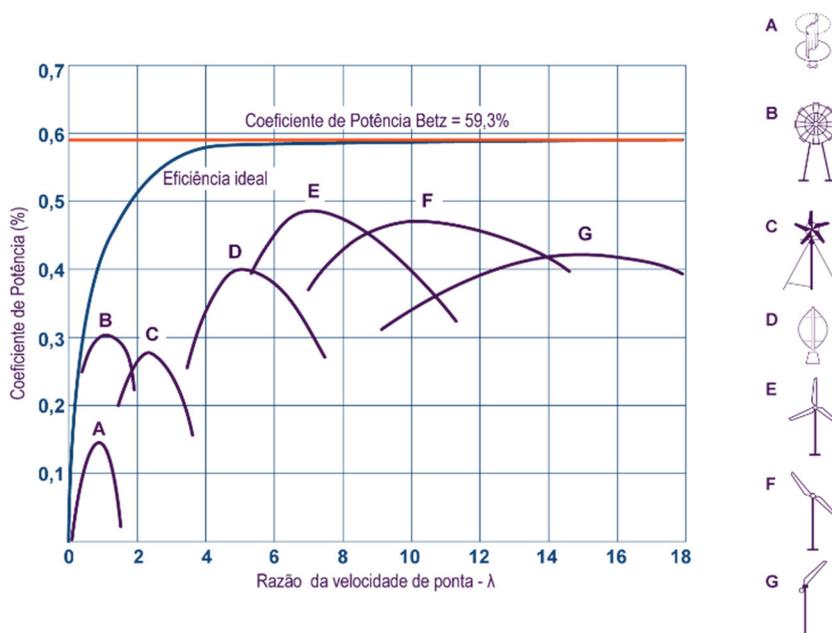
$$TSR = \lambda = \frac{u_{(r)}}{v_n} = \frac{\omega R}{v_n} \quad (2.6)$$

A velocidade angular é apresentada na equação 2.7, em que  $\omega$  é a velocidade angular da pá da turbina e  $n_f$  a rotação do rotor da turbina, rotações por minuto (RPM):

$$\omega = \frac{2\pi n_f}{60} \quad (2.7)$$

O valor de  $\lambda$  é importante, pois é um indicativo da magnitude com que devem girar as pás em relação ao vento incidente e, assim, alcançar o melhor coeficiente de potência. A Figura 16 mostra a relação TSR e o coeficiente de potência de vários rotores, bem como a influência da quantidade de pás.

Figura 16 – Razão da velocidade da ponta da pá e Coeficiente de Potência



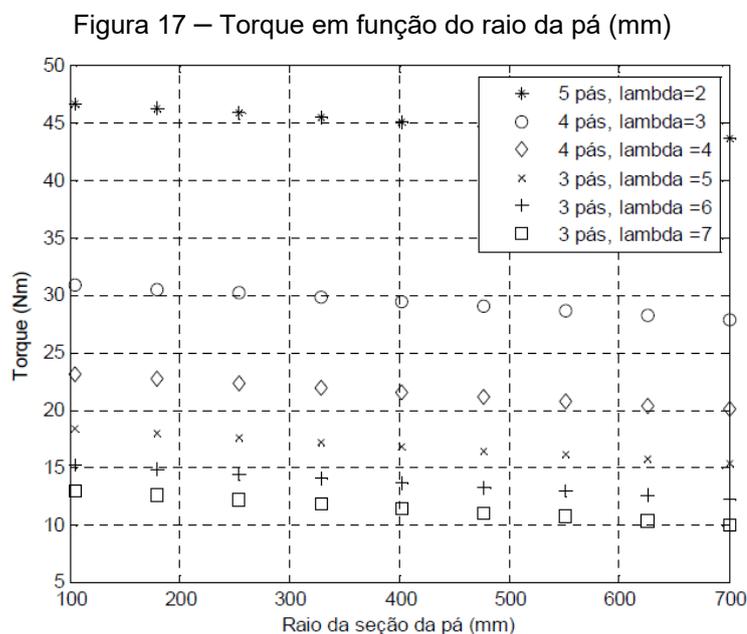
Fonte: Adaptada de Gasch e Twele (2011).

Observa-se, pela Figura 16, que o número de pás reduz o  $\lambda$  e influencia no coeficiente de potência; além disso, quanto menos pás uma turbina tem, mais rápido o rotor da turbina precisa girar para extrair a máxima potência de vento e, conseqüentemente, menos torque. Um fator a ser observado é a solidez, que é a relação entre a área total de pás e a área varrida pelo rotor. Pequenas turbinas eólicas com menos pás do rotor têm menor solidez e usam menos material das pás, o que resulta em menos massa da torre e menores custos de produção (REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012). Segundo Pinto (2013). Esse aspecto também exerce efeito sobre a *performance* da turbina: quando muito alta, resulta em baixa velocidade e alto torque; quando baixa, resulta em alta velocidade e baixo torque e, sob uma faixa razoável, a turbina independe desse parâmetro. Entende-se, portanto, que uma solidez ótima parece ser alcançada com três pás.

### 2.3.4 Número de pás

As TEEHs podem ser confeccionadas com diferentes números de pás. De acordo com Custódio (2013), quando uma pá ocupa o espaço que já é perturbado por outra, há redução da velocidade do rotor. Assim, quanto menor for o número de pás, mais rápido o rotor gira. À medida que aumenta o número de RPM da turbina, a turbulência causada por uma pá afeta a eficiência da pá seguinte. Com menos pás, a turbina pode girar mais

rápido, antes que essa interferência se torne excessiva (PINTO, 2013). Geralmente, para produção elétrica, são necessários alta velocidade de rotação e baixo torque, requerendo poucas pás. Na Figura 17, é possível observar a relação entre o torque da turbina e o número de pás.



Fonte: Verdum (2013).

Turbinas multipás para bombeamento de água devem fornecer um torque de partida para superar o peso e o atrito da estrutura de bombeamento do poço. Ainda, necessitam operar em baixas velocidades de vento, a fim de gerar bombeamento de água contínuo ao longo do tempo. O projeto multipás apresenta grande área do rotor voltada para o vento, que capacita a operação de baixa velocidade e alto torque, além de operar com muito menos velocidade rotacional do que as turbinas com menos pás. As turbinas de três pás, por sua vez, mostram uma operação mais suave e tendem a ser mais silenciosas. As turbinas de uma pá precisam de uma massa para funcionar como contrapeso, e sua eficiência aerodinâmica é bem reduzida em razão das perdas na ponta de pá (PINTO, 2013).

Rotores com menos pás são mais desafiadores do ponto de vista da engenharia, porque exigem estudo aerodinâmico e design de pás mais avançado. Além disso, menos pás permitem geradores e caixas de engrenagens mais compactos, pois a velocidade e o torque do rotor estão ligados ao número de pás do rotor. Por exemplo, um rotor com três pás, em vez de quatro, compensa a falta pá girando mais rápido com torque menor. Ao mesmo tempo, a perda de eficiência é comparativamente baixa. A diferença entre três

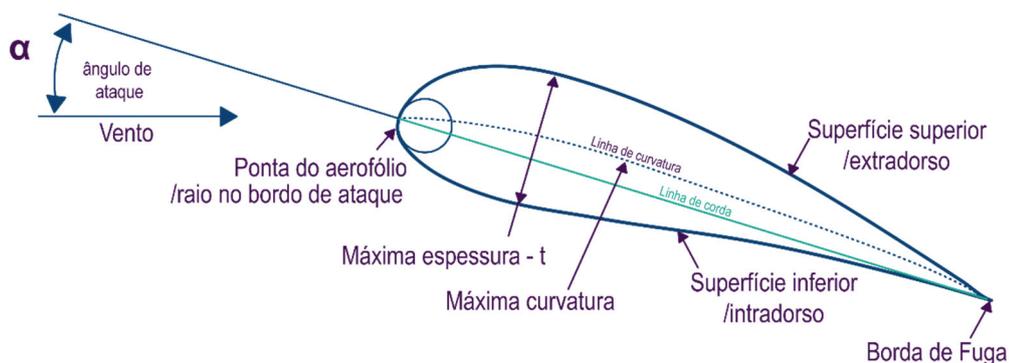
e quatro pás é de apenas 1%. Um rotor com uma ou duas pás é cerca de 3 a 4% menos eficiente do que um rotor de três pás (HAU; RENOARD, 2006).

Assim, pode-se apontar que o número de pás colabora para o desempenho do torque, ou seja, quanto menos pás na turbina, maior é a rotação e há menos torque de partida; em contrapartida, quanto maior o número de pás, menos rotação e mais torque a turbina terá. Observa-se que a rotação aumenta a produção de energia elétrica, porém, em altas rotações, pode haver ruídos e vibrações, fatores que não serão considerados neste estudo.

### 2.3.5 Aerofólio

Um aerofólio pode ser definido como formas geométricas que geram forças mecânicas e que são usadas em pás de turbina eólica. A largura e o comprimento da pá estão diretamente relacionados ao desempenho aerodinâmico desejado e das forças envolvidas (PINTO, 2013). Na Figura 18, são mostrados os elementos compõem a geometria de um aerofólio.

Figura 18 – Perfis aerodinâmico



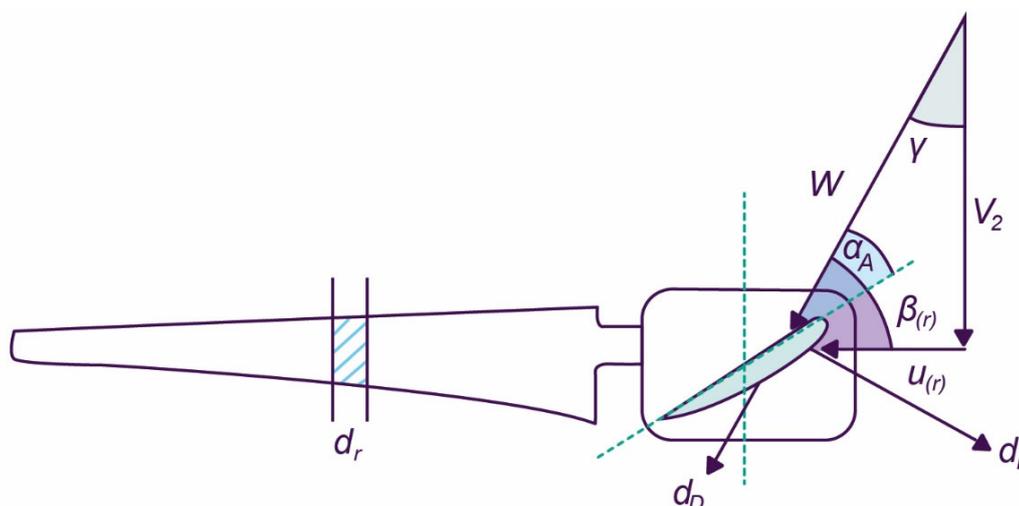
Fonte: Adaptada de Pinto (2013).

Na Figura 18, pode-se observar que o ponto mais distante, localizado na frente do aerofólio, é chamado de bordo de ataque, enquanto o ponto mais afastado, na parte traseira, é chamado de bordo de fuga. A reta que conecta o bordo de ataque ao de fuga é chamada de corda. A curva superior é chamada de extradorso; a curva inferior, intradorso. A curva na metade entre o extradorso e o intradorso é chamada máxima curvatura ou linha de curvatura (*camber*), refere-se à média aritmética das coordenadas da posição vertical do extradorso e intradorso. O ângulo de ataque é a relação entre o ângulo entre a corda e a direção do movimento do ar relativa ao aerofólio. A máxima

espessura é a distância máxima entre a superfície superior e inferior (BURTON *et al.*, 2001; PINTO, 2013).

Assim, o papel do aerofólio é importante na aerodinâmica das pás de uma turbina. O ar que percorre a parte de cima do aerofólio faz uma trajetória maior se comparada à do ar que percorre a trajetória na parte de baixo. Ainda, pelo ponto de vista do princípio de Bernoulli<sup>3</sup>, a pressão exercida na parte superior do aerofólio é menor do que a pressão na parte inferior. Neste contexto, surge uma força vertical, conhecida como força de sustentação, o que fará com que a pá gire, e a força de arrasto promove a resistência ao movimento da pá (PINTO, 2013). Além disso, a pá da turbina percebe o ar que chega a ela e o movimento relativo do vento devido ao movimento da pá, criando uma força resultante, que provoca a sustentação, como apresentado na Figura 19. Nela, são ilustrados os ângulos e o triângulo de velocidades associados ao fenômeno que ocorre na rotação do rotor, em que a velocidade relativa é  $W$ ; o vento incidente,  $v_2$ , e a velocidade tangencial  $u_{(r)}$ , as forças são de sustentação  $d_L$  e de arrasto  $d_D$ .

Figura 19 – Ângulos e triângulo de velocidade



Fonte: Adaptada de Garré (2015) e Gasch e Twele (2011).

Dois importantes vetores são decompostos ao longo de um aerofólio: um é o coeficiente de sustentação, que é normal à velocidade do vento; o outro é coeficiente de

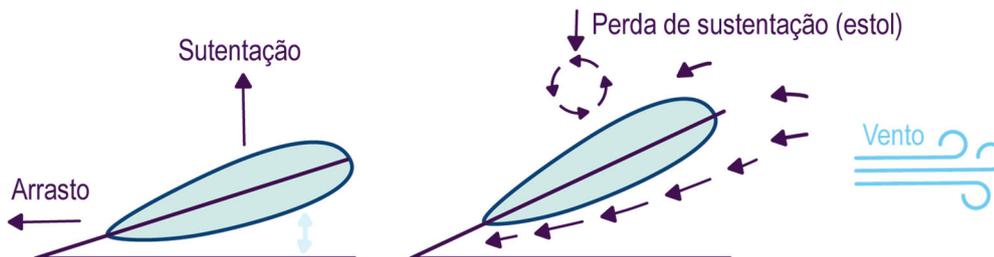
<sup>3</sup> O princípio ou a equação de Bernoulli diz respeito à conservação das energias cinéticas, potencial de escoamento em uma corrente de fluido, e à conservação entre essas formas de energia nas regiões do escoamento, desconsiderando a viscosidade, ou seja, em um fluxo, um aumento na velocidade do fluido ocorre simultaneamente com diminuição na pressão ou diminuição na energia potencial do fluido (CIMBALA; CENGEL, 2012).

arrasto, que é paralelo à velocidade do vento (PINTO, 2013). Esses coeficientes aerodinâmicos são avaliados em função do ângulo de ataque ( $\alpha_A$ ) e estão ligados à eficiência ( $\varepsilon$ ) de um perfil, relacionado com altos valores de coeficiente de sustentação e baixo coeficiente arrasto, conforme a equação 2.8, em que  $\varepsilon$  é a eficiência,  $C_L$  coeficiente de sustentação e  $C_D$  coeficiente de arrasto.

$$\varepsilon = \frac{C_L}{C_D} \quad (2.8)$$

O ângulo de ataque ( $\alpha_A$ ) refere-se à inclinação do perfil em relação à velocidade do vento relativo (GARRÉ, 2015). Aumentar o ângulo de ataque até determinado ponto melhora a sustentação; porém, ao ultrapassá-lo, aumentando demais esse ângulo, o vento então entrará na região conhecida como estol (*stall*). Como mostrado na Figura 20, o vento que passa na parte superior do aerofólio não adere mais na superfície e, como consequência, há perda de sustentação (PINTO, 2013).

Figura 20 – Sustentação e estol



Fonte: Adaptada de Pinto (2013).

Há muitos tipos de aerofólios, com formas e curvatura diferentes, desenvolvidos com finalidades distintas; entre eles, podem ser citados os da família NACA. Esses perfis são classificados por meio de um código contendo informações sobre a geometria do aerofólio e dados das propriedades aerodinâmicas. Além dos aerofólios NACA, há os perfis desenvolvidos por Dr. Franz Xaver Wortmann (1921-1985), da universidade de Stuttgart, identificados pelo código FX de Franz Xaver, que também são adequados para rotores eólicos. Novos aerofólios, desenhados exclusivamente para turbinas eólicas, foram desenvolvidos nos Estados Unidos e na Suécia; por exemplo, as séries LS, SERI e FFA (PINTO, 2013).

Ainda, existem aerofólios projetados para turbinas eólicas, pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos (NREL), com 25 perfis desenvolvidos, pode ser citado o S809. Esses perfis avançados mostram aerodinâmica e vantagens estruturais quando comparados aos perfis desenvolvidos para aeronaves. Como outros exemplos de aerofólios adequados para uso em pequenas turbinas que produzem alta sustentação em baixas velocidades podem ser citados a linha Selig (S1210, S1221, S1223 e SH3055), Eppler E387 e SG 6043 (FLECK, 2017).

Nas micro e pequenas turbinas eólicas, que operam próximo ao nível do mar, em que se encontra a porção mais baixa da camada limite planetária (CLP), o vento é turbulento e desacelerado por obstáculos e pela topologia. Nessa situação, pequenos rotores em baixa velocidade do vento operam com baixo número de Reynolds e são sujeitos ao fenômeno denominado bolhas de separação laminar, em que o fluxo se separa antes de transitar para turbulento, como resultado do gradiente de pressão adversa. Há, portanto, aumento excessivo no arrasto de pressão, perda de sustentação e ruído, assim como modificação no desempenho aerodinâmico do aerofólio, resultando na redução do coeficiente de partida e de potência de uma turbina (SINGH; AHMED, 2013).

Estes aspectos devem ser considerados no projeto de uma microturbina eólica. De acordo com Fleck (2017), a escolha do aerofólio a ser utilizado nas pás das turbinas eólicas é parâmetro fundamental. Para o projeto de uma turbina eólica destinada ao comércio, é essencial os projetistas avaliarem as características aerodinâmicas dos aerofólios que são sendo considerados. Equívocos nos coeficientes aerodinâmicos resultam em erros nas estimativas de desempenho e nas projeções econômicas da turbina.

### 2.3.6 Número de Reynolds

O parâmetro adimensional mais importante para definir as características das condições de escoamento do fluido é o número de Reynolds, definido na equação 2.9, em que  $\rho$  é a densidade do ar,  $\mu$  é a viscosidade do fluxo,  $U$  e  $L$ , que nesta situação é igual a linha de corda, são respectivamente, a velocidade e o comprimento da corda, de que caracterizam a escala do fluxo.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.9)$$

O número de Reynolds é outro fator a ser considerado para determinar o aerofólio no projeto de turbinas, pois afeta os valores de coeficiente de arrasto e sustentação. Em turbinas de grande porte, os números de Reynolds típicos estão na faixa de 500 mil a 10 milhões (PINTO, 2013). Para as microturbinas eólicas, os perfis aerodinâmicos com baixo número Reynolds operam a menos de 500 mil, em que o fluxo que percorre a superfície superior do aerofólio é predominantemente laminar. Os aerofólios nessa faixa de número de Reynolds sofrem com bolhas de separação laminar; por esse motivo, é necessária uma análise adequada dos aerofólios para pequenas turbinas eólicas, visto que alguns recursos podem colaborar para prevenção desse fenômeno — por exemplo, adicionando uma superfície áspera antes do ponto de separação (REZENDE, 2009; SINGH; AHMED, 2013).

Outras otimizações geométricas podem auxiliar a evitar a bolha de separação: aumentar o arqueamento, suavizar os cantos e utilizar perfis assimétricos melhoram o desempenho aerodinâmico em baixos números de Reynolds. Além disso, pode-se selecionar aerofólios mais finos do que os tradicionais que operam em altos números de Reynolds (SINGH; AHMED, 2013).

### 2.3.7 Diâmetro da turbina

O diâmetro da turbina compreende na área que será varrida pelas pás do rotor e está associado com o comprimento da pá e com o cubo. Além disso, relaciona-se com o desempenho da turbina. Mediante a definição desse parâmetro, é possível calcular a área destinada para o cubo, como é apresentado na equação 2.10, na qual  $A_{\text{útil}}$  é a área útil da turbina,  $D$  é o diâmetro externo e  $d$  é o diâmetro interno (o diâmetro interno é aproximadamente na ordem de  $0,05 \cdot D$  para turbinas de grande porte; nas microturbinas, esse valor de ser entre  $0,06 \cdot D$ ).

$$A_{\text{útil}} = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.10)$$

O diâmetro também está associado com a potência nominal da turbina, como mostra a equação 2.11, em que  $D$  é o diâmetro da turbina,  $P_n$  é a potência nominal,  $C_p$  é o coeficiente de potência,  $\rho$  é a densidade do ar, e  $v_n$  é a velocidade nominal.

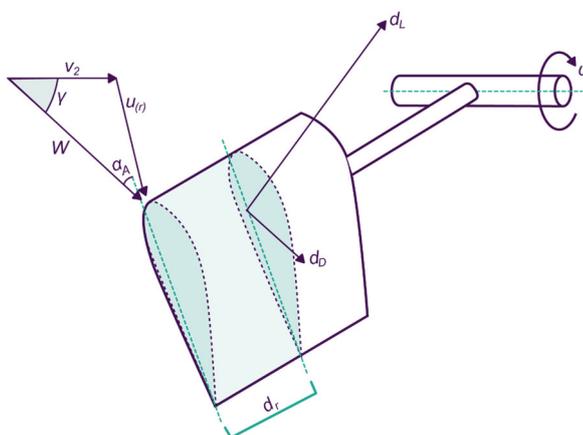
$$D = \sqrt{\frac{8 * Pn}{Cp * \rho * \pi * V_n^3}} \quad (2.11)$$

### 2.3.8 Dimensionamento: Teoria Momento de Elemento de Pá

Em um projeto de otimização dos rotores de turbinas eólicas, geralmente são utilizadas a Teoria da Quantidade de Movimento Axial e a Teoria do Elemento da Pá (em inglês, *Blade Element-Momentum* [BEM]). A análise da Teoria da Quantidade de Movimento Axial pressupõe um volume de controle, no qual os limites são a superfície e duas seções transversais de um fluxo de tubo, e o único fluxo ocorre por meio dessas duas seções transversais (Figura 21). A BEM, ou Teoria de Glauert, analisa a pá dividida em seções transversais, independentes, de largura incremental ( $d_r$ ). As forças em um elemento da pá são calculadas por meio das características bidimensionais do perfil, usando o ângulo de ataque, coeficientes de sustentação e arrasto, bem como a velocidade do vento resultante incidente (ALVES, 2011; FLECK, 2017).

Os resultados dessas abordagens podem ser combinados no que é conhecido como na BEM, usada para relacionar o formato da pá com o rotor e a capacidade de extrair energia do vento. O pressuposto dessa abordagem é que a força de um elemento da pá é o único responsável pela mudança da quantidade de movimento de ar que passa através do anel varrido pelo elemento de pá. Ressalta-se que essa metodologia pressupõe que os perfis consistam em elementos radiais que não interagem entre si, e a sustentação e o arrasto podem ser obtidos a partir de dados bidimensionais de perfis aerodinâmicos, como mostra a (ALVES, 2011; FLECK, 2017).

Figura 21 – Velocidades de fluxo, coeficientes aerodinâmicos e largura incremental



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Aplicando essa teoria, segundo Gasch e Twele (2011), é possível modelar numericamente a corda da pá em função do raio  $e$ , assim, definir a corda local em cada seção  $r$  da pá. Na equação 2.12, é atribuído o coeficiente de potência ótimo de Betz ( $C_{pBetz} = 16/27 = 0,593$ ).

$$C_r = \frac{1}{n} * 2\pi * R * \frac{8}{9} * \left(\frac{1}{C_L}\right) * \frac{1}{\lambda * \sqrt{\lambda^2 * (r/R)^2 + 4/9}} \quad (2.12)$$

Pelo conceito de  $\lambda$ , a pá se move na ponta com velocidade maior do que próximo ao rotor; em tal caso, para manter o ângulo correto, ela teria que ser torcida ao longo de seu comprimento (PINTO, 2013). O ângulo de torção é o resultado da  $\lambda$ , do raio, raio local e do ângulo de ataque, apresentado na equação 2.13.

$$\beta(r) = \arctg\left(\frac{3r}{2R} * \lambda\right) + \alpha_A \quad (2.13)$$

Logo, a geometria do perfil longitudinal da pá está relacionada com o diâmetro do rotor, o número de pás, a razão da velocidade da ponta de pá e o coeficiente de sustentação do aerofólio selecionado. O ângulo de torção,  $\beta(r)$ , é a soma do ângulo formado entre o vento relativo e vento incidente ( $\gamma$ ) com o ângulo de ataque preestabelecido conforme a eficiência do perfil.

A teoria BEM é bastante difundida nos projetos de pás otimizadas, porém é comum — por razão de custos elevados, processo de fabricação e para minimização recursos — que as pás eólicas sofram modificações em seu perfil longitudinal após o processo de modelagem numérica (GARRÉ, 2015; PIRES, 2010).

## 2.4 TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS EXPERIMENTAIS

Neste tópico, serão prestadas algumas ferramentas utilizadas para avaliação experimental de turbinas eólicas. Serão discutidas definições sobre túnel de vento e apresentadas considerações sobre uso de ferramentas computacionais para análise aerodinâmica, impressão 3D e ferramentas de medição, como multímetro, anemômetro e tacômetro.

### 2.4.1 Túnel de vento e túnel aerodinâmico

O túnel de vento é um dispositivo de pesquisa que reproduz um fluxo de ar controlado, a fim de estudar os efeitos do movimento do ar através de objetos sólidos, que podem ser aeronaves, pás eólicas, veículos e outras máquinas e objetos.

As características técnicas de um túnel de vento dependerão da função a que ele será destinado, como uso na aeronáutica, automobilística, acústica, construção civil (BARLOW; RAE; POPE, 1999). No túnel, o projetista pode controlar as condições de fluxo que afetam o desempenho do objeto. O modelo é colocado na seção de teste do túnel, instrumentado para fornecer dados de teste ao engenheiro. Para obter informações significativas, o profissional deve garantir que os parâmetros de similaridade do fluxo do número de Mach<sup>4</sup> e do número Reynolds correspondam às condições de projeto (NASA, 2017). Um túnel de vento pode ser classificado com base na velocidade do fluxo e na forma do dispositivo. No Quadro 2, apresenta-se a classificação com base no primeiro aspecto.

Quadro 2 – Classificação do túnel com base na velocidade do fluxo

<b>Subsônico</b>	Velocidade máxima do fluxo de ar até 135 m/s (Ma 0,4);
<b>Transônicos</b>	Ma 0,4 a 340 m/s (Ma 1)
<b>Supersônicos</b>	Ma 1 a 1715 m/s (Ma 5);
<b>Hipersônico</b>	Ma 5 a 5145 m/s (Ma 15).

Fonte: Adaptado de Barlow, Rae e Pope (1999).

Com relação à forma, existem duas configurações: circuito fechado e circuito aberto. O primeiro — em que a massa de ar circula por uma passagem em torno do túnel, sem abertura externa — envolve menos energia para movimentar o fluxo de ar. Já o circuito aberto — em que a massa de ar passa por aberturas, nas quais o fluido entra e sai — é geralmente menor e apresenta custo mais acessível de fabricação. É possível encontrar duas apresentações de túnel de vento de circuito aberto: por sucção, na qual se usa o ventilador após a seção de testes, e do tipo soprado, em que o ventilador é instalado antes da seção de testes (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

---

<sup>4</sup> O número de Mach (Ma) é uma medida adimensional, parâmetro de análise do escoamento de fluido compressível. É a razão entre a velocidade real do fluido (ou de um objeto no ar imóvel) e a velocidade do som no mesmo fluido (CIMBALA; CENGEL, 2012).

É importante observar que, quando está sendo testado em um túnel de vento, o objeto produz um tipo de “bloqueio do túnel”, que aumenta a velocidade do vento local na seção de teste e, por essa razão, o coeficiente de potência de torque é maior (OLIVEIRA, 2014). Além disso, é necessário distinguir túnel de vento e túnel aerodinâmico: o túnel de vento simula o vento, com os aspectos relativos à topologia do terreno e aos possíveis obstáculos, e com variação da velocidade do vento; no túnel aerodinâmico, o escoamento é uniforme, sem as características do terreno.

#### 2.4.2 Fluidodinâmica computacional

Como citado, o vento assume características oscilatórias e aleatórias. O surgimento de tecnologias computacionais nas últimas décadas proporcionou o desenvolvimento de *softwares* capazes de auxiliar os cálculos de planejamento de instalação de parques eólicos, análise de comportamento do fluido e avaliação de desempenho de partes das turbinas, como as pás.

A fluidodinâmica computacional (em inglês, *computational fluid dynamics* [CFD]), de acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), é uma simulação computacional que envolve escoamento de fluidos, transferência de calor, entre outros fenômenos. A ferramenta abrange ampla gama de áreas de aplicação industrial e não industrial. Alguns exemplos envolvem aerodinâmica de aeronaves e veículos, hidrodinâmica de navios, engenharia elétrica e eletrônica, como resfriamento de equipamentos, incluindo microcircuitos, análise de vento em ambiente externo e interno de edifícios, ventilação, engenharia marítima, como cargas em estruturas *off-shore*, vazões em rios, estuários, oceanos e engenharia biomédica (relacionada à forma como o sangue flui através das artérias e veias).

O processo de CFD envolve muitas etapas e conhecimentos específicos, como entendimento dos princípios físicos das forças em fluidos e conhecimento de cálculos para manipular corretamente os *softwares*, por isso é necessária a capacitação profissional em áreas específicas da engenharia (XIMENES, 2018).

Como alternativa, algumas empresas disponibilizam *softwares* com interfaces mais simples e configurações predefinidas, permitindo simular objetos com rapidez e qualidade (XIMENES, 2018). Uma dessas soluções é o *software* Ansys Discovery, que utiliza uma tecnologia baseada em unidades de processamento gráfico (em inglês, *graphics processing units* [GPU]), com possibilidades de simulação térmica, estrutural, fluido dinâmica e multifásica, a partir de uma única interface. O *software*, destinado a engenheiros, projetistas e designers, antecipa a fase de simulação para início da

avaliação de conceito ou refinamento e otimização do projeto, com tecnologia de simulação em tempo real.

### 2.4.3 Impressão 3D

A prototipagem rápida (*rapid prototyping*) é o termo que designa a produção de protótipos tridimensionais de forma rápida a partir *softwares* como *computer aided design* (CAD) e de sistemas como *computer aided manufacturing* (CAM). Há vários processos disponíveis atualmente, e a manufatura aditiva é um deles. Como característica, esse processo usa máquinas que confeccionam objetos por meio da adição de material, camada por camada. (RODRIGUES *et al.*, 2017). A manufatura aditiva, que ficou conhecida popularmente como impressão 3D, apresenta grandes possibilidades de customização, redução de etapas do processo de fabricação, economia de material, de tempo e custo, quando comparada à produção manual.

Atualmente, a aplicação da prototipagem rápida por meio de processos de usinagem e modelagem tridimensional é cada vez mais usada, pois esses processos promovem facilidade e precisão de execução, otimizando etapas, materiais e ajustes projetuais. Existem várias tecnologias destinadas aos objetivos específicos. As mais comuns são: estereolitografia (em inglês, *stereolithography apparatus* [SLA]), sinterização seletiva a *laser* (SLS), sinterização direta de metal a *laser* (DMLS) e modelagem por fusão e deposição (em inglês, *fused deposition modeling* [FDM]), que foi empregada neste estudo.

A FDM permite a fabricação de protótipos de forma rápida e eficiente. O processo é executado com uso de uma impressora 3D, acionada a partir de um comando numérico. A modelagem ocorre por meio da deposição de filamentos de resina termoplástica, fundida e extrudada, depositada na plataforma de construção (mesa) de acordo com o projeto a ser desenvolvido. O funcionamento da impressora acontece quando o bico extrusor, por onde sai o material fundido, conforme a temperatura escolhida, conectado a um cabeçote, que se movimenta em planos cartesianos (X e Y), distribui o material de acordo com a geometria da camada em construção, criando sucessivas camadas. A plataforma que recebe o filamento é abaixada na direção do eixo Z (RODRIGUES *et al.*, 2017).

Os materiais empregados para esse tipo de impressão por FDM são o acrilonitrila butadieno estireno (em inglês, *acrylonitrile butadiene styrene* [ABS]) e o ácido polilático (em inglês, *polylactic acid* [PLA]), pois eles amaciam com o aumento da temperatura e

endurecem com o resfriamento. O ABS, comumente empregado em impressoras de maior porte, é indicado para a elaboração de protótipos funcionais que sejam resistentes a impactos. Já o filamento em PLA, empregado no estudo em questão, é um material rígido, que facilmente se deforma em temperaturas extremas (frio ou calor).

#### 2.4.4 Instrumentos de medição

No contexto da análise de dados e controle de processos, instrumentos de medição desempenham um papel crucial. Eles podem ser utilizados isoladamente ou em conjunto com outros dispositivos complementares. São dispositivos que fornecem informações sobre o valor da grandeza medida, como voltímetro, micrômetro, termômetro, balança eletrônica, entre outros. Ainda, podem apresentar informações de forma visual ou acústica, além de transmitir um sinal de saída para outros dispositivos (VIM, 2012).

Segundo Balbinot e Brusamarello (2011), os medidores de tensão, corrente e resistência elétrica podem ser denominados multímetros. Trata-se de dispositivos que servem para medir grandezas elétricas, necessários em laboratórios de desenvolvimento ou manutenção de produtos. Eles podem ser analógicos, baseados em efeitos eletromagnéticos, ou digitais, que podem ser considerados conversores analógico-digitais, conectados a um pequeno circuito de tratamento, com um *display*, que fornece a leitura em forma de dígitos.

A velocidade do vento é medida por um instrumento chamado anemômetro (do grego *anemos*, que significa vento). Esse dispositivo, instalado em aeroportos, edifícios, estações meteorológicas e em turbinas eólicas, pode ser encontrado em vários modelos (os mais populares são do tipo concha) (PINTO, 2013). Os dados mensurados são enviados para um sistema de controle e servem para monitoração de aerogeradores (CUSTÓDIO, 2013).

De acordo Pinto (2013), existem outros tipos de anemômetros, como os seguintes:

- de copo — mais comum nas medidas de energia eólica, também são conhecidos por anemômetro de Robinson e consistem em três ou quatro copos igualmente espaçados em um eixo vertical girante (eles são cônicos e de material leve, e sua rotação é fundamentada pela força de arrasto); há também o anemômetro eletrônico de copos, que, no eixo de rotação, é conectado a um sistema eletrônico;
- de pressão — primeiros dispositivos desenvolvidos para medir o fluxo de vento, configuram-se em uma placa equilibrada no final de um braço horizontal acoplado em um eixo vertical rotatório;

- tubo de Pilot — dispositivos usados na indústria espacial e em túneis de vento, com princípios de medição, são baseados na equação de Bernoulli;
- termoelétricos (de fio-filme quente) — dispositivos cujo funcionamento é baseado na troca de calor entre um sensor e o fluido, são indicados para baixas velocidades;
- *laser* — dispositivos baseados no efeito Doppler, um feixe de luz dividido em dois feixes que se cruzam em seguida (um deles entra no anemômetro), e a velocidade é determinada com base na quantidade de luz refletida pelas partículas em movimento;
- sônicos ou de fase — dispositivos para verificar a velocidade do vento por sensores que detectam mudanças na velocidade do som no ar.
- digital — contém um sensor de velocidade do ar que faz a captura dos dados, e a informação é apresentada em um visor digital.

Os instrumentos que medem a velocidade de rotação são denominados tacômetros e, segundo Braga (2002), são muito utilizados em diversos processos industriais. Os tacômetros podem ser agrupados em duas categorias: de contato, que necessitam de acoplamento mecânico direto ao eixo ou objeto girante, e sem contato, que não requerem acoplamento mecânico e podem utilizar diversos princípios de acionamento (óptico, magnético, capacitivos, eletromagnéticos, entre outros). O processamento para fornecer uma saída em RPM geralmente é eletrônico.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, serão apresentadas a caracterização da pesquisa e as etapas para elaboração e execução a fim de cumprir os objetivos estabelecidos.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia utilizada, do ponto de vista da abordagem do problema, tem caráter quantitativa, realizada a partir do método experimental. Na abordagem quantitativa, considera-se tudo que pode ser quantificável e mensurável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las (PRODANOV; FREITAS, 2013; SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2013).

Além disso, esta pesquisa tem objetivo explicativo, pois visa conectar ideias para compreender as causas e os efeitos de determinado fenômeno ou anomalia, a fim de explicar o que está acontecendo, além de aprofundar e qualificar o conhecimento projetual e científico sobre o tema de estudo (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa se delinea como experimental, que consiste em submeter os objetos de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas, para observar os resultados que a variável produz sobre objeto de estudo (GIL, 2002). Portanto, será realizada mediante mensuração de dados, por intermédio de simulação de fluidodinâmica computacional (CFD) e ensaios experimentais em túnel aerodinâmico.

#### 3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Para melhor compreensão, este estudo foi organizado em quatro macroetapas nomeadas da seguinte forma: (i) **problematização** — formula e delimita o problema a ser investigado a partir da fundamentação teórica, determinando os estudos de referência e as variáveis do projeto; (ii) **ideação** — com o conhecimento adquirido na etapa anterior, inicia-se o dimensionamento das pás e a modelagem tridimensional por meio de *software computer aided design* (CAD) 3D; (iii) **prototipação** — etapa de materialização da ideia, com a utilização de impressão 3D e o desenvolvimento de uma microturbina para apoio aos ensaios experimentais; (iv) **experimentação** — consiste na avaliação dos modelos por meio da simulação de fluidodinâmica, ensaios experimentais em túnel aerodinâmico. Além da tabulação e da análise de dados de forma descritiva, as macroetapas estão organizadas no fluxograma da pesquisa, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Seguindo os pressupostos de Lakatos e Marconi (2017), relacionaram-se os objetivos específicos da pesquisa com os procedimentos metodológicos a serem adotados, representados na Figura 22. O fluxograma conecta cada macro e microetapa com os objetivos; assim, é possível visualizá-las e categorizar as fases de desenvolvimento da pesquisa.

Na primeira etapa, que consiste na problematização, utilizou-se a pesquisa de Jeon *et al* (2020) sobre o desenvolvimento de um modelo de turbina *loop-type* como referencial conceitual e teórico para design de novas pás.

Paralelamente, o estudo de Oliveira (2017) guiou alguns parâmetros de projeto para essa pesquisa, como velocidade de vento e diâmetro da microturbina. As pesquisas de Ximenes (2018) e Miritz (2019) contribuíram para a definição do método de trabalho e a estruturação da pesquisa, pois os autores pesquisaram difusores para turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical, respectivamente. Os três últimos estudos citados 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 LDSM da UFRGS.

A partir das definições de estudos de referência, optou-se por analisar dois modelos de pás, o tipo hélice e o tipo *loop-type* — o modelo tipo hélice foi utilizado para

o desenvolvimento do modelo tipo *loop-type*. Para o desenvolvimento do modelo tipo hélice, foram realizadas uma busca de perfis aerodinâmicos que operam com baixo número de Reynolds e uma análise no *software* QBlade (*software* de código aberto desenvolvido pelo Hermann Föttinger Institute of TU Berlin) para definição do melhor ângulo de ataque. Após a escolha do perfil aerodinâmico, utilizou-se a teoria BEM, método que analisa a pá dividida em seções transversais, independentes, de largura incremental.

Após as definições de ângulos de torção e comprimento de corda de perfil, foram modeladas as duas formas de pás em *software* CAD 3D. As pás foram prototipadas em impressora 3D para ensaios experimentais em túnel aerodinâmico; além disso, foram desenvolvidos uma nacele e um suporte para o microrrotor, modelados em CAD e impressos em 3D.

Para avaliação dos modelos, foi realizada uma simulação de fluidodinâmica computacional entre as pás, utilizando o *software* ANSYS Discovery 2022 R2, versão estudantil. Com intuito de verificar a velocidade de saída do domínio de controle e relacionar com os modelos desenvolvidos, além de zonas de vórtices da ponta de pá.

Ainda, utilizou-se o túnel aerodinâmico de circuito aberto do tipo aspirador (*suckdown*), localizando no LDSM-UFRGS, para os ensaios físicos. A finalidade desses testes é apontar a melhor relação entre potência elétrica e velocidade de partida dos modelos desenvolvidos. Os dados coletados nos ensaios foram triangulados, o que permitiu analisar e comparar o desempenho dos modelos desenvolvidos.

Além da execução das etapas, foi realizado o registro de desenho industrial das geometrias selecionadas junto à Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico (SEDETEC) da UFRGS, órgão responsável pelos assuntos relativos à propriedade intelectual e transferência de tecnologia, envolvendo a interação da Universidade com empresas e instituições públicas. Concomitantemente, foi elaborado um capítulo de livro, a partir de um excerto do desenvolvimento da pesquisa.

Vale ressaltar que o processo não foi linear, principalmente nas fases de impressão e experimentos; ainda, e em muitos casos, foi necessário realizar ajustes na modelagem para comportar as especificidades de cada tipo de processo. No caso dos ensaios virtuais, foi necessário unificar os componentes, pás e cubo, para melhor manipulação do objeto no *software*. Já para realizar as impressões 3D, foi necessário adicionar 0,4mm na espessura na superfície dos modelos, para concluir a impressão. Todas as macro e microetapas serão detalhadas nas próximas seções.

### 3.3 PROBLEMATIZAÇÃO

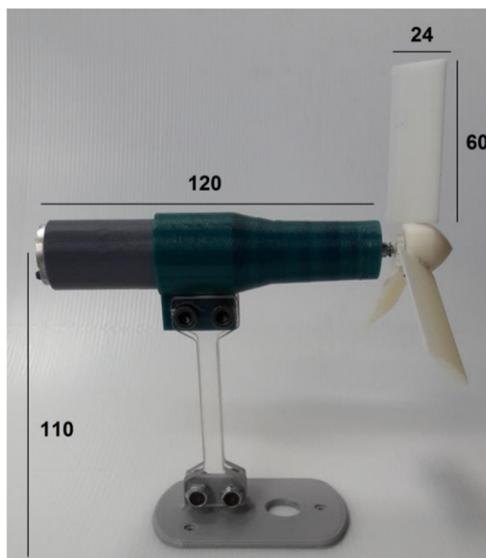
Com a finalidade de estruturar o estudo, utilizaram-se as perguntas bonsipianas como ferramenta de alinhamento projetual. Esse processo auxiliou a ter clareza dos passos a serem tomados para resolução do problema da pesquisa (BONSIEPE, 1984; XIMENES, 2018).

- **O quê?** Desenvolver dois modelos de pás para microturbina eólica, baseando-se na teoria do BEM e no estudo de Jeon *et al* (2020), visando melhor relação entre a velocidade de partida e a potência em baixas velocidades de vento.
- **Por quê?** O design de pás para microturbina eólica de eixo horizontal é um aspecto importante na eficiência de microturbinas, pois é o elemento que, em contato com o fluido, cria o diferencial entre pressões, o que resulta em sustentação (GASCH; TWELE, 2011; PINTO, 2013; REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012).
- **Como?** Desenvolvendo dois modelos de pá, tipo hélice e tipo *loop-type* e observando qual deles apresenta o melhor resultado na simulação de fluido dinâmica e nos ensaios experimentais, verificando a melhor relação entre a velocidade de partida e a potência elétrica em baixas velocidades de vento.

#### 3.3.1 Estudos de referência

Para o desenvolvimento deste tópico, adotou-se o estudo de Oliveira (2017) como primeira referência. A autora analisou perfis NACA com diferentes ângulos de passo com vistas à microgeração de energia eólica. Para tal, realizou-se levantamento das velocidades de vento na parte superior de um prédio localizado no centro de Porto Alegre durante 5 dias, e os perfis aerodinâmicos foram testados no programa computacional Q-Blade. Foram selecionados 3 perfis NACA (0012, 6409, 1412), 3 ângulos de passo (15°, 30° e 45°) e 5 velocidades de vento (de 1 a 5 m/s). Na Figura 23, é possível observar o protótipo elaborado pela autora.

Figura 23 – Estrutura de aerogerador – estudo de referência 1



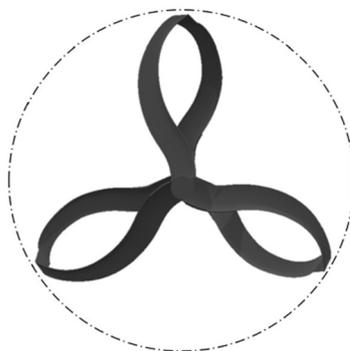
Fonte: Oliveira (2017)

Os modelos foram prototipados em impressão 3D e testados no túnel aerodinâmico localizado no LDSM da UFRGS. Foram aferidos: o número de rotação por minuto (RPM), a velocidade de vento da partida da hélice, a tensão, a corrente e a potência elétrica geradas para diferentes configurações de ensaio. Os resultados desse estudo apontaram que o ângulo de passo de  $45^\circ$  apresenta os maiores índices de rotação, tensão, corrente e potência elétrica para todos os perfis NACA analisados, e o perfil NACA 0012 é o de mais destaque em relação a esses mesmos parâmetros (OLIVEIRA, 2017).

No estudo de Jeon *et al.* (2020), foi criada uma turbina eólica do tipo *loop-type*, como é possível observar na Figura 24, que se caracteriza com o eixo horizontal, mas com uma pá de formato diferenciado. O estudo realizou análises de fluidodinâmica computacional e ensaios experimentais para validar a turbina. Segundo os autores, há uma carência de estudos que abordam esse tipo de forma para turbinas eólicas.

Para o dimensionamento, os autores em comento utilizaram a teoria BEM; as pás são de 1m de comprimento, porém foram prototipadas na escala de 1/15 e testadas em túnel de vento. Para os testes de fluidodinâmica, foi utilizado o *software* Fluent Ansys. Após os testes, a turbina demonstrou um coeficiente de potência de 43%.

Figura 24 – Turbina eólica *loop-type* – estudo de referência 2



Fonte: Jeon *et al.* (2020).

### 3.3.2 Restrições do projeto

Para o projeto de pás, algumas ações foram consideradas, como as listadas e descritas a seguir:

- 1) desenvolver as geometrias considerando a teoria BEM para determinar o comprimento da corda  $C_r$ , conforme visto na fundamentação teórica, na seção 2.3.8;
- 2) utilizar a dimensão do raio das pás e a velocidade de vento estudadas por Oliveira (2017) como determinação de parâmetros de dimensionamento do perfil e considerar como referência para análise dos ensaios em túnel aerodinâmico;
- 3) desenvolver um modelo de pá utilizando como referência conceitual e tecnológica o estudo de Jeon *et al.* (2020);
- 4) considerar as dimensões da seção de testes do túnel de vento físico do LDSM/UFRGS em que serão realizados os testes aerodinâmicos.

### 3.3.3 Determinação das variáveis do projeto

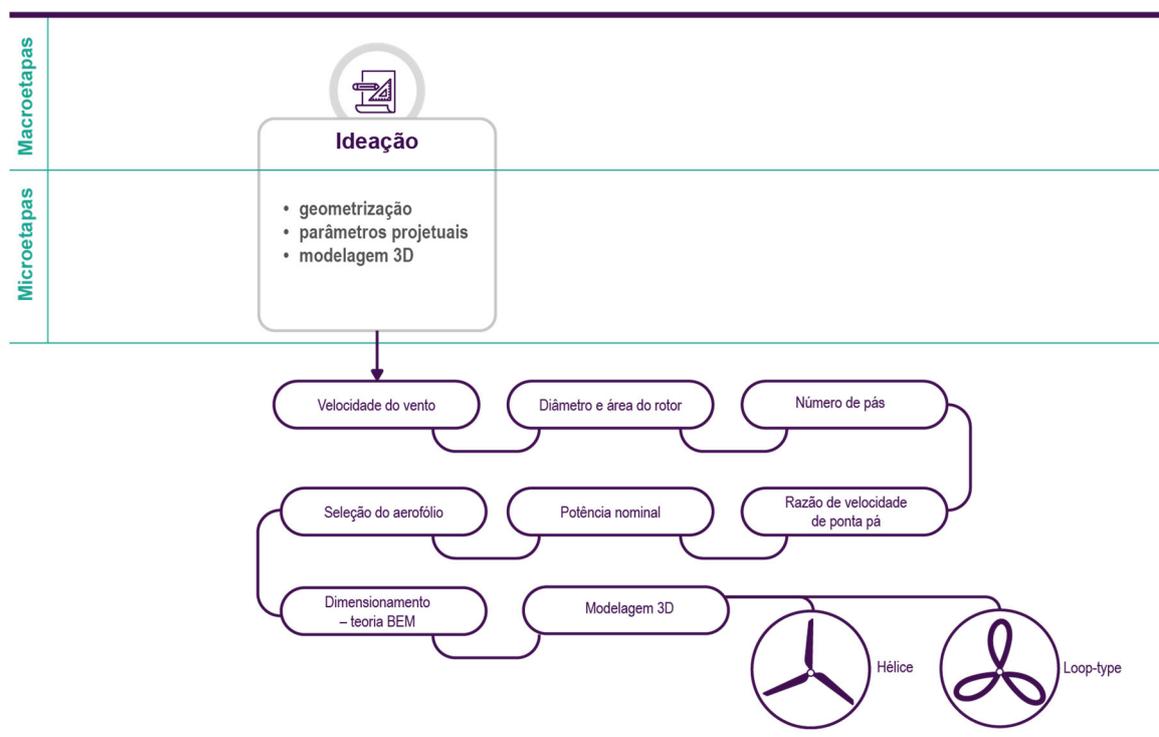
Como já definido, a pesquisa assume procedimento técnico-experimental, em que se manipulam variáveis para analisar os resultados produzidos no objeto de estudo. Variáveis são, segundo Prodanov e Freitas (2013), características observáveis do fenômeno a ser estudado que possuem correlação entre si. Por se referir a 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 outra dependente (PRODANOV; FREITAS, 2013). Neste estudo, a variável independente será a geometria do perfil da pá, que será manipulada a fim de verificar sua influência nas variáveis dependentes: a velocidade de partida e a potência elétrica.

### 3.4 IDEAÇÃO

#### 3.4.1 Geometrização

Para o dimensionamento dos modelos de pás, utilizou-se a teoria BEM, atribuindo o coeficiente de potência ótimo, conforme teoria de Betz. Esse modelo teórico, apontado na seção 2.3.8, é bastante difundido no design de pás (COUTINHO, 2008; FLECK, 2017; GARRÉ, 2015). A partir desses conceitos, foram definidas as geometrias hélice e *loop-type*. Na Figura 25, serão detalhadas as microetapas do desenvolvimento do modelo de referência.

Figura 25 – Etapas desenvolvimento do modelo de referência.



Fonte: Elaborada pela autora (2022)

##### 3.4.1.1 Velocidade do vento e diâmetro e área do rotor

Como mencionado, esta pesquisa tem por base o estudo de Oliveira (2017), relacionado ao design de pás para aerogeradores de eixo horizontal orientado à microenergia, em que foram analisados ângulos de passo e de perfis de pás para microturbinas eólicas submetidas a diferentes velocidades de vento. Além das análises das pás, o estudo realizou medições de vento em um prédio de 14 andares localizado na

região central da cidade de Porto Alegre/RS, na Avenida Osvaldo Aranha, e obteve uma velocidade média de vento de 2,86m/s.

A partir dos dados de velocidade média, foi possível estipular a velocidade nominal da microturbina, sendo considerada a ordem de 1,2 a 2 vezes a velocidade média de uma região. A microturbina do presente estudo apresentará, então, por decisão de projeto, uma velocidade nominal de 5m/s, ou seja, em torno de 1,75 vezes a velocidade média.

Outra contribuição para esta pesquisa será o diâmetro do rotor estabelecido no estudo referido, que é de 142mm (OLIVEIRA, 2017). A partir desse parâmetro, foi possível calcular a área do microrrotor, assim como os diâmetros externo, interno e efetivo, utilizando a equação 2.10.

#### 3.4.1.2 *Número de pás e razão de velocidade de ponta pá*

O número de pás é um aspecto importante na decisão do projeto, visto que, assim como as turbinas de grande e médio porte, a maioria das microturbinas possuem três pás (CUSTÓDIO, 2013; PINTO, 2013; REINDERS; DIEHL; BREZET, 2012). Conforme a revisão de estudos sobre microturbinas, porém, além de três, também é possível encontrar turbinas com quatro e cinco pás.

A quantidade de pás em uma turbina está relacionada à velocidade de vento mínima necessária para partida da máquina. Por essa razão, optou-se por investigar o uso de três pás para a microturbina, já que é considerada a configuração ideal nas TEEHs (CUSTÓDIO, 2013; PINTO, 2013). Considerando as limitações técnicas de prototipagem e para que a dimensionalidade do perfil fique mais próxima do que das dimensões estipuladas, a razão de velocidade de ponta de pá foi atribuída em 4,5.

#### 3.4.1.3 *Potência nominal*

Para calcular a potência nominal teórica, usou-se a equação 2.4, isolando a potência e assumindo que o coeficiente de potência é igual ao coeficiente ótimo de Betz ( $C_{pBetz} = 16/27 = 0,593$ ). Essa técnica de dimensionamento prevê o máximo de aproveitamento de energia cinética do vento.

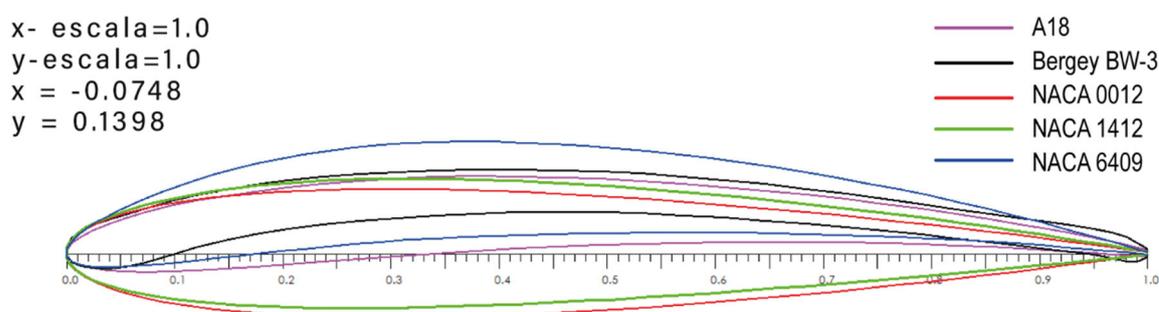
#### 3.4.1.4 *Seleção do aerofólio*

As pás desenvolvidas neste estudo destinam-se a operar em baixas velocidades de vento, portanto é relevante que o perfil selecionado tenha um coeficiente de sustentação satisfatório, aliado a baixos coeficientes de arrasto. Para analisar os aerofólios, utilizou-se o *software* QBlade. Assim, inicia-se informando a característica do

fluido, se compressível ou incompressível, e o tipo de regime de escoamento, turbulento ou laminar. Logo, o número de Reynolds e o número de Mach são parâmetros fundamentais.

Para a seleção, buscaram-se perfis que possibilitassem bom desempenho para baixos números de Reynolds. Como ponto de partida, utilizaram-se os estudos revisados de microturbina eólica, em que foram identificados os seguintes perfis: NACA 0012, NACA 1412, NACA 6409 e BW-3. Além disso, selecionou-se o perfil A18, visto que obteve boa relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto em baixo número de Reynolds, conforme estudo de Tarhan e Yilmaz (2016), no qual foram analisados 14 perfis em CFD com Reynolds de 50 mil. A Figura 26 apresenta a seleção dos perfis.

Figura 26 – Geometria dos perfis selecionados



Fonte: Adaptada do *software* QBlade (2019).

Neste momento do projeto, o valor da corda do perfil é um parâmetro desconhecido, por isso foi estipulado um parâmetro hipotético de linha de corda de 25% do valor do raio da pá. Para estipular o número de Reynolds, foi aplicada a equação 2.9, em que o comprimento é a dimensão da seção da corda bidimensional, e a velocidade do fluido e a velocidade é a velocidade relativa ( $W$ ). Salienta-se que a velocidade relativa ( $W$ ) é calculada como a raiz dos quadrados de  $v_2$  (vento incidente e velocidade) e o produto de  $U_{(r)}$ , (velocidade tangencial). O número de Mach foi estipulado como 0,1, subsônico incompressível.

Esse processo é iterativo; portanto, após calcular o valor da corda, será necessário retornar à inserção de dados no *software* QBlade para conferir as curvas de  $C_L$  e  $C_D$  e o ângulo de ataque ( $\alpha$ ) em função do número de Reynolds. Na Tabela 2, são apresentados os resultados aplicando os parâmetros estabelecidos.

Tabela 2 – Resultados do Número de Reynolds

Número de Reynolds (Re)	50.000 e 100.000
Velocidade relativa ( $W$ )	33,72m/s
Velocidade angular ( $\omega$ )	502rad/s
Corda hipotética ( $C$ )	0,0166m

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A relação entre  $C_L$  e  $C_D$  ( $\epsilon$ ) modifica-se de acordo com o número de Reynolds e é possível perceber que, em baixos números de Reynolds, a relação entre os coeficientes é menor. Para fins de obter um segundo parâmetro de comparação, utilizou-se também o número de Reynolds de 100 mil. Após a inserção dos dados no *software*, foram analisadas as curvas de arrasto ( $C_D$ ) e sustentação ( $C_L$ ), de acordo com o ângulo de ataque ( $\alpha$ ), além do  $\epsilon$  ótimo. Os gráficos (Apêndice 2) foram convertidos em um arquivo de textos (formato .csv), o que possibilitou uma análise mais aprofundada dos dados. Depois do estudo, tabularam-se os dados conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Eficiência dos perfis selecionados

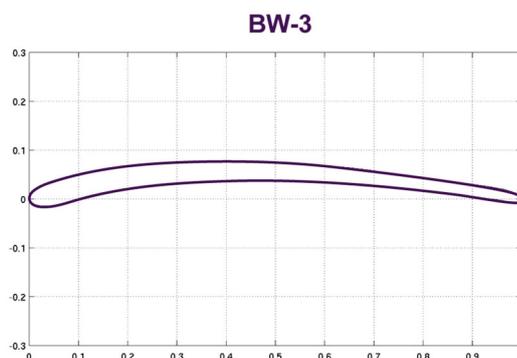
Re 50.000				
Perfil	$\epsilon = C_L / C_D$	$\alpha$	$C_L$	$C_D$
NACA 0012	25,43	5	0,6178	0,0243
NACA 1412	29,32	6,5	0,8222	0,0280
NACA 6409	23,96	11	1,3427	0,0560
A18	46,83	6	1,0817	0,0231
BW-3	49,14	5	1,1155	0,0227
Re 100.000				
NACA 0012	36,60	5	0,6140	0,0168
NACA 1412	44,23	6	0,7858	0,0178
NACA 6409	62,34	8,5	1,5030	0,0241
A18	67,72	5,5	1,0615	0,0157
BW-3	60,72	4,5	1,0569	0,0174

Fonte: Adaptada do *software* QBlade, 2019.

No desenvolvimento de pás destinadas a turbinas eólicas de médio e grande porte, é comum utilizar combinações de diferentes perfis; todavia, para microturbinas eólicas, geralmente aplica-se um único perfil ao longo da pá. Perfis grossos, utilizados na região próxima à raiz para o centro da pá, empregados em grandes pás eólicas, apresentam mau desempenho em baixos número Reynolds (POURRAJABIAN; EBRAHIMI; MIRZAEI, 2014). Além disso, para simplificar a complexidade da geometria, aplicou-se um único aerofólio. A utilização de diferentes perfis poderia gerar descontinuidades em ângulos de ataque e geometria, o que resultaria em variações abruptas de pressão, diminuindo a otimização da pá.

O perfil escolhido para o projeto foi o BW-3 na versão suavizada, por apresentar uma boa relação entre relação entre  $C_L$  e  $C_D$  ( $\epsilon$ ), principalmente em baixos número de Reynolds (50 mil), como pode ser visualizado na Figura 27.

Figura 27 – Bergey BW-3



Fonte: Adaptada de UIUC *Airfoil Coordinates Database* (2019)

O perfil BW-3 foi desenvolvido pela Bergey Windpower, empresa americana que desenvolve pequenas e microturbinas eólicas. Ao contrário de outros aerofólios, foi projetado com espessura relativa de 5% do comprimento da corda. De acordo com Akour *et al.* (2018), o perfil BW-3 aparentemente não apresenta a formação de bolhas de separação em número de Reynolds de 100 mil, fenômeno em que o fluxo se separa antes de transitar para turbulento, como resultado do gradiente da pressão adversa.

O alto coeficiente de sustentação desse aerofólio o torna adequado para pequenas pás de turbinas eólicas. Além disso, fornece à turbina um alto torque de partida com baixas velocidades de vento (AKOUR *et al.*, 2018). Após a escolha do perfil, iniciou-se o processo de dimensionamento do comprimento da corda.

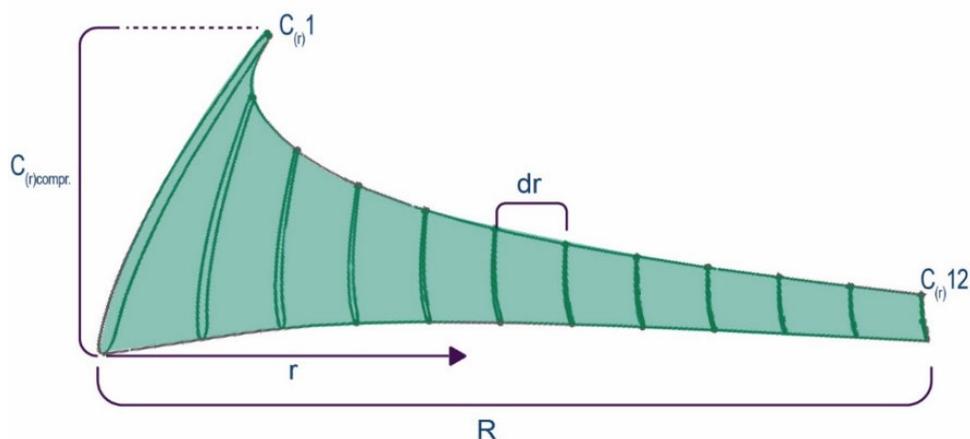
#### 3.4.1.5 Dimensionamento – Teoria BEM

Com os parâmetros de velocidade e raio, e selecionados os perfis em função do coeficiente de sustentação ( $C_L$ ) e o ângulo de ataque ( $\alpha$ ), utilizou-se a teoria BEM apresentada na seção 2.3.8, para dimensionar as cordas que irão compor o perfil longitudinal da pá.

Conforme essa teoria, a pá pode ser dividida em frações elementares ao longo do raio do rotor, e cada um desses elementos age independentemente dos demais (COUTINHO, 2008). Para os cálculos, foram utilizadas as equações 2.12 para a corda e

2.13 para o ângulo de torção. Na Figura 28, é apresentado o perfil longitudinal com o perfil BW-3 e os elementos da pá.

Figura 28 – Perfil longitudinal e elementos da pá



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Na Figura 28, é possível observar a divisão do raio ( $R$ ) da pá, composta por 12 cordas ( $C_{(r)}$ ), e cada uma com seu comprimento ( $C_{(r)\text{compr.}}$ ). A largura incremental ( $dr$ ) é uniforme, com valor constante de 5,5mm, disposta ao longo do eixo ( $r$ ). Verifica-se também a torção da pá, que permite manter o perfil no ângulo de ataque ótimo, já estipulado na seção anterior.

### 3.4.2 Parâmetros do projeto

Neste tópico, consta uma síntese dos parâmetros utilizados e estabelecidos para desenvolver o dimensionamento das pás de referência. Na Tabela 4, é apresentada a potência nominal, assumindo hipoteticamente que o coeficiente de potência ótimo de Betz (59,9%). Além disso, a área varrida pela turbina é  $A = 0,01577\text{m}^2$ , ou  $15,77\text{mm}^2$  – em que a potência prevista é equivalente é de 0,50W, ou 500mW; estipularam-se 15% de perdas para o microrrotor.

Tabela 4 – Parâmetros do projeto definidos

Descrição	Valores	
Potência nominal ( $P_n$ )	500	mW
Velocidade nominal	4,76	m/s
Velocidade média ( $V_m$ )	2,86	m/s
Área do rotor	15,60	$\text{mm}^2$
Diâmetro do rotor	142	mm

(continua)

Descrição	Valores	
Raio efetivo	60	mm
Número de pás (n)	3 / 6	Adimensional
TSR ( $\lambda$ )	4,5	Adimensional
Eficiência total ( $\eta$ )	85%	Adimensional
Massa específica ( $\rho$ )	1,225	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade Cinemática do fluido ( $\mu$ )	1,5111e-5	m <sup>2</sup> /s

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Os dados da plotagem da corda em função do raio e o ângulo de torção são apresentados na Tabela 5. Salienta-se que esse método é uma versão simplificada e que foi desconsiderado o coeficiente de arrasto para modelagem numérica. Cada corda foi alinhada a um quarto do seu comprimento; além disso, cada elemento possui o ângulo de ataque ideal em relação à velocidade relativa local ( $W_{(r)}$ ) (GASCH; TWELE, 2011).

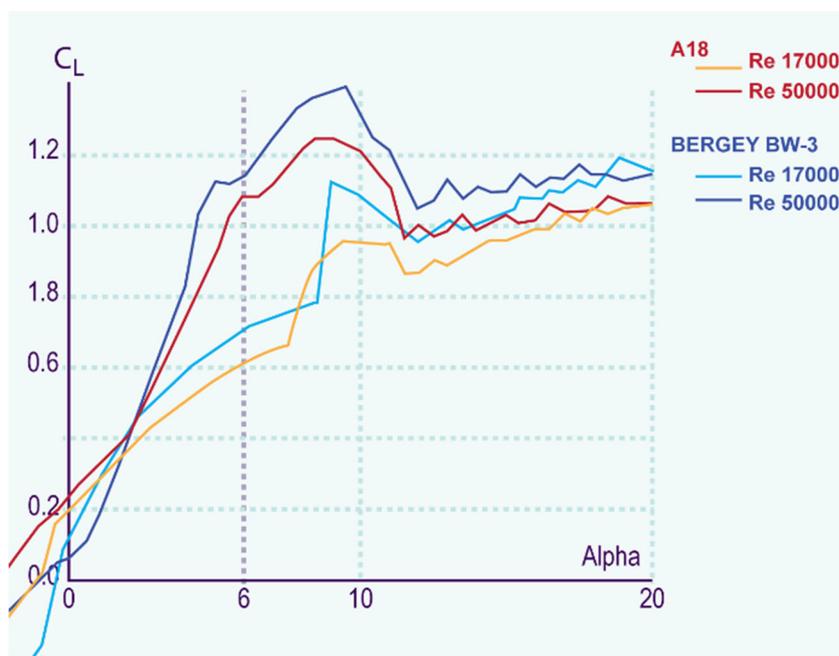
Tabela 5 – Resultados do dimensionamento da corda e do ângulo de torção

Seção da pá	Distância do Cubo (mm)	BW-3		
		Linha de Corda (mm)	$\beta$ [deg]	$\frac{1}{4}$ da Corda (mm)
1	5	30,30	46,18	7,57
2	10	23,09	65,25	5,77
3	15	17,72	74,14	4,43
4	20	14,12	79,05	3,53
5	25	11,64	82,12	2,91
6	30	9,87	84,21	2,46
7	35	8,55	85,72	2,13
8	40	7,54	86,86	1,88
9	45	6,73	87,76	1,68
10	50	6,08	88,48	1,52
11	55	5,54	89,06	1,38
12	60	5,09	89,55	1,27

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Após o dimensionamento da geometria da pá, verificou-se se os valores obtidos para os números de Reynolds em função da corda hipotética e o valor médio de corda dimensionada estavam próximos, conforme o Gráfico 1 – Comparação do número de Reynolds – BW-3 e A18, a seguir.

Gráfico 1 – Comparação do número de Reynolds – BW-3 e A18



Fonte: Adaptada do software QBlade, 2019.

A diferença entre o valor inicial do número de Reynolds para o final é em torno de 35% (número de Reynolds: 17 mil), e se observou que o  $C_L$  e o ângulo de ataque  $\alpha$  não obtiveram grandes variações, portanto mantiveram-se os parâmetros estabelecidos.

### 3.4.3 Modelagem 3D

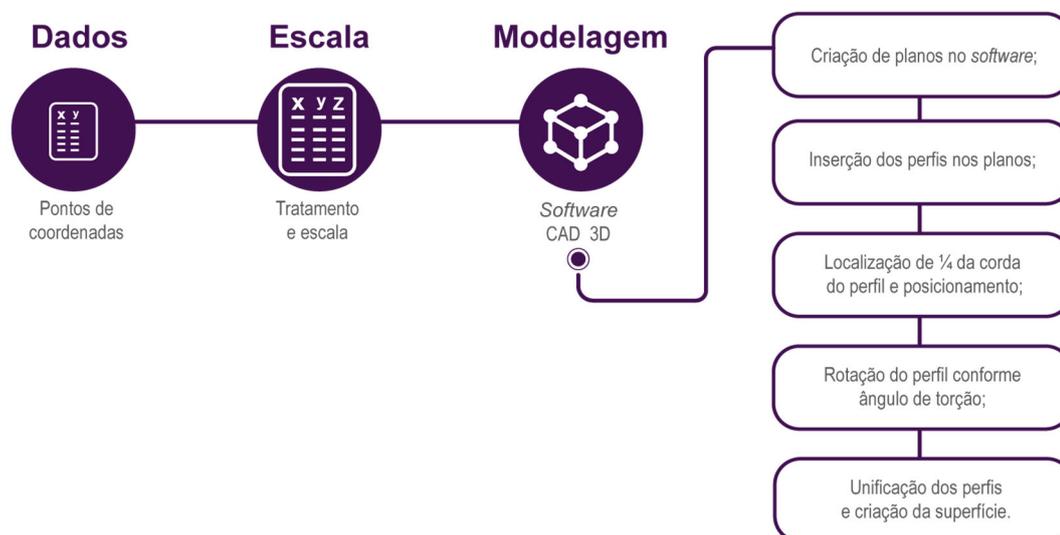
Concomitante ao dimensionamento das pás, foram realizadas as modelagens tridimensionais (3D) por meio do *software* CAD 3D. Ao finalizar o processo, foram exportados em formato de arquivos *standard triangle language* (STL), que apresenta possibilidade de ser suportado por outros pacotes de *softwares* e é utilizado para impressão em 3D.

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 impressoras 3D.

A primeira etapa para a modelagem envolveu a captura dos pontos de coordenadas do perfil Bergey BW-3 no banco de dados de aerofólios da Universidade de Illinois em Chicago (UIUC, 2019). O *site* disponibiliza os pontos de coordenadas por intermédio de um arquivo .txt. e, a partir disso, foi possível dimensionar cada linha de corda com o valor dimensionado, conforme apresentado na Tabela 5. Após, iniciou-se o

processo de modelagem tridimensional com uso do *software* CAD 3D, conforme as etapas descritas na Figura 29.

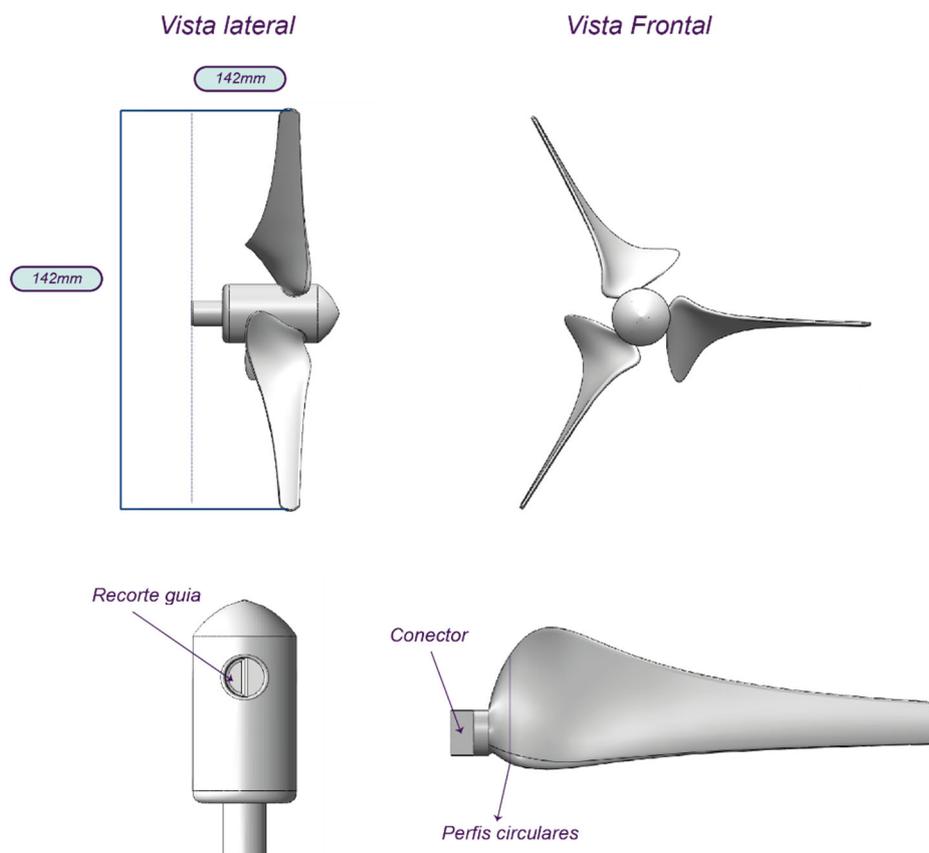
Figura 29 – Etapas para modelagem tridimensional da pá



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Os dados das coordenadas foram inseridos de forma paramétrica no *software* CAD 3D, e a distância entre os planos corresponde aos valores descritos na Tabela 5, na coluna “distância do cubo (mm)”. Cada corda foi posicionada, e foi feita a rotação do perfil conforme o ângulo de torção. A última etapa envolveu gerar a superfície do modelo hélice. Após a modelagem, as pás foram arranjadas em torno do cubo, em um padrão circular, mantendo uma distância igual; a ponta de pá foi suavizada para minimizar vórtices. Na parte posterior do cubo, consta uma perfuração de 3mm para ser acoplado no eixo do suporte de teste, como é possível observar na Figura 30.

Figura 30 – Configurações do modelo de pá tipo hélice



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

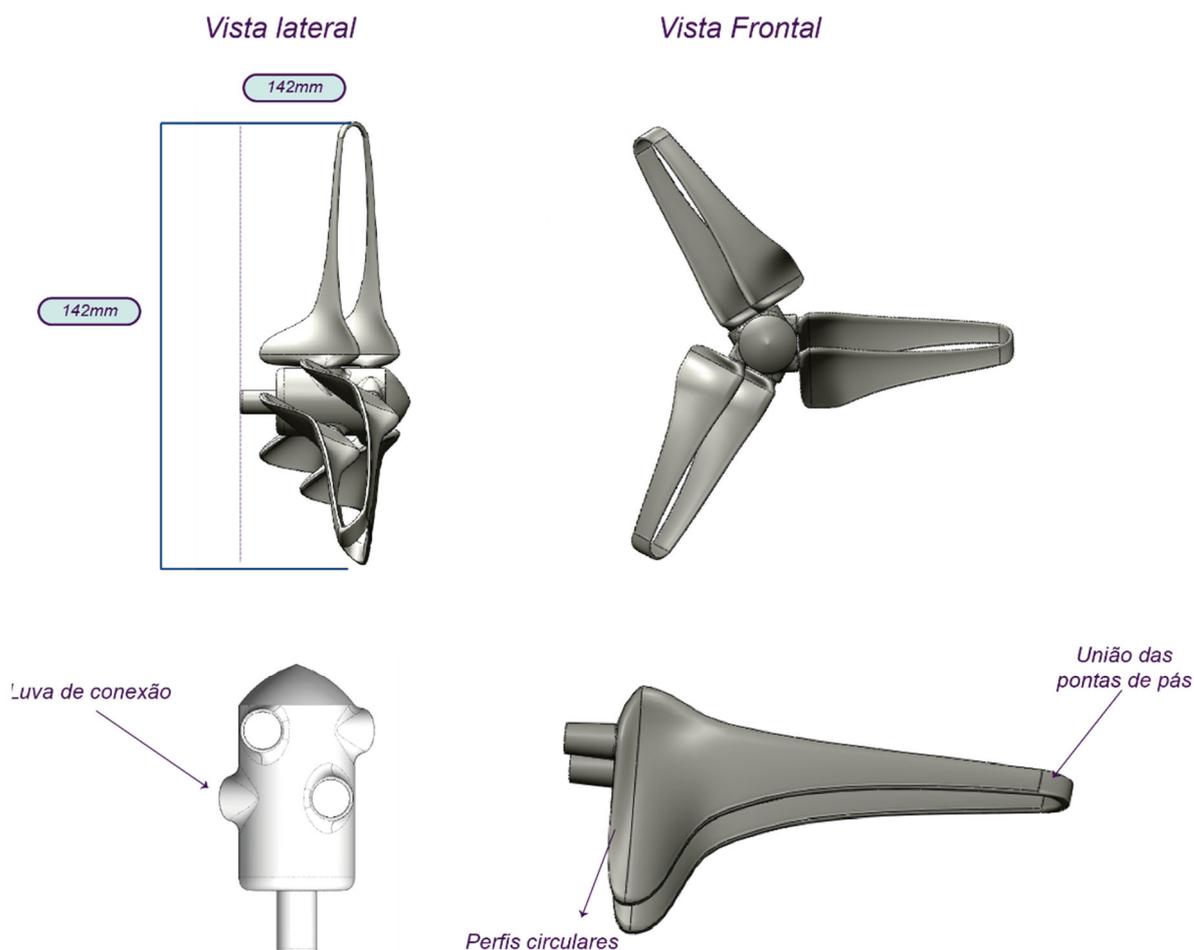
Na raiz da pá tipo hélice, foram adicionados perfis circulares para suavizar o encaixe com o cubo. Além disso, criou-se um conector na raiz da pá, com um recorte reto, que serviu como guia para o alinhamento, mantendo a posição correta do ângulo de torção, conforme demonstrado na Figura 30.

Após o dimensionamento da pá tipo hélice, iniciou-se a modelagem 3D da pá *loop-type*. Como mencionado, o design *loop-type* se caracteriza por uma pá alongada, cujas extremidades se conectam ao cubo, em posições distintas ao eixo, em forma de “U”. As pás dianteiras e traseiras têm funções ligeiramente diferentes. As lâminas dianteiras podem atingir alta eficiência em baixas velocidades, e as lâminas traseiras são projetadas para alcançar alta eficiência em altas velocidades (KIM *et al.*, 2017; YOSHIDA, 2007).

Utilizaram-se os mesmos parâmetros de comprimento de corda e ângulo de torção do modelo tipo hélice. A geometria foi composta por uma parábola e dividida em 12 partes ( $C_{(r)}$ ). Cada perfil foi posicionado considerando o ângulo de ataque ótimo definido, e as pontas das pás foram conectadas por um arco. A raiz das pás foi posicionada paralelamente a 45° com relação ao eixo. O cubo foi modelado seguindo as mesmas dimensões do cubo

tipo hélice, a única diferença é que foi feita uma luva de conexão para melhor encaixe, acabamento e resistência, pois as duas raízes das pás demandam maior área de contato com o cubo. Por ser dupla conexão, não foi necessário o recorte no conector para guiar a posição correta.

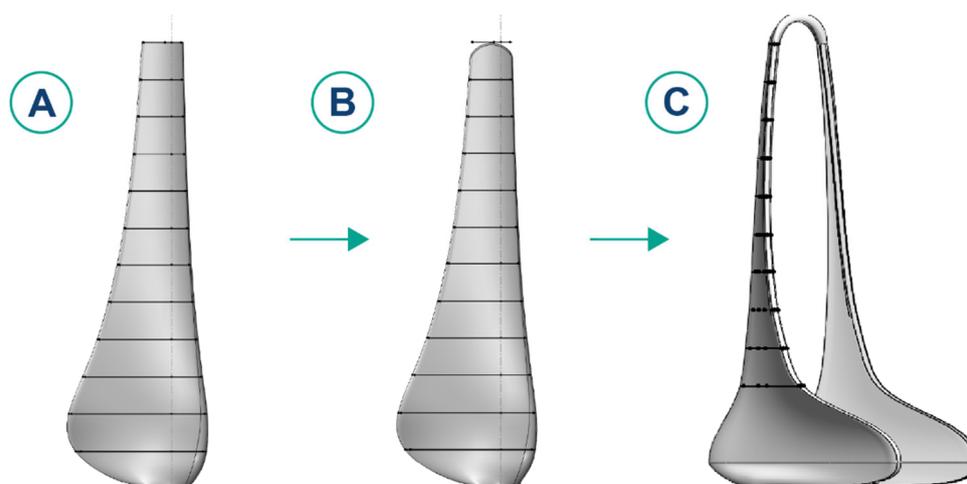
Figura 31 – Configurações do modelo de pá *loop-type*



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Na Figura 32, é apresentada a sequência da modelagem das pás. A Figura 32.A é a primeira versão do modelo de pá tipo hélice aplicando a teoria BEM; na Figura 32.B, nota-se a ponta da pá arredondada e, na Figura 32.C, apresenta-se o modelo de pá tipo *loop-type*.

Figura 32 – Diagrama esquemático de modelagem da pá

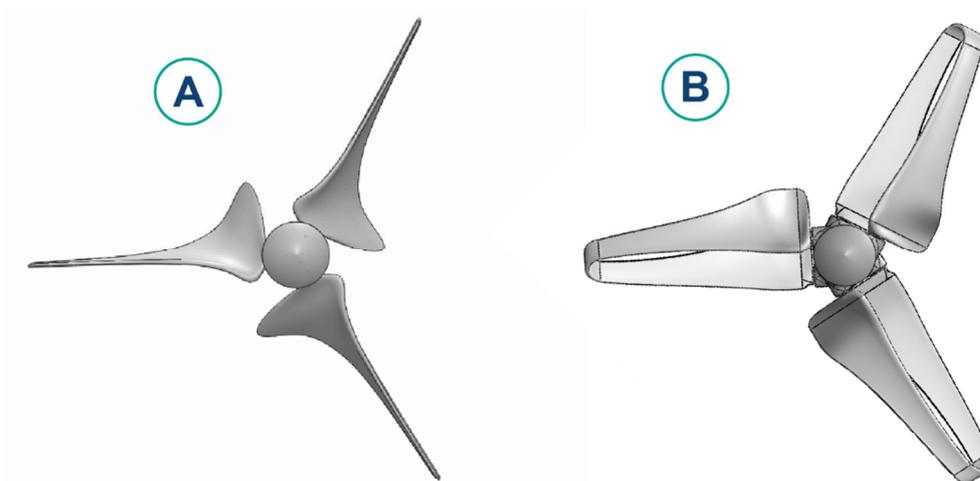


(A) Pá tipo hélice, (B) Pá tipo hélice com ponta arredondada e (C) Pá do *loop-type*.

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Na Figura 33, é apresentada a comparação entre as pás desenvolvidas, turbina tipo hélice e *loop-type*. Com as geometrias definidas, é possível avançar para a prototipação das pás, macroetapa fundamental para os ensaios experimentais no túnel aerodinâmico.

Figura 33 – Comparação dos tipos de turbina A) turbina tipo hélice e B) tipo *loop-type*.



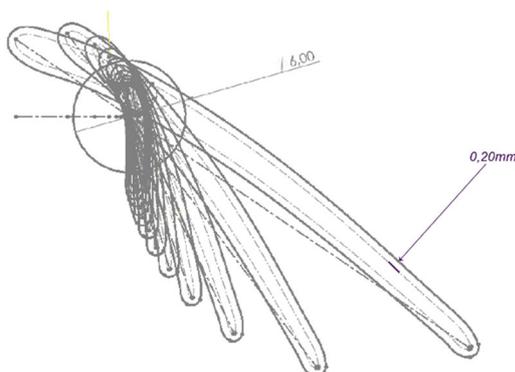
Fonte: Elaborada pela autora (2022).

### 3.5 PROTOTIPAÇÃO

Os modelos foram impressos em 3D, com a finalidade de serem submetidos a ensaios de túnel aerodinâmico. A tecnologia de manufatura aditiva empregada foi a FDM, já apresentada na seção 2.4.3. Antes de imprimir os corpos de prova finais, foram

realizados testes. O primeiro avaliou a viabilidade de impressão da espessura da ponta da pá. Por apresentar a espessura de corda de 0,20mm, tornou-se inviável a impressão. Como solução, foi adicionado 0,4mm de *offset* em cada perfil, como apontado na Figura 34, a seguir.

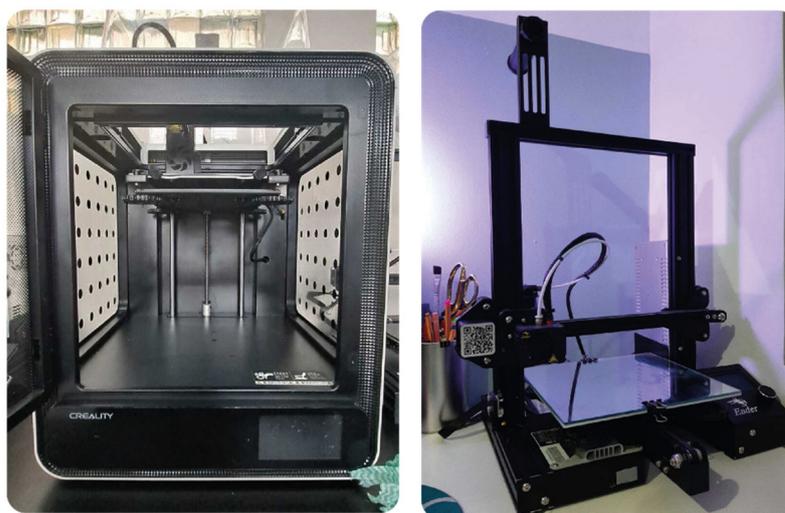
Figura 34 – Detalhes adicionais para prototipação



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

O segundo teste, foi relacionado ao equipamento de impressão, para tal, foram utilizadas duas impressoras, a Creality CR-200B, localizada no LDSM da UFRGS, e a Creality Ender 3, da autora, apresentada na Figura 35. As duas impressoras possuíam o bico da extrusora de 0,4mm.

Figura 35 – Impressoras Creality CR-200B e Creality Ender 3



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

O terceiro teste diz respeito ao material do filamento: observou-se qual seria o mais adequado para o estudo, considerando a resistência e acabamento. Foram utilizados os seguintes tipos de filamento para essa análise: (i) PLA na cor cinza, (ii) ABS na cor branca e (iii) PETG, que é uma versão modificada do polietileno tereftalato (PET), com glicol, na

cor preta. Todos os filamentos possuem o diâmetro de 1,75mm. As peças em ABS e PETG foram confeccionadas na impressora Creality CR-200B; a peça em PLA, na Creality Ender 3, como mostra a Figura 36.

Figura 36 – Teste de filamento



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Após os testes, optou-se por dar seguimento com o filamento em ABS, pois resultaria em melhor acabamento e resistência mecânica maior, sem deformar as pás ao ser submetido aos ensaios. O PETG, por ser um material termoplástico amorfo, poderia apresentar deformação quando as peças fossem submetidas a testes no túnel aerodinâmico (CASTRO, 2021). O PLA apresentou um acabamento rugoso, em razão dos resquícios do material, o que exigiria um tratamento manual maior na superfície e, conseqüentemente, haveria maiores chances de ocorrer assimetria nas peças. Ainda, todas as pás e os cubos foram pesados (Tabela 6) antes de iniciar a união das pás com os seus respectivos cubos; para isso, utilizou-se uma balança analítica de precisão, modelo Quimis Q500I210c, disponível no LDSM da UFRGS.

Tabela 6 – Massas dos modelos

	Modelo Hélice				Modelo loop-type			
	Pá 1	Pá 2	Pá 3	Cubo	Pá 1	Pá 2	Pá 3	Cubo
<b>Massa (g)</b>	1,17	1,15	1,15	4,44	2,38	2,40	2,38	4,42

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Figura 37 – Balança de precisão



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Os parâmetros da impressão, apresentados na Tabela 7, foram realizados por intermédio do *software* Ultimaker Cura 5.2.1. Com ele, é possível converter o arquivo .stl em camadas e, por isso, muitas vezes, são denominados de fatiadores ou *slicers*. Ao realizar a conversão, o programa gera um arquivo g.code, que é a linguagem aceita pela maioria das impressoras e, assim, é possível executar a impressão.

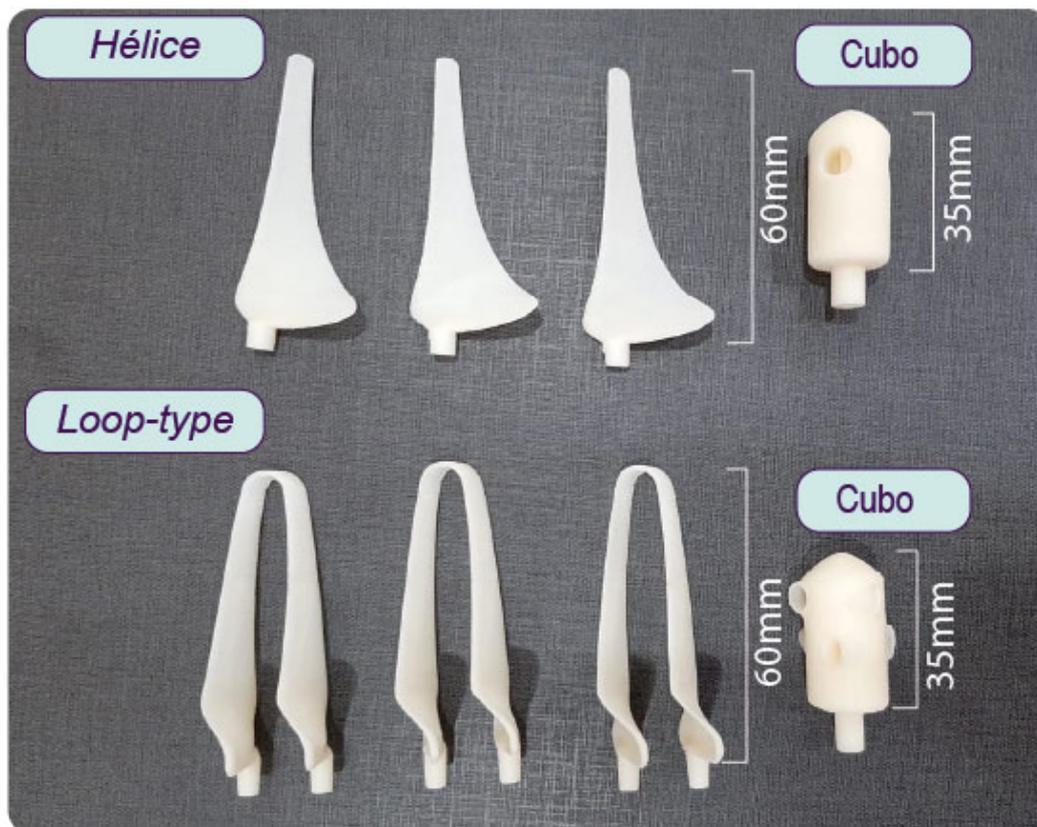
Tabela 7 – Parâmetros de impressão

Parâmetros	
Perfil	Super quality – 0,12mm
<b>Espessura de parede</b>	1,6mm
Número de parede	3
<b>Espessura de camadas superiores/inferiores</b>	0,84mm
Número de camadas superiores/inferiores	3
<b>Densidade de preenchimento</b>	50%
Padrão de preenchimento	Ziguezague
<b>Temperatura do material</b>	230°C
Temperatura de mesa de impressão	90°C
<b>Velocidade</b>	60mm/s

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Com essas definições, as peças finais foram impressas na Creality CR-200B, por apresentar alta qualidade de impressão e possuir a câmera fechada, o que é ideal para o filamento ABS. Para o acabamento, as peças (Figura 38) foram levemente lixadas até a remoção de granulações ou resquícios de material, até apresentarem um toque liso.

Figura 38 – Peças impressas



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Foi necessário adicionar suporte na parte central do modelo de pá *loop-type*, para estruturar a conexão com as duas pontas de pá. As pás *loop-type* foram executadas em, aproximadamente, duas horas cada. Já a pá tipo hélice levou 1 hora. Os cubos levaram cerca de 1 hora a cada peça. Com as peças finalizadas, foi realizado a montagem. Elas foram fixadas, em seus respectivos cubos, com adesivo de secagem rápida a de cianoacrilato.

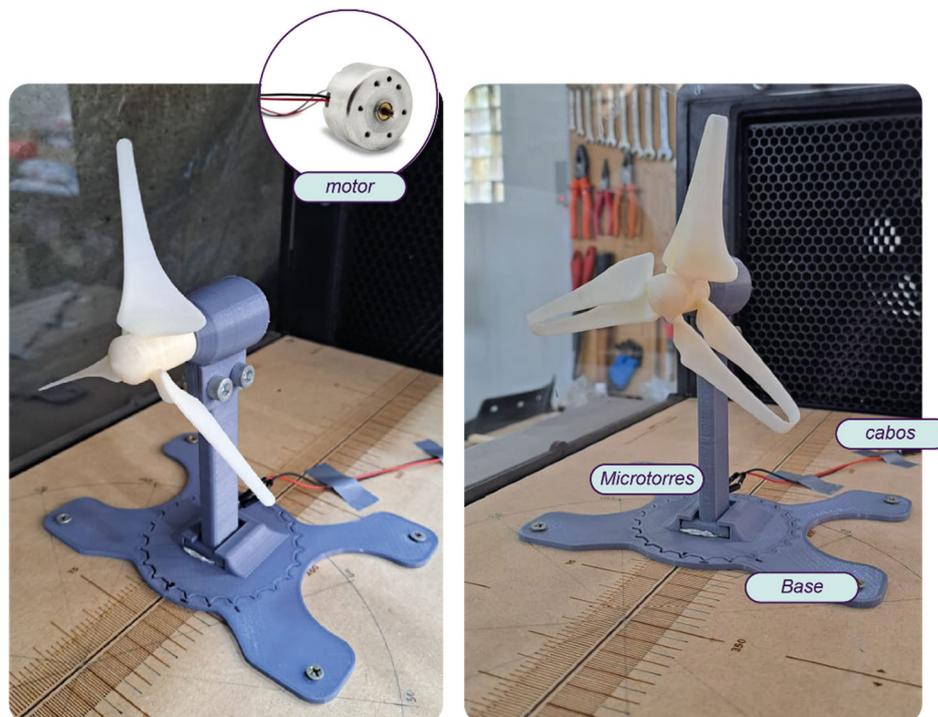
### 3.5.1 Microturbina

Para que os ensaios no túnel aerodinâmico pudessem ser realizados, foi projetada uma microturbina, composta pelos seguintes componentes: nacele, tampo de fechamento, microtorres e uma base de apoio, todas prototipadas via impressão 3D por FDM, na impressora Creality Ender 3, com o filamento PLA, 1,75mm, na cor cinza.

Além desses componentes, utilizaram-se um motor Dc 5,9v, cabos *Jumper Wire* e parafusos. Os cabos foram conectados aos fios do motor, para ser possível a medição de

tensão e corrente, e o cubo foi conectado diretamente no motor. Todos os testes físicos foram realizados com o motor. Na Figura 39, pode ser visualizado todo o sistema.

Figura 39 – Componentes da microturbina



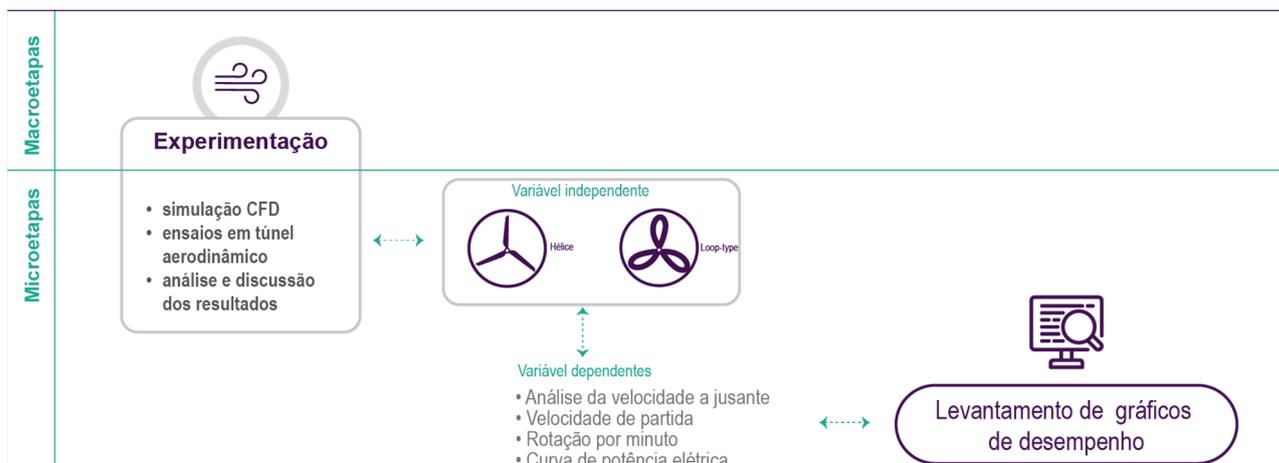
Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Com as prototipagens finalizadas, assim como a dos componentes que fazem parte da turbina eólica de microescala, seguiu-se para a macroetapa de experimentação, na qual se discorre sobre como foram mensurados os dados.

### 3.6 EXPERIMENTAÇÃO

Nesta seção, aborda-se como foram conduzidos os ensaios em túnel aerodinâmico. Os modelos prototipados (corpo de prova) foram submetidos a testes para mensurar o desempenho e para quantificar a ação da variável independente, geometria do perfil longitudinal, nas variáveis dependentes, velocidade de partida e potência, como mostra o mapeamento dos ensaios na Figura 40.

Figura 40 – Mapeamento dos ensaios



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

### 3.6.1 Simulação CFD – análise da velocidade a jusante

Para comparação e compreensão do comportamento escoamento de fluidos em torno dos modelos geométricos desenvolvidos, foram realizadas simulações em CFD usando o *software* ANSYS Discovery 2022 R2, versão estudantil. O foco dessa ferramenta é permitir que os engenheiros e designers realizem rapidamente estudos de variação de projeto; além disso, possibilita modificações interativas de design e simulação multifísicas. Os processos são os seguintes:

- parametrização das geometrias;
- entrada de condições físicas;
- condições de contorno;
- geração de malha;
- pós-processamento.

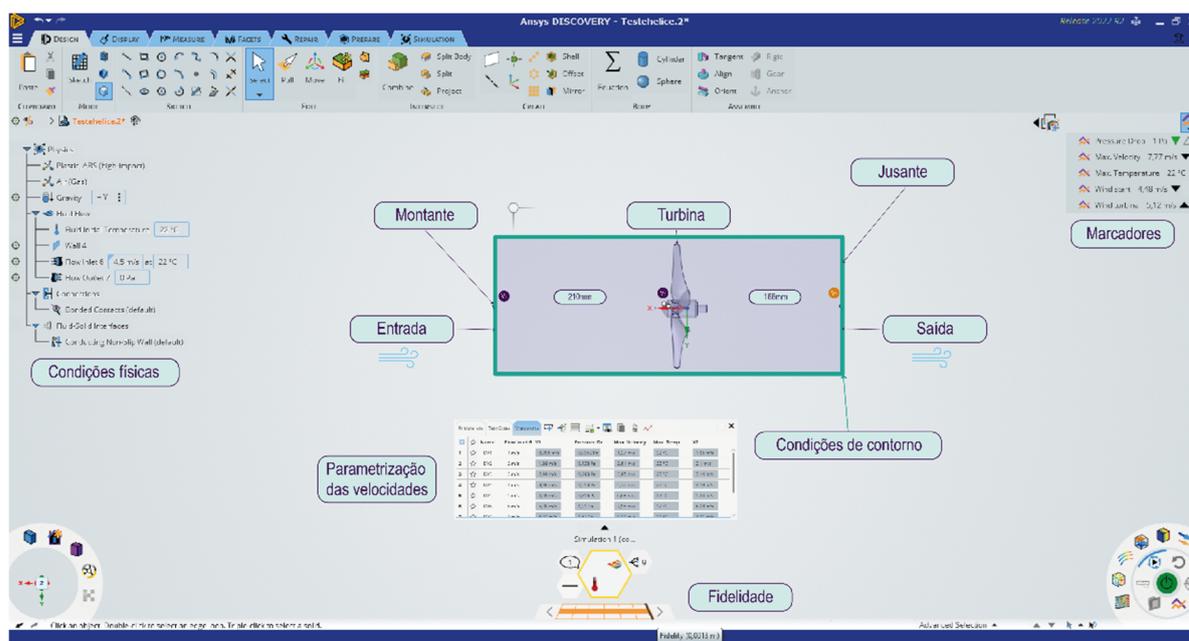
Os modelos geométricos foram importados para o *software*; após, foram adicionados os parâmetros das condições físicas. O material aplicado foi o plástico ABS, considerando o ar fluido, atribuindo densidade e viscosidade. Para a simulação, foram parametrizadas as velocidades de vento de 1 a 8m/s, com temperatura de 22°C.

Essa simulação é feita para verificar a eficiência das pás, ou seja, quanto da velocidade do vento é retido pelas pás. Para tal, utilizou-se a teoria de Betz, em que são consideradas 3 velocidades de vento,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ . Com intuito de determinar a velocidade  $V_3$  e verificar qual dos modelos de pás apresenta a menor velocidade à jusante

da turbina, foi colocado um monitor de velocidade na microturbina para mensurar as velocidades  $V_1$  e  $V_3$ . Essa análise é baseada no estudo realizado por Garré (2015), que investigou a esteira aerodinâmica utilizando uma abordagem de modelagem semelhante à proposta por Betz. Os dados foram coletados e organizados em tabela.

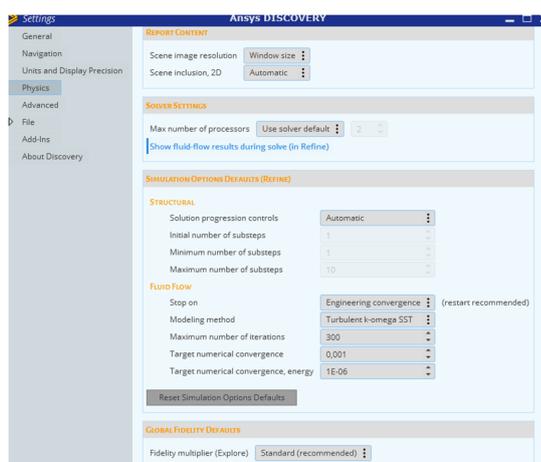
Com relação às condições de contorno (Figura 41), foi criado um volume entorno da geometria, em forma de box, e determinada a condição de *Free Slip* nas paredes superior, inferior e nas laterais. Essa condição despreza o efeito do atrito e, com isso, não há o efeito da camada limite, simulando que o microrrotor estará aberto ao ambiente. Para a parede a montante, foi estipulada a distância de 5 vezes a largura da geometria, ou seja, 42mm. Na parede à jusante, considerou-se 4 vezes a largura da geometria. Na parede a montante, foi adicionada a entrada do fluido e, na parede à jusante, a saída, com o valor de pressão igual a 0Pa.

Figura 41 – Interface do ANSYS Discovery



Fonte: Adaptado de ANSYS Discovery (2022).

A malha foi gerada no máximo disponível para versão do *software*, com a fidelidade de 0,0013m, 1,3mm, no ambiente *explore*. O programa, uma vez definida a geometria, utiliza o Modelo k- $\omega$  SST para resolver as principais equações governantes do escoamento (Figura 42).

Figura 42 – Modelo k- $\omega$  SST

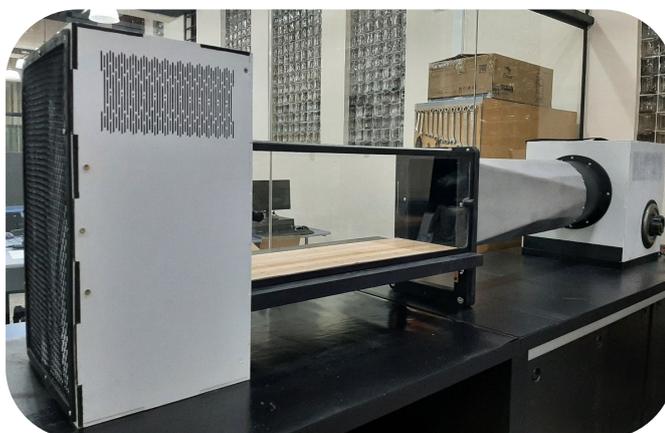
Fonte: Adaptado de ANSYS Discovery (2022).

No pós-processamento, foram tabulados os dados em uma planilha no *software* Microsoft Excel, que gerou um gráfico para a análise descritiva. Essas análises foram abordadas em tópico adiante, na discussão dos resultados.

### 3.7 ENSAIOS EM TÚNEL AERODINÂMICO

Os ensaios foram realizados em um túnel aerodinâmico de pequeno porte desenvolvido pela equipe do LDSM da UFRGS. O túnel foi reformulado no ano de 2021, e o projeto foi idealização pelo Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido, executado pelo Me. Fernando Silveira Xavier, integrante do LDSM. Nesse projeto, a autora deste trabalho auxiliou na montagem e no acabamento, cujas imagens estão no Apêndice C.

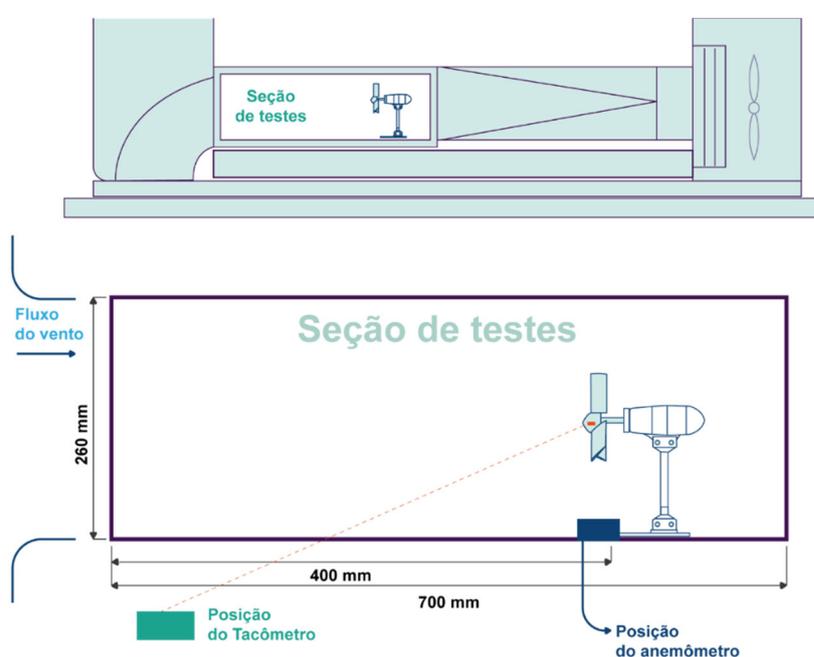
Figura 43 – Túnel de aerodinâmico do LDSM-UFRGS



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Como característica, o túnel é de circuito aberto e baixa velocidade do tipo aspirador (*suckdown*) (BARLOW *et al.*, 1999). A seção de testes apresenta as seguintes dimensões: 250 x 260 x 700mm (largura x altura x profundidade). A velocidade do vento produzido pelo motor não ultrapassa os 5,6 a 5,9m/s, a depender das condições climáticas, e o túnel é controlado por um regulador de tensão monofásico da marca Varivolt Variac (XIMENES, 2018). Na Figura 44, estão ilustradas a disposição dos instrumentos e a seção de teste.

Figura 44 – Seção de testes aerodinâmico.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Para os ensaios, foi utilizado um anemômetro digital portátil da marca BTmeter para medição da velocidade do vento. Como características, o anemômetro possui uma faixa medição de 0,3 a 30m/s, com resolução de 0,1m/s e precisão de  $\pm 5\%$ ; além disso, pode a medir a temperatura local com alcance de -10 a 45°C, resolução de 0,2°C e precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Ainda, foi utilizado um multímetro da marca Hikara, modelo HM-2090, com a função True- RMS, via bluetooth, para mensurar a tensão e a corrente, com 0,5% de precisão. Também foi usado um tacômetro sem contato, digital portátil ótico, com mira a laser, da marca Instrutherm, para medir as RPM da microturbina, com faixa de medição que vai de 1 a 99.999 RPM e resolução de 0,1 RPM. A amostragem foi medida a cada 1 segundo.

Figura 45 – Instrumentos de medição para os testes

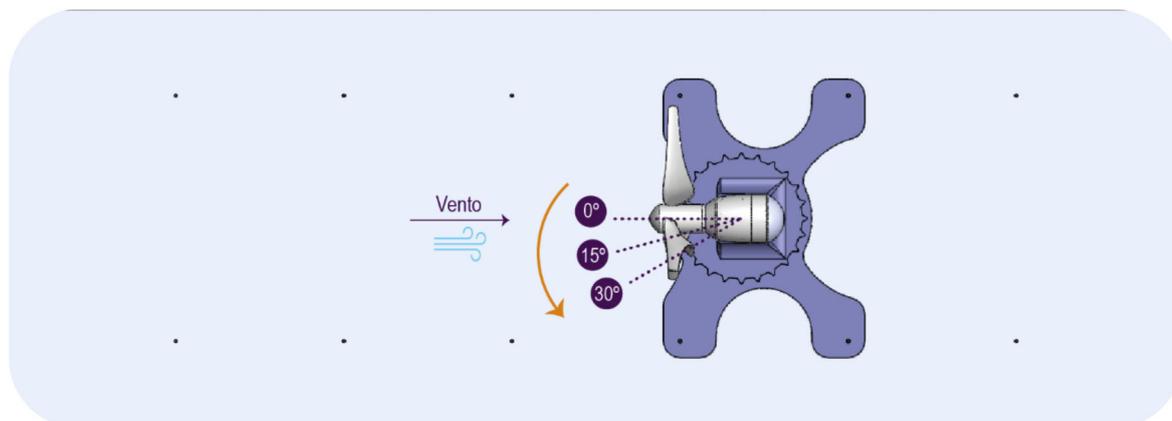


A) Anemômetro digital; B) Multímetro; C) Tacômetro.

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

A cada ensaio, foi analisado o desempenho da microturbina com relação ao ângulo de incidência com o vento, conforme a Figura 46. O objetivo dessa análise é verificar quais das geometrias têm melhor eficiência na conversão da energia cinética, quando submetida a ventos turbulentos. Com isso, busca-se investigar a mais adequada para áreas urbanas, em que o vento é perturbado e apresenta várias alterações de direção em segundos, além de velocidades baixas (ESTANQUEIRO; SIMÕES 2016).

Figura 46 – Ilustração da Guinada (Yaw) de eixo em relação ao vento incidente



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

O eixo da microturbina foi rotacionado nos seguintes ângulos: 0° de inclinação, ou seja, o plano do microrrotor é perpendicular à incidência do escoamento; 15° e 30° de inclinação em torno do eixo central, ou seja, na diagonal ao ângulo de incidência do escoamento. Para esse experimento, foi desenvolvido um recorte na base, com a forma circular, similar a uma engrenagem, e cada “dente” corresponde a 15°.

### **3.7.1 Determinação experimental de velocidade de partida**

No ensaio de velocidade de partida, a microturbina foi posicionada no local estabelecido, conforme demonstrado na Figura 44 . Com a seção de teste lacrada, iniciou-se a entrada do fluido no túnel aerodinâmico pelo regulador de tensão, cuja velocidade é aumentada progressivamente. No momento em que o microrrotor iniciou a rotação, o regulador foi travado, a microturbina foi retirada da seção, e o anemômetro foi inserido no local da turbina. Após um tempo de  $\pm 2$  minutos, foram aferidos os dados e registrados para serem tabulados.

### **3.7.2 Determinação experimental – RPM**

Para os experimentos de medição velocidade angular, foram utilizados o anemômetro e um tacômetro com velocidades de vento de 1 a 5,5m/s, a serem progressivamente aumentadas.

Os processos para experimento ocorreram da seguinte forma: o anemômetro foi posicionado no local da turbina de acordo com o indicado na Figura 44, e a seção de testes foi lacrada; então, a entrada do escoamento de ar na seção de testes foi iniciada pelo regulador de tensão e, ao alcançar a velocidade 1m/s, o regulador de tensão foi travado, o anemômetro foi retirado da seção de testes, a turbina foi posicionada, e a seção de testes foi novamente lacrada. Após  $\pm 2$  minutos, foi realizado a aferição dos dados com tacômetro – o tempo de espera para aferição é necessário para que o fluido se estabilize. Esse processo foi repetido para cada velocidade estipulada (1 a 5,5m/s). Foi realizada uma média dos valores de RPM e os dados foram tabulados para a realização da análise descritiva.

### **3.7.3 Levantamento de curva de potência elétrica**

Para o levantamento da curva de potência elétrica, utilizou-se o multímetro conectado nos cabos Jumper e sincronizado em um computador portátil (Tablet) via bluetooth. A leitura dos dados seguiu o mesmo roteiro do levantamento de RPM:

1. posicionar o anemômetro no local da turbina;
2. lacrar a seção de testes;
3. iniciar a entrada de ar pelo regulador de tensão;
4. alcançar a velocidade pretendida (1 a 5,5m/s);

5. remover o anemômetro e posicionar a microturbina;
6. aguardar  $\pm 2$  minutos para aferição dos dados;
7. registrar os dados para cada velocidade de vento.

O primeiro teste foi realizado para mensurar a corrente elétrica (A), finalizando a leitura e a tabulação de dados nos dois modelos e nas três angulações de eixo em relação ao vento incidente (Figura 46). Foi configurado o multímetro para medir a tensão (v) e repetidas todas as etapas. Os dados serão tabulados em uma planilha, e foi realizado o levantamento da potência elétrica (W), de acordo com a expressão:

$$W = A * v \quad (3.1)$$

## 4 ANÁLISE E DISCUSÃO DOS RESULTADOS

Cada ensaio foi repetido em três datas distintas, nos dias 19, 21 e 30/11 de 2022. Todos foram concluídos em suas respectivas datas, com o intuito de minimizar a influência de temperatura e umidade do ar. Para a organização dos testes, foi elaborada uma lista de checagem, com intuito de reduzir falhas ao conduzir os ensaios (APÊNDICE E).

Além disso, não foi considerado o fator de efeito de bloqueio, pois, quando um objeto é submetido a testes em um túnel de vento (no caso dos testes realizados neste estudo, um túnel aerodinâmico), o objeto influencia o escoamento. Assim, por se tratar de túnel aerodinâmico de seção fechada, ao colocar a microturbina para ser submetida a testes, há uma redução de área para a passagem transversal do escoamento, o que resulta em aumento da velocidade do vento ao contornar o objeto (ALMEIDA, 2017). Entende-se que esses fatores podem ser abordados em futuras pesquisas.

Por fim, nas próximas seções, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios dos modelos propostos na simulação em CFD e em ensaios físicos. Além disso, serão discorridas considerações a respeito de cada verificação.

### 4.1.1 Análise da velocidade à jusante

Na Tabela 8, são apresentados os dados coletados para a análise de velocidade à jusante. A partir dessas informações, foram realizadas as variações percentuais relativas a cada velocidade de vento.

Tabela 8 – Variação percentual entre V1 e V2

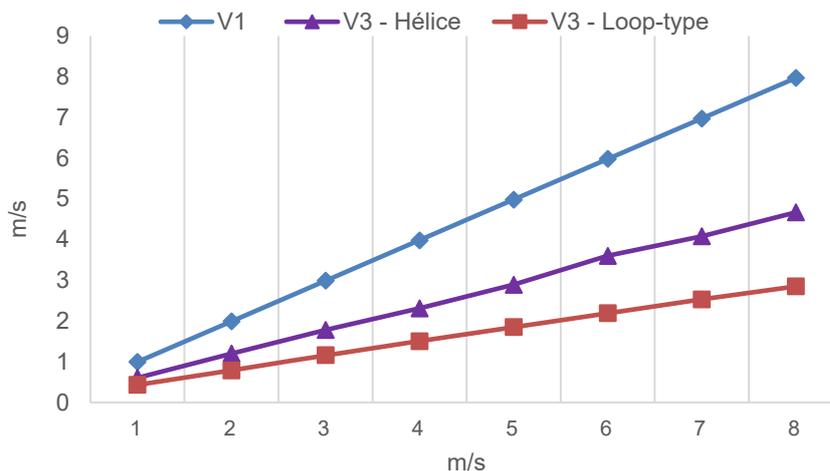
V1 (m/s)	V3 – Hélice (m/s)	Variação hélice	V3 – <i>loop-type</i> (m/s)	Variação <i>loop-type</i> (m/s)
0,996	0,603	-39%	0,43	-57%
1,99	1,2	-40%	0,786	-61%
2,99	1,78	-40%	1,16	-61%
3,98	2,31	-42%	1,5	-62%
4,98	2,89	-42%	1,85	-59%
5,98	3,6	-40%	2,19	-63%
6,97	4,08	-41%	2,53	-64%
7,97	4,67	-41%	2,85	-64%

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Com base nos elementos expostos, é possível observar que há pouca diferença entre as variações de velocidade no modelo hélice, ou seja, cerca 2%. Já no modelo *loop-type*, observa-se aumento de 7% de variação, ou seja, 5% a mais do que o modelo hélice.

Ao analisar as colunas V3, verifica-se que o modelo *loop-type* apresentou menores velocidades de vento na parede à jusante do microrrotor. A maior variação percentual, entre V1 e V3, é de 64%, como exposto a seguir.

Gráfico 2 – Comparativo velocidade inicial x velocidade final



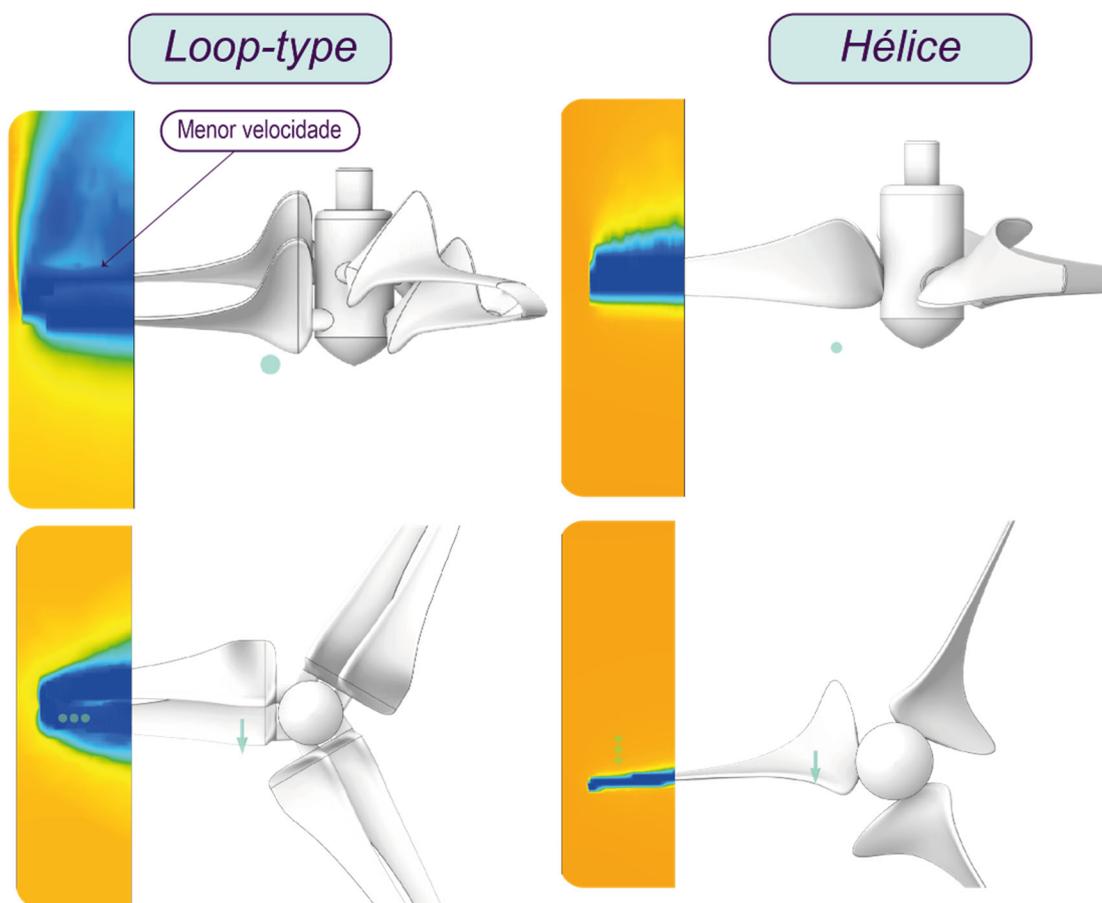
Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Essas variações podem ser observadas no

Gráfico 2 – Comparativo velocidade inicial x velocidade final, em que é possível verificar a diferença entre os dois modelos; na hélice, a linha média de temperaturas V3 é 2,64m/s e, no *loop-type*, é 1,6m/s. No modelo hélice, na velocidade de 6,97m/s, há um leve decréscimo na variação, enquanto no modelo *loop-type*, há acréscimo constante de variação na V3.

Na Figura 47, é apresentada a distribuição da velocidade do vento, considerando o valor de 5,5m/s para ambos os modelos, no plano frontal. Na turbina tipo hélice, há pouca diferença entre velocidades e uma concentração maior de linhas de corrente, apresentando pouca variação de velocidade de vento. Com isso, é possível observar uma concentração de menor velocidade em torno da turbina tipo *loop-type*. Nesta simulação, com intuito de avaliar a ponta da pá, se isolou a ponta de uma pá cada modelo, e com isso foi possível aumentar a resolução da simulação.

Figura 47 – Distribuição da velocidade em torno das microturbinas



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Comparando os modelos em relação ao coeficiente de potência e à teoria de Betz, observa-se que o modelo *loop-type* apresenta uma maior eficiência energética devido à menor velocidade de vento à jusante da microturbina. Isso indica uma melhor captação de energia do vento. Além disso, a diferença entre as variações de velocidade  $v_1$  e  $v_3$  está próxima ao limite estabelecido pela teoria de Betz, que define o máximo aproveitamento teórico de energia pelo rotor. A média das variações de velocidade à jusante é de 60%, o que indica um bom desempenho dos modelos em relação à limitação teórica de Betz. No entanto, é importante ressaltar que o modelo *loop-type* também se destaca pela sua maior solidez quando comparado ao modelo hélice. Essa solidez pode ser um fator relevante a ser considerado em futuros estudos. Para uma análise mais detalhada dos efeitos do escoamento ao redor do objeto, seria necessário realizar simulações em CFD com uma malha mais refinada e precisa.

#### 4.1.2 Determinação experimental de velocidade de partida

Com relação à inicialização de rotação das pás, a Tabela 9, a seguir, mostra dos dados coletados.

Tabela 9 – Velocidade de partida

Angulações	Tipo hélice			Modelo <i>loop-type</i>		
	(0 <sup>a</sup> )	(15°)	(30°)	(0 <sup>a</sup> )	(15°)	(30°)
<b>Ensaio 1</b>	3,9m/s	4,6m/s	5,5m/s	4,3m/s	4,5m/s	5,2m/s
<b>Ensaio2</b>	4,3m/s	4,5m/s	5,4m/s	4,5m/s	4,5m/s	5,2m/s
<b>Ensaio 3</b>	3,7m/s	4,3m/s	5,5m/s	4,2m/s	4,8m/s	5,1m/s
<b>Média</b>	<b>3,97m/s</b>	<b>4,47m/s</b>	<b>5,47m/s</b>	<b>4,33m/s</b>	<b>4,60m/s</b>	<b>5,17m/s</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Observou-se que o modelo hélice obteve a menor velocidade de rotação das pás, 3,97m/s, no ensaio 1, comparado com o modelo *loop-type*, que obteve o valor de 4,2m/s no ensaio 3. Esse resultado ocorreu para quando ambos foram submetidos perpendicularmente ao escoamento. O maior valor de inicialização pertence ao modelo hélice, 5,5m/s, em um ângulo de 30°, o que aponta menor eficiência nessas condições de vento.

Sobre as angulações de eixo em relação ao vento incidente, observa-se que o modelo *loop-type* destaca-se quando comparado ao modelo hélice, o que indica uma possibilidade de uso para ambientes urbanos. Na Tabela 10 a seguir, é possível observar as variações de percentuais entre os modelos desenvolvidos. Nos ângulos de 0° e 15°, nota-se que há pouca variação percentual, ao passo que, no ângulo de 30°, nota-se uma variação maior

Tabela 10 – Variação de velocidade de partida

Angulação	Hélice (m/s)	Loop-type (m/s)	Variação
0°	3,97	4,33	<b>9,07%</b>
15°	4,47	4,6	<b>2,90%</b>
30°	5,4	5,17	<b>-4,26%</b>

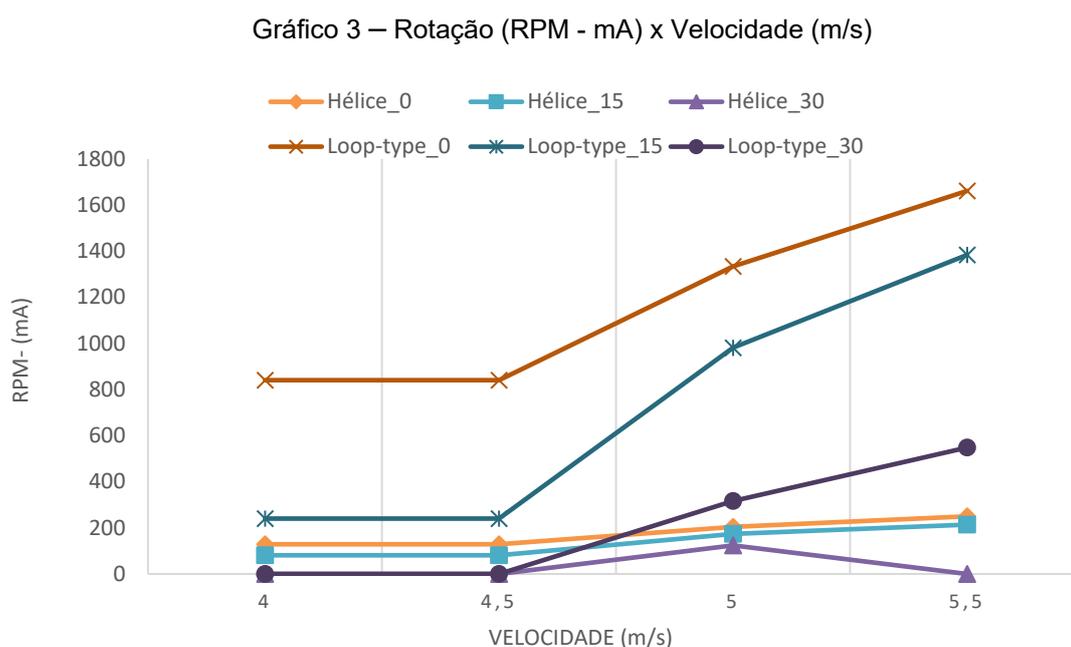
Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Porém, como a proposta deste estudo é relacionar a velocidade de partida da microturbina com a potência elétrica, é fundamental que outros parâmetros sejam analisados, para obter uma evidência mais assertiva.

### 4.1.3 Determinação experimental da velocidade de angular

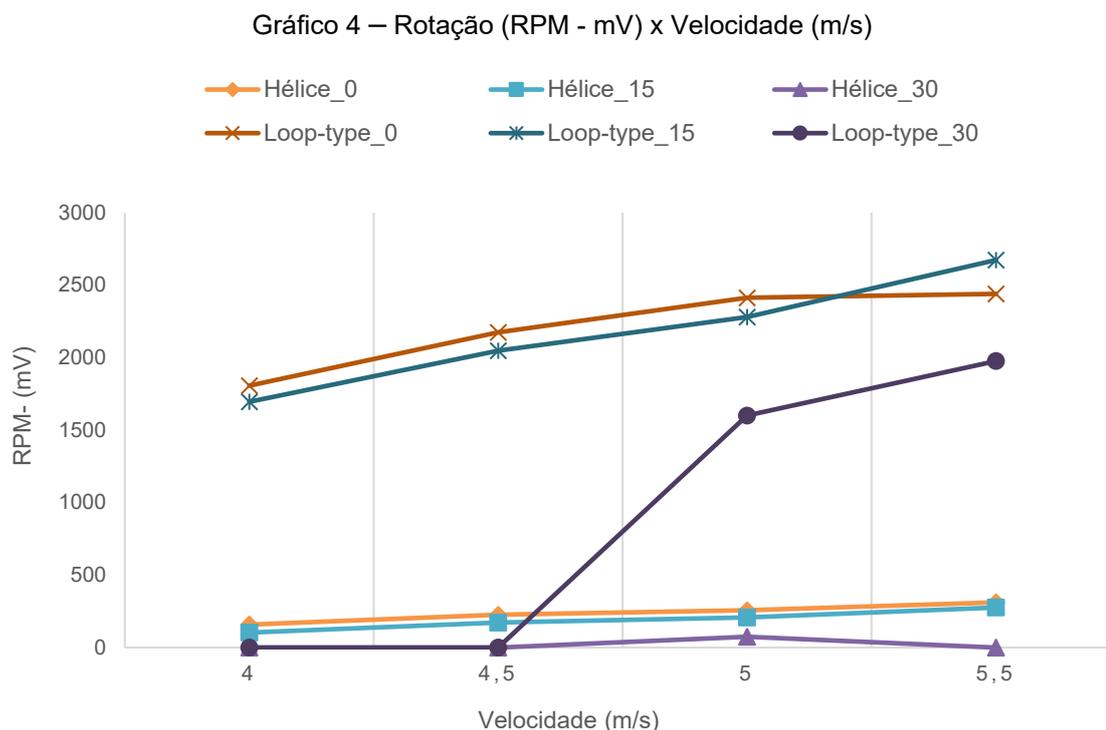
Os próximos resultados apresentados são as médias obtidas de rotação (RPM) em relação às velocidades de vento em que a microturbina foi submetida. Durante a realização dos ensaios, percebeu-se uma diferença de rotações ao mensurar a tensão e a corrente; logo, foram levantados os dados da velocidade rotacional com esses dois parâmetros. Alguns valores foram arredondados para organização das informações (a tabela com os valores obtidos está disponível no Apêndice E).

Para fins de definição, os títulos verticais dos gráficos foram nomeados da seguinte forma: (i) RPM – (mA) para o gráfico que corresponde à mensuração da RPM e corrente e (ii) RPM – (mV) para o gráfico que corresponde à mensuração da RPM e tensão. Ainda sobre a nomenclatura, cada modelo (hélice e *loop-type*) foi discriminado com o número referente à angulação do vento incidente na legenda superior do gráfico.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A partir do Gráfico 3, é possível observar que é o modelo *loop-type* apresenta uma elevada rotação, com ascendência no valor de 4,5 a 5,5m/s, mesmo que seja submetido aos ângulos de 15° e 30°. O modelo hélice apresentou um valor constante de RPM, com pouca variação; quando submetido ao ângulo de 30°, obteve pouco desempenho. No Gráfico 4, a seguir, são apresentadas as informações RPM – (mV), que corresponde à mensuração do RPM e à tensão.



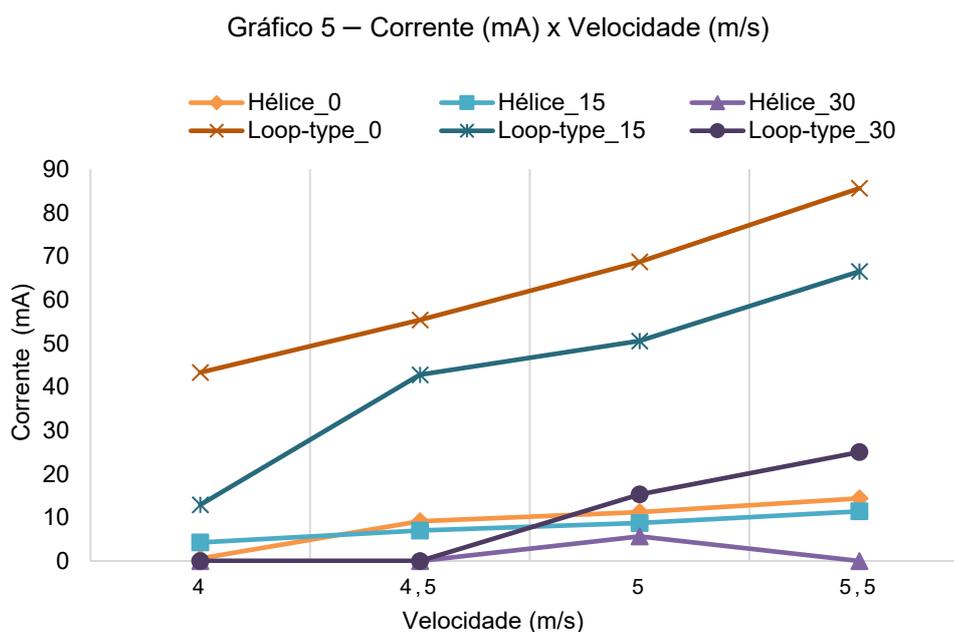
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No Gráfico 4, é possível observar um aumento de rotação para ambos os modelos de pás. O modelo *loop-type* demonstrou alto índice de rotação, 2.673 RPM, na velocidade de 5,5m/s, com a angulação de 15°, o que aponta um desempenho mais otimizado para energia elétrica, visto que, para produção elétrica, são necessários alta velocidade de rotação e baixo torque. De acordo com Kishore, Coudron e Priya (2013), a rotação e a partida da hélice são aspectos bastante relevantes para a microturbina e representam indicativos da eficiência aerodinâmica dos perfis. Os mesmos autores realizaram um estudo de uma pequena turbina com um perfil NACA 0012, com 43cm de diâmetro, e obtiveram 800 RPM para a velocidade de 5m/s.

Ainda, a pesquisa de Oliveira (2017), que embasou o diâmetro da turbina e a velocidade de vento deste estudo, revelou como o maior valor de rotação 801 RPM. Os modelos estudados pela autora apresentaram uma velocidade de partida de 3m/s quando verificados os ensaios de velocidade e a potência (mW). Os modelos desenvolvidos neste estudo encontraram os seguintes valores médios: 2.413 e 257 RPM em *loop-type* e hélice, respectivamente, com a velocidade 5m/s, perpendicular à velocidade do vento.

#### 4.1.4 Levantamento de curva de potência elétrica

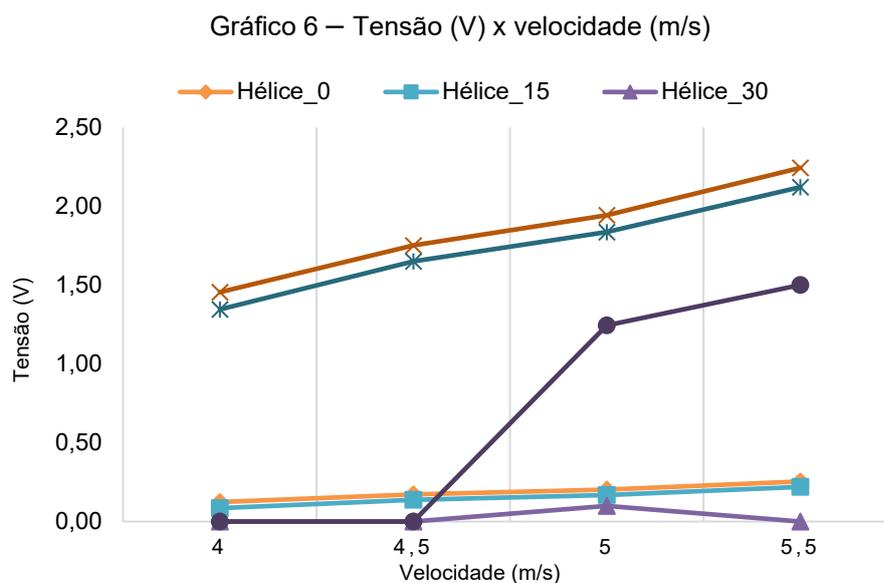
Neste tópico, serão expostos os resultados obtidos de tensão, corrente e potência por velocidade de vento a partir dos valores médios. O primeiro Gráfico 5 apresenta os dados correspondentes à corrente (mA).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

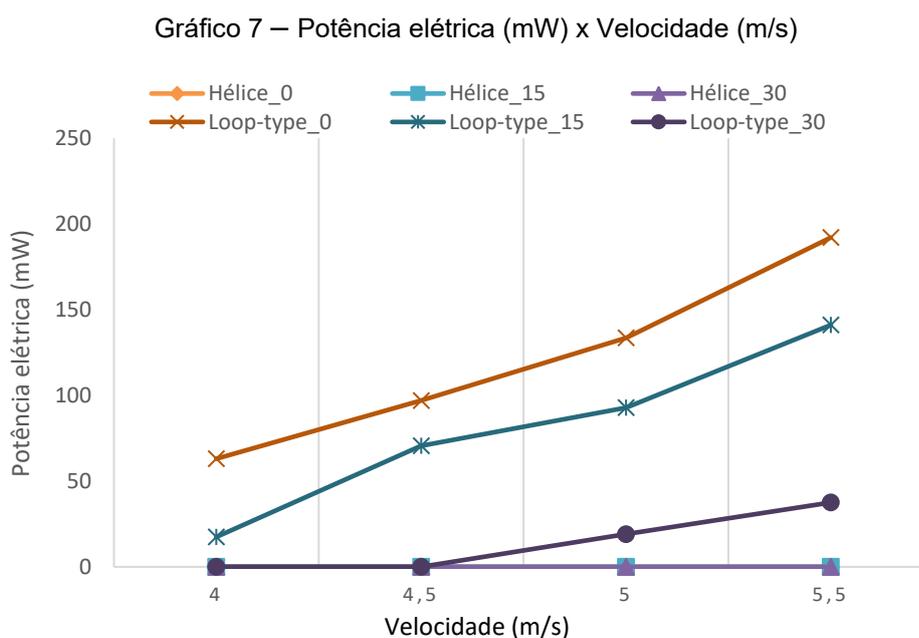
Observa-se que, em concordância com os resultados de RPM, o modelo *loop-type*, quando, submetido perpendicularmente à direção do vento, apresenta melhor desempenho, com corrente máxima de 85,2mA, na velocidade de 5,5m/s. Já o modelo hélice apresentou seu melhor desempenho na velocidade de 5,5m/s, obtendo o valor de 14,39 mA, ambos a 0° com relação ao vento incidente.

No próximo Gráfico 6, são expostos os valores referentes à tensão elétrica. Ressalta-se que foi necessário equalizar as grandezas, pois as medições no modelo *loop-type* foram realizadas em V e, no modelo hélice, em mV.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O maior valor de tensão foi obtido no modelo *loop-type*: 2,24V. Nota-se que, mesmo no ângulo de 15°, esse modelo obteve um bom desempenho (2,12V), o suficiente para suprir sistemas de iluminação que operem com baixa tensão, ambos a 5,5m/s de velocidade do vento. O modelo hélice apresentou um desempenho linear, e a máxima tensão foi de 0,22V. A seguir, é apresentado o gráfico de potência elétrica, cujos valores foram estipulados a partir da corrente e tensão em relação à velocidade do vento. Foi necessário equiparar as grandezas para a análise (Gráfico 7).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Observa-se que o modelo *loop-type* alcançou a maior potência elétrica produzida, com 192mW (0,19W) perpendicular ao vento e 141mW (0,14W) a um ângulo de 15°. Em contraste, o modelo hélice obteve uma produção mínima ou quase nula.

Retomando ao estudo citado como referência, a microturbina eólica de Oliveira (2017) registrou uma potência nominal de 1,8 mW (0,0018W). É importante ressaltar que a potência nominal é geralmente uma especificação de referência e pode não refletir a potência real obtida em condições práticas de operação. Na próxima seção, será elaborada a discussão dos resultados verificados nos testes em comento.

#### 4.1.4.1 Discussão dos resultados

Como é possível perceber, apesar de não apresentar menor velocidade de partida, o modelo *loop-type* indica uma possibilidade de inovação no que tange ao mercado de microturbinas eólicas. Além disso, os ensaios experimentais vão ao encontro do teste realizado em CFD. Apesar das limitações do *software*, foi possível observar maior eficiência pelas variações encontradas das velocidades a montante e à jusante no experimento.

Os resultados encontrados neste estudo colaboram com as pesquisas realizadas com esse tipo de design de pá, que foi concebida para operar com ventos turbulentos, auxiliar no torque e na transição do fluxo de vento (AUNG *et al.*, 2019; KIM *et al.*, 2017; YOSHIDA, 2007). Ressalta-se a necessidade de mais estudos sobre esse modelo de pá, pois poucas evidências foram encontradas na literatura.

Por sua vez, o modelo hélice obteve baixa eficiência, o que pode ser explicado pelos seguintes fatores: (i) número de pás, visto que, em razão do diâmetro pequeno, com isso é necessário um número maior de pás para o torque de partida; ainda, é fundamental um equilíbrio no projeto, pois, quanto mais pás, menos rotação, o que diminui a produção de energia elétrica; (ii) ângulo de torção, visto que, ao analisar as pás do modelo *loop-type*, observa-se que elas apresentam uma inclinação de 45° para se obter a forma de “fita”, o que resulta em modificação do ângulo de ataque e, em razão disso, é fundamental (iii) uma revisão dos parâmetros levantados, a fim de verificar os principais elementos a serem aprimorados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O deslocamento de massas de ar provoca vento, que é capaz de produzir energia com um grande potencial de emprego na geração de eletricidade. Em razão de sua característica como energia limpa e por apresentar um custo de geração possível de ser considerado na matriz energética do Brasil, essa área de geração de energia tem se expandido atualmente.

Para contribuir com o desenvolvimento de projetos que busquem utilizar essa energia, este trabalho teve o intuito de apresentar um design de pás otimizado para microturbinas de eixo horizontal para microgeração de energia. Para tanto, foi necessário discorrer sobre os principais conceitos de design de pás para microturbina eólica, assim como estabelecer parâmetros projetuais para os modelos tridimensionais de pás. Nesse contexto, foi fundamental a elaboração de modelos físicos para os ensaios experimentais para fins de testes, bem como a análise e a comparação com o desempenho dos modelos desenvolvidos por intermédio da simulação fluidodinâmica computacional e ensaios experimentais.

Entende-se que as turbinas eólicas de eixo horizontal são aquelas cujo eixo de rotação é paralelo ao solo. Por sua vez, as microturbinas eólicas, equipamentos que usam a energia cinética do vento para convertê-la em energia elétrica, podem ser aplicadas em diferentes cenários do cotidiano. O tamanho da turbina impacta em sua aplicação. As pequenas turbinas, dependendo de sua potência de saída, podem ser utilizadas para bombeamento, carregamento de baterias, uso em telecomunicações e eletrificação rural e de embarcações.

Microturbinas têm múltiplas aplicações, incluindo a alimentação de dispositivos eletrônicos em residências inteligentes. Na arquitetura doméstica, essas turbinas podem fornecer energia limpa para sistemas de iluminação, climatização, segurança e monitoramento, reduzindo a dependência de fontes convencionais. Integradas a sistemas de armazenamento, garantem o fornecimento contínuo de eletricidade, promovendo a eficiência energética. A combinação de microturbinas e doméstica contribui para residências sustentáveis, eficientes e inteligentes, oferecendo controle otimizado dos recursos energéticos e maior conforto aos moradores.

Apesar desses aspectos positivos, o uso de pequenas turbinas eólicas em ambientes urbanos é controverso e desafiador por razões de segurança, engenharia estrutural e vibração. No meio urbano, o vento é perturbado, turbulento e com várias alterações de direção em segundos. Na literatura, foi possível encontrar alguns conceitos inovadores, como o uso de difusores para induzir o fluxo de ar através das pás, sistemas

híbridos que aliam energia eólica com energia solar, turbinas inteligentes que se adaptam ao vento e emprego de materiais flexíveis.

Em síntese, buscou-se estabelecer um design de pás para microturbina eólica de eixo horizontal, considerando aspectos de dimensionamento e geometria das pás em escala centimétrica, perfis aerodinâmicos, número de pás e ângulo de ataque procedimento técnico-experimental. A partir do método de pesquisa, foi possível verificar que há poucos estudos sobre os modelos pesquisados, sobretudo o *loop-type*, que se destina a operar em baixa velocidade de rotação sem reduzir sua eficiência energética, aumentando a potência da turbina.

Essa situação trouxe certa problemática no que se refere à sistematização de conhecimento sobre a temática, visto que, em grande parte das referências, o assunto era abordado tangencialmente. Isso significa que, de certa perspectiva, esta pesquisa se mostra importante para contribuir com o desenvolvimento da produção científica na área.

A fim de otimizar o uso desses equipamentos, propôs-se, por meio da Teoria BEM como padrão de construção, desenvolver, com a maior simplicidade possível, parâmetros para a reprodução desses produtos. Os modelos aqui propostos poderão servir de base para futuras pesquisas sobre a temática, com vistas a aprimorar os conceitos apresentados. As pesquisas de Ximenes (2018) e Miritz (2019) contribuíram para a definição do método de trabalho e a estruturação da pesquisa, porém especialmente o estudo de Oliveira (2017) guiou alguns parâmetros de projeto para esta pesquisa, como velocidade de vento e diâmetro da microturbina.

Assim, foram propostos dois modelos de pá para microturbinas eólicas, tipo hélice e *loop-type*, aplicando a Teoria BEM. Os dois modelos de pá foram testados no *software* Ansys Discovery R2, e foi analisado o melhor da relação da velocidade de entrada e velocidade de saída do vento. Ainda, os modelos foram impressos em 3D, com a finalidade de serem submetidos a ensaios de túnel aerodinâmico. Como resultado, observou-se que o modelo tipo *loop-type* apresenta maior conversão da energia cinética comparado ao modelo tipo hélice.

Nos testes em túnel aerodinâmico, o modelo *loop-type* obteve bons resultados. O tempo médio de velocidade de partida foi de 4,3m/s, e a maior potência elétrica foi 192mW, mesmo quando exposto em ângulos diferentes com relação, indica uma promissora abordagem de pesquisa. O modelo hélice obteve valores menores de velocidade de partida, 3,9m/s, e valores de potência elétrica quase nulos quando comparados com o *modelo loop-type*. Esses resultados apontam que, para um design de pás otimizados para microturbinas, é necessário averiguar vários parâmetros de projeto.

Os resultados permitem propor novas alternativas para diversificar os modelos de microturbinas eólicas e torná-las aplicáveis em ambiente urbano. Por essa razão, profissionais de design e pesquisadores desempenham papel importante no estudo do tema, com vistas a contribuir para o desenvolvimento de tecnologias energéticas mais ecológicas e acessíveis.

Dessa forma, compreende-se como imprescindível o investimento em pesquisas futuras com vistas ao desenvolvimento de microturbinas capazes de possibilitar melhor conversão de energia, especialmente em ambiente urbano. Ainda, destacam-se como desafios os seguintes aspectos: melhoria no processo de estimativa de vento local, viabilidade econômica, facilitação na integração com sistema elétricos, promoção do engajamento e aceitação social.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Quanto a recomendações para futuras pesquisas, no que se refere à continuidade de trabalhos nesta área, sugere-se um estudo ainda mais minucioso, com o intuito de corroborar as informações aqui abordadas. Além disso, apontam-se possibilidades de desenvolvimento:

- analisar o efeito de bloqueio do túnel aerodinâmico nos resultados encontrados;
- avaliar outras combinações de número de pás para o modelo *loop-type*;
- testar o modelo *loop-type in loco*;
- investigar a aplicação do modelo *loop-type*;
- estimar a produção de energia para cada modelo proposto.
- investigar os níveis de ruído aerodinâmicos emitidos pelas microturbinas eólicas.

### 5.2 PRODUÇÃO ACADÊMICA E CIENTÍFICA COMPLEMENTAR

Foi realizado junto à 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, um pedido de registro de desenho industrial do Modelo *loop-type*.

Parte do presente trabalho foi transformando em capítulo de livro com o seguinte título: *Projeto de microturbinas eólicas: oportunidades e desafios*, na obra *Ciências Socialmente Aplicáveis: Integrando Saberes e Abrindo Caminhos VI*, Editora Artemis, vinculada à EduCapes.

## REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Relatório Anual - ABEEólica Associação Brasileira de Energia eólica**. [S. l.], 2019. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/07/Relatório-Anual2018.pdf>. Acesso em: 14 out. 2019.
- ABEEÓLICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. **Boletim anual - 2021**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 5 out. 2022.
- AKOUR, Salih N. *et al.* Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 116, p. 215–223, 2018. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez45.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0960148117309461>. Acesso em: 16 dez. 2018.
- AL-KODMANY, Kheir M. GREEN TOWERS AND ICONIC DESIGN: Cases from Three Continents. **International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 11, 2014. Disponível em: <http://archnet-ijar.net/index.php/IJAR/article/view/336>.
- ALMEIDA, Daniel João Marques. **Efeito de bloqueio na calibração de anemômetros num túnel de vento**. Porto: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de engenharia, FEUP, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/302940890.pdf>.
- ALVES, Edson Augusto de Brito. **Concepção de uma pequena turbina eólica destinada ao segmento doméstico (simplificação e análise aerodinâmica das pás)**. 2011: Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011. *E-book*. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/1174>. Acesso em: 24 nov. 2019.
- ANEEL. **Geração Distribuída**. [S. l.], 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 23 out. 2019.
- ARAÚJO, Amanda Alves;; MOURA, Geraldo Jorge Barbosa de. A literatura científica sobre os impactos causados pela instalação de arques eólicos : análise cienciométrica. [s. l.], p. 207–223, 2017.
- AUNG, Aye Aye *et al.* Design, Fabrication and Performance Analysis of Loopwing Horizontal Axis Wind Turbine. **International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering**, [s. l.], v. 05, n. 12, p. 48–58, 2019. Disponível em: <https://ijasre.net/index.php/ijasre/article/view/552>. Acesso em: 16 out. 2022.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- BARLOW, Jewel B.; RAE, William H.; POPE, Alan. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. [S. l.]: Wiley, 1999. *E-book*. Disponível em: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471557749.html>.
- BONSIEPE, Gui. *et al.* **Metodologia experimental: desenho industrial**. Brasília: CNPQ/Coordenação editorial, 1984.
- BP. **Statistical Review of World Energy**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>. Acesso em: 5 out. 2022.

BRAGA, Julio C Nogino. **Calibrador de Tacômetro**. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://repositorios.inmetro.gov.br/handle/10926/222>. Acesso em: 28 out. 2019.

BRASIL. LEI Nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, Edição 5, p.4, Jan. 2022, Seção 1: Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>.

BURTON, Tony *et al.* **Wind energy handbook**. West Sussex: WILEY, 2001.

CÂNDIDO, L. H. A.; GARAY, M. L. S. Design de microturbina eólica: projeto do produto, prototipagem e ensaio funcional. **IV International Conference on Design, Engineering, Management for innovation**, Florianópolis, v. 1, p. 716–717, 2015.

CASTRO, Francisco Forte Alvim de. Análise da influência da pigmentação na qualidade de peças impressas por FFF em PLA e PETG. [s. l.], p. 133, 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/135101>.

CIMBALA, John M.; CENGEL, Yunus A. **Mecânica Dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

COUNCIL, Global Wind Energy. **Global Wind Report 2022**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>. Acesso em: 5 out. 2022.

COUTINHO, Arilton. **Desenvolvimento de pás de turbinas eólicas com auxílio da dinâmica de fluidos computacional**. 2008: Dissertação (Mestrado em processos industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2008. *E-book*. Disponível em: [http://cassiopea.ipt.br/teses/2008\\_PI\\_Arilton\\_Coutinho.pdf](http://cassiopea.ipt.br/teses/2008_PI_Arilton_Coutinho.pdf).

CRESESB. **Aplicações dos Sistemas Eólicos**. [S. l.], 2008. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=251](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=251). Acesso em: 26 out. 2019.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia Eólica: para a produção de energia elétrica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia: Acta: Abeeólica, 2013.

DAI, Kaoshan *et al.* Environmental issues associated with wind energy - A review. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 75, p. 911–921, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>. Acesso em: 15 out. 2019.

DALE, Spencer. **Analysis – Spencer Dale, group chief economist**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/chief-economist-analysis.html>. Acesso em: 14 out. 2019.

DAROS, Carolina; KISTMANN, Virginia Borges; ZAINA, Tatiana Zimermann. Contribuições do design para as smart cities. *In:* , 2014, São Paulo: **In: Anais do 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design [= Blucher Design Proceedings, v. 1, n. 4]**. São Paulo: Blucher, 2014. p. 2603–2614. Disponível em: [10.5151/designpro-ped-01448](https://doi.org/10.5151/designpro-ped-01448). Acesso em: 5 jun. 2020.

DUTRA, Ricardo. **Energia Eólica Princípios e Tecnologias**. Fundão, RJ: CRESESB:Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2008. *E-book*. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf).

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese 2022- Ano base 2021**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 5 out. 2022.

ESTANQUEIRO, Ana; SIMÕES, Teresa. Aproveitamento de energia eólica em ambiente urbano e construído. **Renováveis Magazine**, nº2, [s. l.], p. 44–49, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.9/1178>. Acesso em: 31 out. 2019.

EUNICE AKIN-PONNLE, Ajibike *et al.* From Macro to Micro: Impact of Smart Turbine Energy Harvesters (STEH), on Environmental Sustainability and Smart City Automation. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14031887>.

FITE, Jenna. **In the Studio: An Ant and a Tiny Wind Turbine**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/photography/proof/2014/06/19/in-the-studio-an-ant-and-a-tiny-wind-turbine/>. Acesso em: 12 nov. 2019.

FLECK, Gustavo Dias. **Numerical analysis of the solidity effects over the aerodynamic performance of a small wind turbine**. 2017: Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, 2017.

GARRÉ, Saulo de Oliveira. **Avaliação experimental do desempenho aerodinâmico de pequenas turbinas eólicas confeccionadas em prototipagem 3D**. 2015: Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/132643>.

GASCH, Robert; TWELE, Jochen. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. 2. ed. Berlin: Springer, 2011. *E-book*. Disponível em: [http://books.google.com/books?id=c-QB9PiC\\_GMC&pgis=1](http://books.google.com/books?id=c-QB9PiC_GMC&pgis=1).

GE. **Most powerful offshore wind turbine in the world to date - Haliade-X - GE Renewable Energy**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>. Acesso em: 25 out. 2019.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projeto de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

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

GRADL, Christina; KNOBLOCH, Claudia. **Energize the BoP: Energy Business Model Generator for Low Income Countries**. Berlin: ENDEVA, 2011.

HAU, Erich; RENOARD, Horst. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 2. ed. Berlin: Heidelberg Springer-Verlag, 2006. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29284-5>.

IEA. - **International Energy Agency. Electricity - Fuels & Technologies - IEA**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>. Acesso em: 12 out. 2022.

IEA. **Global Energy & CO2 Status Report 2018**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://webstore.iea.org/global-energy-co2-status-report-2018>. Acesso em: 14 out. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global changes in electricity generation, 2015-2024**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-changes-in-electricity-generation-2015-2024>. Acesso em: 12 out. 2022.

JENSEN, Jonas Pagh. Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. **Wind Energy**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 316–326, 2019.

JEON, Wonyoung *et al.* Performance prediction of loop-type wind turbine. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 168781401984047, 2020. Disponível em: <https://us.sagepub.com/en-us/nam/>.

KARTHIKEYAN, N. *et al.* Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 42, p. 801–822, 2015.

KASNER, Robert; BAŁDOWSKA-WITOS, Patrycja. materials Evaluating the Technology Readiness of a Ribbon-Blade Wind Turbine Using NASA’s TRL Method. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14247709>.

KIM, Youngwon *et al.* Profile design of loop-type blade for small wind turbine. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 387–392, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0043-9>.

KISHORE, Ravi Anant; COUDRON, Thibaud; PRIYA, Shashank. Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 116, p. 21–31, 2013.

KISHORE, Ravi Anant; COUDRON, Thibaud; PRIYA, Shashank. Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 116, p. 21–31, 2013. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez45.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0167610513000366>. Acesso em: 16 dez. 2018.

KISHORE, Ravi Anant; VUČKOVIĆ, Dušan; PRIYA, Shashank. Ultra-low wind speed piezoelectric windmill. **Ferroelectrics**, [s. l.], v. 460, n. 1, p. 98–107, 2014.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LIU, Pu; MENG, Fanran; BARLOW, Claire Y. Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 212, p. 1268–1281, 2019.

LUCON, Oswaldo; GOLDEMBERG, José. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, [s. l.], v. 72, p. 6–15, 2007. Disponível em: <http://www.periodicos.usp.br/revusp/article/viewFile/13564/15382>.

MANZINI, EZIO; VEZZOLI, Carlo. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis**. São Paulo: Edusp, 2005.

MIRITZ, Suzane. **Design de difusor aerodinâmico para turbina eólica de eixo vertical**. 2019: Dissertação (Mestrado em Design) - Escola de Engenharia, Faculdade de Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre, 2019. *E-book*. Disponível em: <https://mail.google.com/mail/u/0/#search/suzane.miritz%40gmail.com+difusor/WhctKJVJkwGDDxKnVsXjPTwKxZpNwtldbxqnfBRVNwbxtlwKdwKbIDNdGzkWnVsPHgPKQgq?project=1&messagePartId=0.1>.

NASA. **What Are Wind Tunnels?**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-58.html>. Acesso em: 28 out. 2019.

NEIROTTI, Paolo *et al.* Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. **Cities**, [s. l.], v. 38, p. 25–36, 2014.

NERI, Marlon *et al.* Green versus green? Adverting potential conflicts between wind power generation and biodiversity conservation in Brazil. **Perspectives in Ecology and Conservation** 17, [s. l.], p. 131–125, 2019.

NEWELL, Richard G.; RAIMI, Daniel; ALDANA, Gloria. Global energy outlook 2019: The next generation of energy. **Resources for the future**, [s. l.], p. 46, 2019. Disponível em: <https://www.rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2019/>. Acesso em: 12 out. 2019.

OLIVEIRA, Cássia Pederiva de. **Análise do desempenho de uma turbina savonius helicoidal com torção de 180° empregando simulação numérica**. 2014: Dissertação (Mestrado em Engenharia) -Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2014, 2014.

OLIVEIRA, Mariana Schmidt de Oliveira. **Design de pás para aerogeradores de eixo horizontal aplicado à microenergia**. 2017: Dissertação (Mestrado em Design) - Escola de Engenharia, Faculdade de Arquitetura, UFRGS. Porto Alegre, 2017.

ONU - Organização das Nações Unidas. **17 Objetivos para transformar nosso mundo**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/>. Acesso em: 12 out. 2019.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Acesso à eletricidade avança, mas desigualdade ainda é obstáculo para cumprir meta de energia para todos**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/130381-acesso-eletricidade-avanca-mas-desigualdade-ainda-e-obstaculo-para-cumprir-meta-de-energia>. .

PEREIRA, Andréa Franco. Da Sustentabilidade Ambiental e da Complexidade Sistêmica no Design Industrial de Produtos. **Revista Estudos em Design**, [s. l.], v. v. 10, n. n. 01, p. 37–61, 2003.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. 1. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2013.

PIRES, JULIO CESAR PINHEIRO. **Estudo do rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual**. 2010: Dissertação (Mestrado em Design) - Escola de Engenharia, Faculdade de Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre, 2010-. ISSN 14744422.

POURRAJABIAN, Abolfazl; EBRAHIMI, Reza; MIRZAEI, Masoud. Applying micro scales of horizontal axis wind turbines for operation in low wind speed regions. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 87, p. 119–127, 2014. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez45.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0196890414006268>. Acesso em: 15 dez. 2018.

PRODANOV, Cleber Cristiano;; FREITAS, Ernani Cesar de; **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RANCOURT, David; TABESH, Ahmadreza; FRÉCHETTE, Luc G. Evaluation of centimeter-scale micro wind mills: Aerodynamics and electromagnetic power generation. *In:* , 2007, Freiburg - Germany. **7 int'l workshop on micro and nanotechnology for power generation e Energy Conversion App's**. Freiburg - Germany: [s. n.], 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/284043050>. Acesso em: 27 out. 2019.

REINDERS, Angèle; DIEHL, Jan Carel; BREZET, Han. **The power of design: Product Innovation in Sustainable Energy Technologies**. Nova Jersey: WILEY, 2012-. ISSN 00479624.v. 34

REZENDE, Andre. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada**. 2009: Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro Técnico Científico PUC - Rio, Rio de Janeiro, 2009.

RODRIGUES, Vinícius Picanço *et al.* Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 1–34, 2017. Disponível em: <http://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/1657>. Acesso em: 5 nov. 2018.

ROSA, Aldo Vieira da. **Processos de energias renováveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2015.

SAMPIERI, R. H; COLLADO, C. F;; LUCIO, M. P. B. Metodologia de pesquisa. *In*: 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

SBCEI. **Leading the Energy Transition Factbook: Wind Power**. Puteaux:, 2013. Disponível em: <http://www.sbc.slb.com/sbcinstitute.aspx>,. Acesso em: 22 out. 2019.

SIMABUKULO, Lucas Antonio Nizuma *et al.* Energia, industrialização e modernidade – história social. **Projeto Eletromemória - História da Energia Elétrica no Estado de São Paulo - USP**, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://eletromemoria.fflch.usp.br/content/energia-industrializacao-e-modernidade-historia-social-lucas-antonio-nizuma-simabukulo-luiz>. Acesso em: 22 out. 2019.

SINGH, Ronit K.; AHMED, M. Rafiuddin. Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 50, p. 812–819, 2013.

SUNDERLAND, Keith *et al.* Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 121, p. 70–81, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez45.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0167610513001748?via%3Dihub>. Acesso em: 16 dez. 2018.

TARHAN, Cevahir; YILMAZ, İlker. Investigation of small wind turbine airfoils for Kayseri weather conditions. **JOURNAL OF FCE SCIENTIFIC PAPER - FCE DERGİSİ – BİLİMSEL MAKALE**, [s. l.], v. 4, 2016. Disponível em: <http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/KAYSERI->. Acesso em: 9 nov. 2019.

TEXENERGY - PORTABLE INFINITE OFF-GRID POWER AND ENERGY. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.texenergy.com/>. Acesso em: 4 jul. 2021.

TJEERD VEENHOVEN. **Studio Tjeerd Veenhoven | Vários Produtos**. [S. l.], 2010. Disponível em: [https://www.tjeerdveenhoven.com/portfolio\\_page/various-products/](https://www.tjeerdveenhoven.com/portfolio_page/various-products/). Acesso em: 4 jul. 2021.

UIUC - **University of Illinois at Urbana-Champaign - Airfoil Data Site**. [S. l.], 2019. Disponível em: [https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html#S](https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html#S). Acesso em: 9 nov. 2019.

VERDUM, Valdirene. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana**. 2013: Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2013-. ISSN 15249557.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012.

W.C.E.D. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Acronyms and Note on Terminology Chairman ' s Foreword. [s. l.], 1987.

WATERLILY TURBINE | ENERGY ANYWHERE. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.waterlilyturbine.com/>. Acesso em: 4 jul. 2021.

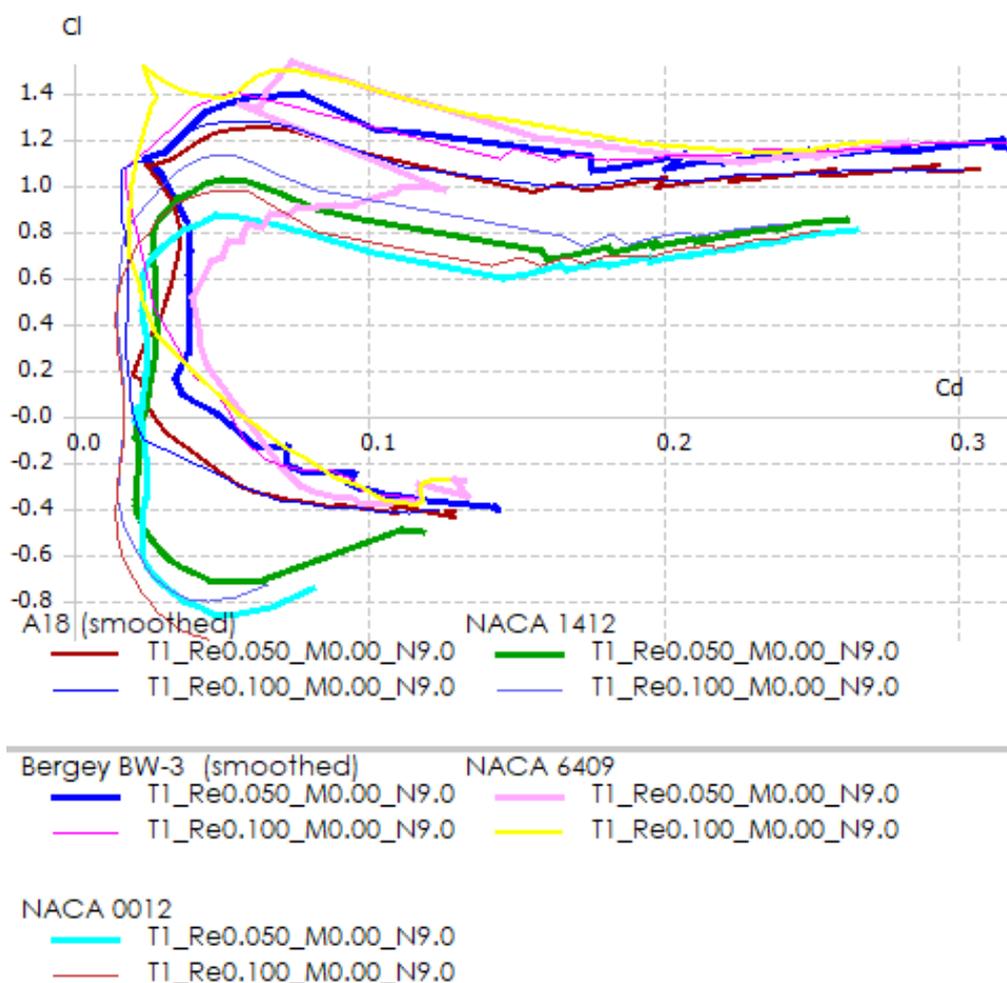
XIMENES, Fernando Silveira. **Design de difusor aerodinâmico compacto para uma turbina eólica de pequena escala**. 2018: Dissertação (Mestrado em Design) - Escola de Engenharia, Faculdade de Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

YOSHIDA, Minoru. 204 The energy education with Loopwing type of wind turbine : The design concept of Loopwing type wind turbine. **The Proceedings of the Technology and Society Conference**, Tóquio, v. 2007, p. 41–44, 2007. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmetsd/2007/0/2007\\_41/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmetsd/2007/0/2007_41/_article/-char/ja/).

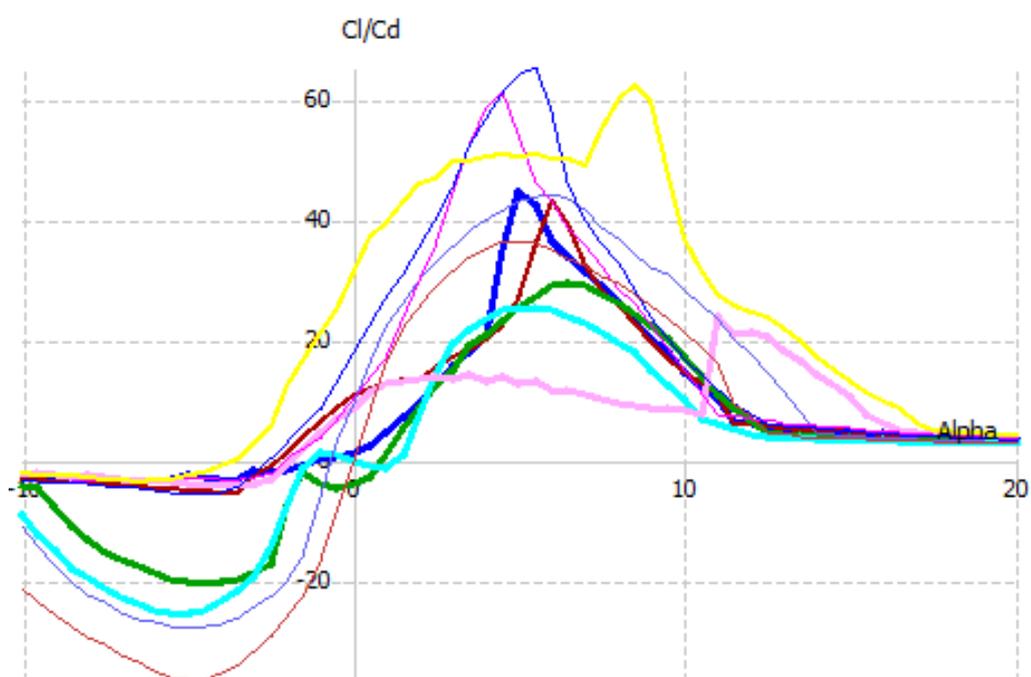
## APÊNDICE A – GRÁFICOS DE DESEMPENHOS DOS AEROFÓLIOS

A seguir, estão apresentados os gráficos obtidos no *software* QBlade.

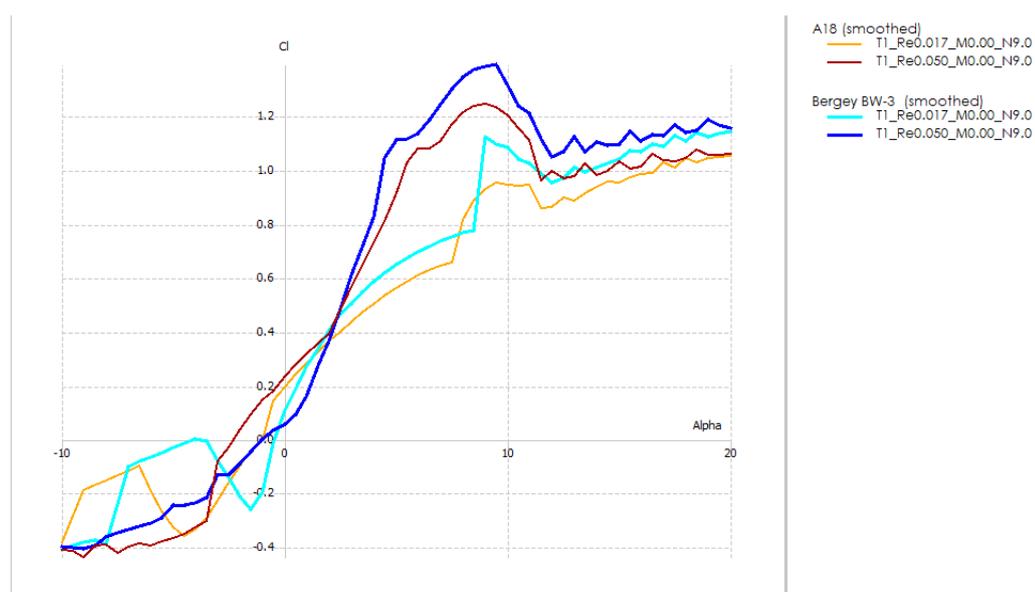
Análise do número de Reynolds com todos os perfis -  $C_L$  e  $C_D$ .



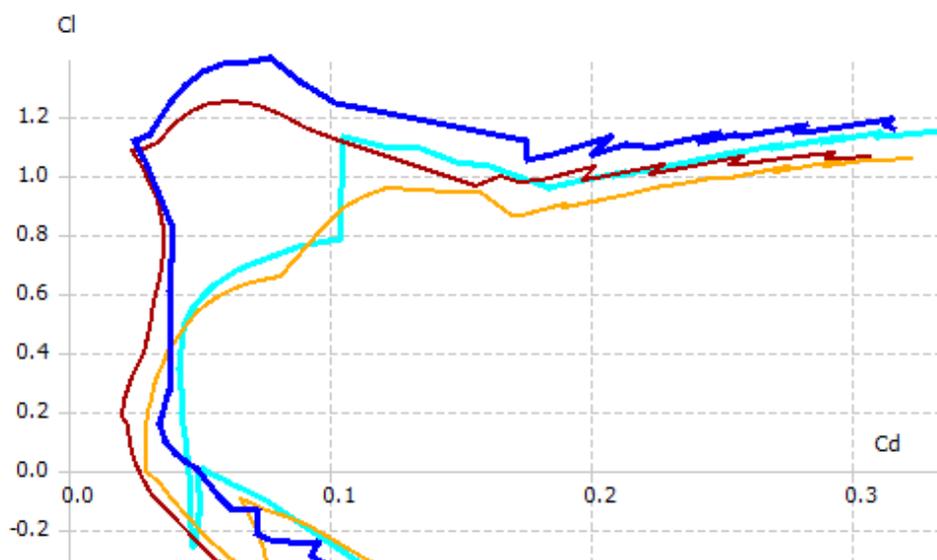
Análise do número de Reynolds com todos os perfis -  $C_L/C_D$  e Alpha.



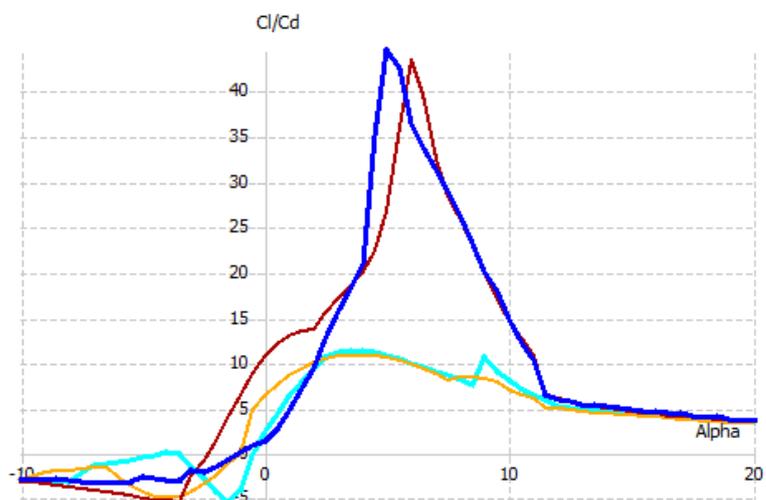
Análise do número de Reynolds com os perfis BW-3 e A18 -  $C_L$  e Alpha.

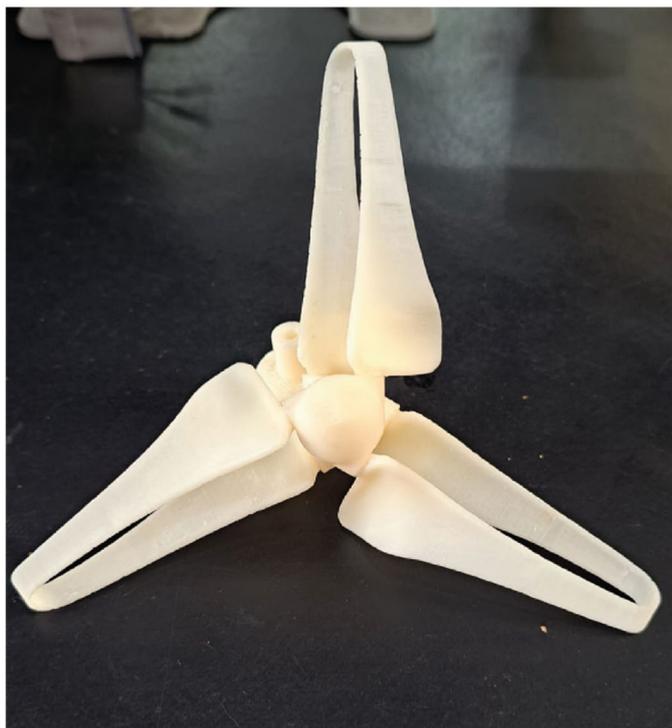
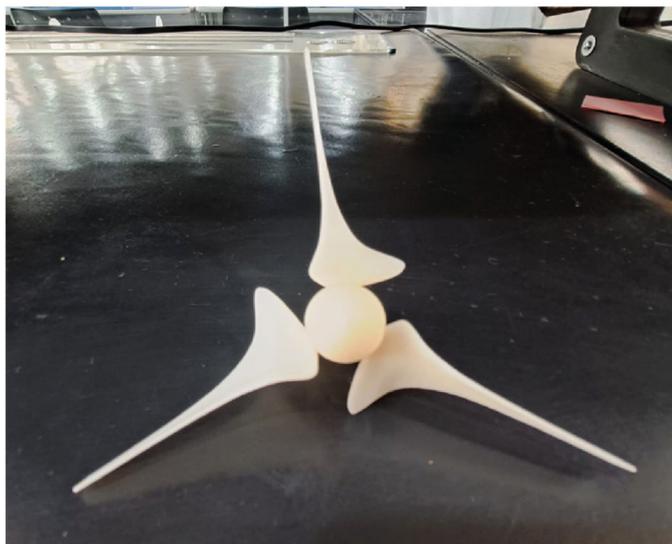


Análise do número de Reynolds com os perfis BW-3 e A18 -  $C_L$  e  $C_D$ .

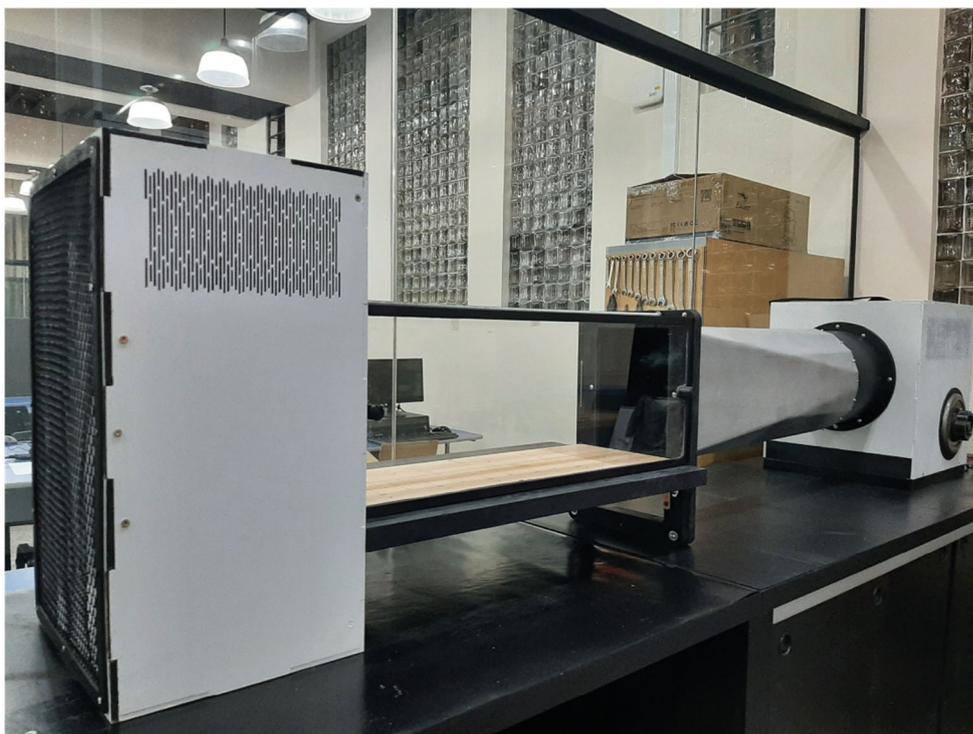
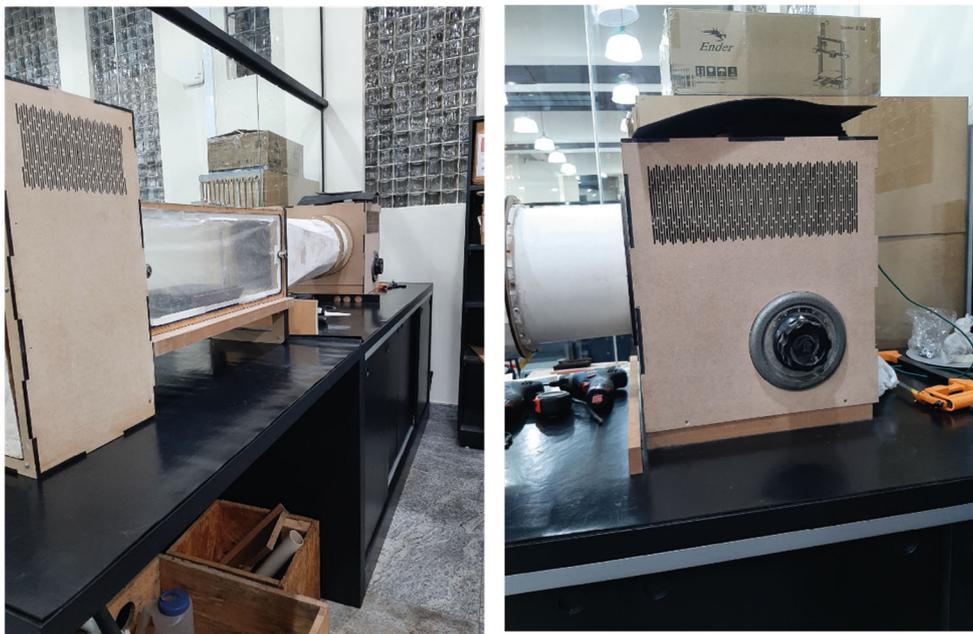


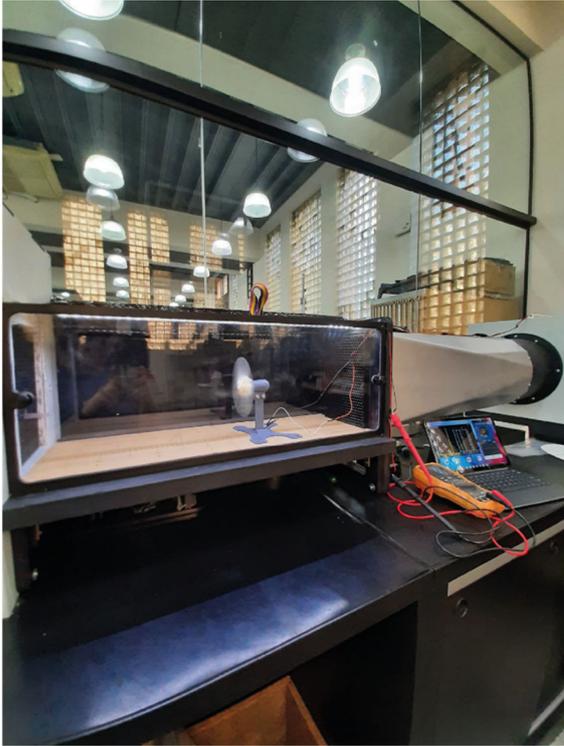
Análise do número de Reynolds com os perfis BW-3 e A18 -  $C_L$ ,  $C_D$  e Alpha.



**APÊNDICE B – IMPRESSÕES 3D**

## APÊNDICE C – TÚNEL AERODINÂMICO









## APÊNDICE E – DADOS TABULADOS

Modelo	Ensaio	Tempo	Ângulo	RPM-mAmA	Ampere	RPM-v	V	mV	W	mW	
Loop-type	1	4	0	839	43,15	0,043	1805	1,32	1320	0,057	56,96
Loop-type	1	4,5	0	1073	55,2	0,055	2172	1,616	1616	0,089	89,20
Loop-type	1	5	0	1332	68,55	0,069	2411	1,808	1808	0,124	123,94
Loop-type	1	5,5	0	1660	85,45	0,085	2438	2,109	2109	0,180	180,21
Loop-type	1	4	15	238	12,76	0,013	1694	1,211	1211	0,015	15,45
Loop-type	1	4,5	15	820	42,61	0,043	2046	1,515	1515	0,065	64,55
Loop-type	1	5	15	979	50,38	0,050	2278	1,701	1701	0,086	85,70
Loop-type	1	5,5	15	1382	66,35	0,066	2671	1,986	1986	0,132	131,77
Loop-type	1	5	30	314	15,15	0,015	1598	1,109	1109	0,017	16,80
Loop-type	1	5,5	30	546	24,85	0,025	1974	1,365	1365	0,034	33,92
Loop-type	2	4	0	839	43,05	0,043	1802	1,335	1335	0,057	57,47
Loop-type	2	4,5	0	1073	55,1	0,055	2169	1,631	1631	0,090	89,87
Loop-type	2	5	0	1332	68,45	0,068	2408	1,823	1823	0,125	124,78
Loop-type	2	5,5	0	1660	85,35	0,085	2435	2,124	2124	0,181	181,28
Loop-type	2	4	15	239	12,66	0,013	1691	1,226	1226	0,016	15,52
Loop-type	2	4,5	15	821	42,51	0,043	2043	1,53	1530	0,065	65,04
Loop-type	2	5	15	980	50,28	0,050	2275	1,716	1716	0,086	86,28
Loop-type	2	5,5	15	1383	66,25	0,066	2668	2,001	2001	0,133	132,57
Loop-type	2	5	30	315	15,05	0,015	1595	1,124	1124	0,017	16,92
Loop-type	2	5,5	30	547	24,75	0,025	1971	1,38	1380	0,034	34,16
Loop-type	3	4	0	841	43,3	0,043	1807	1,455	1455	0,063	63,00
Loop-type	3	4,5	0	1075	55,35	0,055	2174	1,751	1751	0,097	96,92
Loop-type	3	5	0	1334	68,7	0,069	2413	1,943	1943	0,133	133,48
Loop-type	3	5,5	0	1662	85,6	0,086	2440	2,244	2244	0,192	192,09
Loop-type	3	4	15	240	12,91	0,013	1696	1,346	1346	0,017	17,38

(continua)

Modelo	Ensaio	Tempo	Ângulo	RPM-mAmA	Ampere	RPM-v	V	mV	W	mW	
Loop-type	3	4,5	15	822	42,76	0,043	2048	1,65	1650	0,071	70,55
Loop-type	3	5	15	981	50,53	0,051	2280	1,836	1836	0,093	92,77
Loop-type	3	5,5	15	1384	66,5	0,067	2673	2,121	2121	0,141	141,05
Loop-type	3	5	30	316	15,3	0,015	1600	1,244	1244	0,019	19,03
Loop-type	3	5,5	30	548	25	0,025	1976	1,5	1500	0,038	37,50
Hélice	1	4	0	130	0,64	0,001	159	0,124	124,3	0,000	0,08
Hélice	1	4,5	0	184	9,16	0,009	227	0,173	172,9	0,002	1,58
Hélice	1	5	0	205,2	11,25	0,011	258	0,204	203,5	0,002	2,29
Hélice	1	5,5	0	251	14,42	0,014	313	0,255	255,3	0,004	3,68
Hélice	1	4	15	82	4,3	0,004	104	0,087	86,5	0,000	0,37
Hélice	1	4,5	15	130	7,01	0,007	173	0,138	138,3	0,001	0,97
Hélice	1	5	15	175	8,74	0,009	208	0,169	168,7	0,001	1,47
Hélice	1	5,5	15	215	11,45	0,011	276,8	0,221	220,8	0,003	2,53
Hélice	1	5	30	125	5,7	0,006	75,8	0,1	100	0,001	0,57
Hélice	2	4	0	128	0,59	0,001	157	0,123	123,1	0,000	0,07
Hélice	2	4,5	0	182	9,11	0,009	225	0,172	171,7	0,002	1,56
Hélice	2	5	0	203,2	11,2	0,011	256	0,202	202,3	0,002	2,27
Hélice	2	5,5	0	249	14,37	0,014	311	0,254	254,1	0,004	3,65
Hélice	2	4	15	80	4,25	0,004	102	0,085	85,3	0,000	0,36
Hélice	2	4,5	15	128	6,96	0,007	171	0,137	137,1	0,001	0,95
Hélice	2	5	15	173	8,69	0,009	206	0,168	167,5	0,001	1,46
Hélice	2	5,5	15	213	11,4	0,011	274,8	0,22	219,6	0,003	2,50
Hélice	2	5	30	123	5,65	0,006	73,8	0,099	98,8	0,001	0,56
Hélice	3	4	0	128,5	0,615	0,001	158	0,123	123,05	0,000	0,08
Hélice	3	4,5	0	182,5	9,135	0,009	226	0,172	171,65	0,002	1,57
Hélice	3	5	0	203,7	11,225	0,011	257	0,202	202,25	0,002	2,27
Hélice	3	5,5	0	249,5	14,395	0,014	312	0,254	254,05	0,004	3,66

(conclusão)

Modelo	Ensaio	Tempo	Ângulo	RPM-mA	Ampere	RPM-v	V	mV	W	mW	
Hélice	3	4	15	80,5	4,275	0,004	103	0,085	85,25	0,000	0,36
Hélice	3	4,5	15	128,5	6,985	0,007	172	0,137	137,05	0,001	0,96
Hélice	3	5	15	173,5	8,715	0,009	207	0,167	167,45	0,001	1,46
Hélice	3	5,5	15	213,5	11,425	0,011	275,8	0,22	219,55	0,003	2,51
Hélice	3	5	30	123,5	5,675	0,006	74,8	0,099	98,75	0,001	0,56