



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E  
SISTEMAS

Leonardo Ferreira Pacheco Malta Martins

**Microgeração Eólica Embarcada para Aerogeradores com Asas Cabeadas**

Florianópolis - SC  
2021

Leonardo Ferreira Pacheco Malta Martins

**Microgeração Eólica Embarcada para Aerogeradores com Asas Cabeadas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.

Coorientador: Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.

Florianópolis - SC

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Martins, Leonardo Ferreira Pacheco Malta  
Microgeração Eólica Embarcada para Aerogeradores com Asas  
Cabeadas / Leonardo Ferreira Pacheco Malta Martins ;  
orientador, Alexandre Trofino Neto, coorientador, Marcelo  
De Lellis Costa de Oliveira, 2021.  
84 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Microgerador  
Eólico. 3. Airborne Wind Energy. 4. Unidade de Voo. 5.  
Energias Renováveis. I. Neto, Alexandre Trofino. II. de  
Oliveira, Marcelo De Lellis Costa. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

Leonardo Ferreira Pacheco Malta Martins

**Microgeração Eólica Embarcada para Aerogeradores com Asas Cabeadas**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Carlos Henrique Illa Font, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Felipe Gomes de Oliveira Cabral, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nestor Roqueiro, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

---

Prof. Werner Kraus Junior, Dr.  
Coordenador do Programa

---

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.  
Orientador

Florianópolis - SC, 13 de Agosto de 2021.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, Valduino e Régia, e aos meus familiares e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Alexandre Trofino e Marcelo De Lellis, por sempre indicarem os melhores caminhos a serem tomados durante o desenvolvimento desta pesquisa e da escrita da dissertação.

Gostaria de agradecer ao grupo de pesquisa em energias renováveis, UFSCkite, por disponibilizar estrutura e equipamentos necessários ao desenvolvimento deste trabalho, além dos participantes do grupo, cuja troca de experiências se tornou algo fundamental.

Agradeço também à disponibilidade de acesso e uso de equipamentos do Laboratório de Ciências Térmicas da UFSC (LabTermo), do Instituto de Eletrônica de Potência da UFSC (INEP) e do Laboratório de Montagem Mecatrônica da UFSC (LMM). Assim como à CAPES e à FAPEAM, pelo apoio através do edital nº 001/2019 – PROPG-CAPES/FAPEAM.

Por fim, gostaria de agradecer profundamente aos meus pais, Valduino e Régia, ao meu irmão, Raphael, à minha mãe de criação, Elcimary e à minha namorada, Mariana, pelo amor incondicional e apoio constante, sempre permitindo que eu pudesse continuar firme e forte durante esses anos de estudo e pesquisa. Muito obrigado.

*“O sucesso não consiste em não errar,  
mas em não cometer os mesmos  
equivocos mais de uma vez.”  
(George Bernard Shaw)*

## RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta o projeto de um microgerador eólico a ser embarcado na unidade de voo de um aerogerador com asas cabeadas, mais conhecido como *Airborne Wind Energy* (AWE), uma tecnologia inovadora da área de geração de energia eólica. O aerogerador considerado é do tipo *pumping kite*, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Energias Renováveis da UFSC (UFSCkite), o qual consiste basicamente de uma asa cabeada, uma unidade de voo, para controle de trajetória, e outra unidade de solo, responsável pela geração de energia. O objetivo central do microgerador projetado é de fornecer potência necessária para alimentar os componentes presentes na unidade de voo do sistema AWE: dois servomotores, um microcontrolador, sensores e periféricos. Atualmente um *pack* de baterias é utilizado para este fim, porém sua capacidade limitada em algumas horas inviabiliza um trabalho contínuo por parte do sistema. Deste modo, o microgerador deve suprir a energia demandada por toda eletrônica embarcada na unidade de voo, enquanto as baterias entram como um *backup* para eventuais quedas na geração da microturbina, ao passo que, com a ocorrência de alta geração, aproveita-se para recarregar o *pack* de baterias. O trabalho apresenta o levantamento do modelo do microgerador, mais especificamente suas curvas de potência: potência gerada, coeficiente de potência e pontos de máxima potência, todas identificadas em função da variação da velocidade do vento. O levantamento das curvas do microgerador é realizado através de testes laboratoriais com uso de túnel de vento, para consequente aplicação da técnica de *Power Signal Feedback* (PSF) como método de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), cuja aplicação exige a identificação do modelo da microturbina. A partir disso, o projeto do controlador, em nível de simulação com auxílio do *software* PSIM, é apresentado. Propõe-se uma técnica de PSF adaptada, com uso completo do polinômio característico da curva de MPPT e alteração de referência de controle para evitar dissipação de energia excedente gerada, quando o *pack* de baterias estiver carregado. Além disso, é apresentada a caracterização dos componentes que fazem parte da microturbina: rotor, gerador, retificador trifásico, conversor CC-CC, assim como o sistema de aquisição de dados baseado em microcontrolador. Como resultados foi possível obter, em nível de simulação, valores que chegam em torno de 61 W de potência para o circuito em malha fechada, atuando em velocidades do vento de até 33 m/s.

**Palavras-chave:** Microgerador Eólico. AWE. Unidade de voo. MPPT. PSF.

## ABSTRACT

In this master thesis the design of a micro wind turbine to be embedded in the flight unit of an Airborne Wind Energy System, an innovative technology in the wind energy area, is presented. More specifically, it is considered the pumping kite configuration, in the prototype developed by the Research Group in Renewable Energy placed on Federal University of Santa Catarina (UFSCkite), which consists basically of a tethered wing, a flight unit, that controls the trajectory, and a ground unit, responsible for power generation. The purpose of the microgenerator is to provide the necessary energy to power the loads in the flight unit: two servomotors, a microcontroller, sensors and peripheral devices. Currently, a battery pack is used for this purpose, however its limited capacity to a few hours makes impossible for the system to work continuously. So, the microgenerator must supply all the power required by the flight unit, while the batteries work as a backup for eventual drops in energy generation, and when there is a high generation, it is used to recharge the battery pack. This work presents the turbine model identification, more specifically its power curves: generated power, power coefficient and maximum power points, all of them identified as function of wind speed variation. The identification of the microgenerator curves is performed through wind tunnel tests, for subsequent application of Power Signal Feedback (PSF) technique as a maximum power point tracking (MPPT) method, whose application requires the identification of the turbine model. Using that, the project of the controller, aided by software PSIM as simulator, is presented. The work proposes an adapted PSF, using the complete characteristic polynomial of the MPPT curve and a control reference change to avoid waste of overplus power, when the battery pack is charged. The characterization of the components that make part of the micro turbine is presented: rotor, generator, three-phase rectifier, DC-DC converter and the data acquisition system based on microcontroller. As results it was possible to obtain, at simulation level, around 61 W of power, in closed loop, at 33 m/s of wind speed.

**Keywords:** Micro wind turbine. AWE. Flight unit. MPPT. PSF



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Porcentagem das populações de regiões sem acesso à energia. . . . .	18
Figura 2 – Diferentes fontes de geração de energia elétrica. . . . .	19
Figura 3 – Capacidade total de potência instalada por fonte de energia 2019-2025. . . . .	20
Figura 4 – Comparação entre sistemas eólicos. . . . .	21
Figura 5 – Grupos de Pesquisa e Empresas que desenvolvem AWE. . . . .	22
Figura 6 – Sistema AWE do tipo <i>pumping kite</i> do grupo Grupo de Pesquisa em Aerofólios Cabeados para Energia Eólica da UFSC (UFSCkite). . . . .	22
Figura 7 – Projeto em <i>Computer Aided Design</i> (CAD) da unidade de voo do AWE. . . . .	23
Figura 8 – Projeto em CAD da nova unidade de voo proposta. . . . .	24
Figura 9 – Capacidade global de geração de energia eólica. . . . .	27
Figura 10 – Esquema de distribuição de forças em um aerogerador. . . . .	28
Figura 11 – Esquema básico de sistemas de geração eólica. . . . .	29
Figura 12 – Evolução das turbinas eólicas de 1980 aos dias atuais. . . . .	30
Figura 13 – Modelo precursor de turbina com eixo horizontal. . . . .	30
Figura 14 – Construção da Turbina de Darrieus com eixo vertical. . . . .	31
Figura 15 – Eficiência de diferentes turbina eólicas. . . . .	32
Figura 16 – Diferentes algoritmos de <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT). . . . .	33
Figura 17 – Fluxograma do Algoritmo <i>Perturbation &amp; Observation</i> (PO). . . . .	34
Figura 18 – Aplicação de técnica P&O para o rastreamento da máxima potência. . . . .	35
Figura 19 – Coeficiente de potência vs <i>Tip-speed ratio</i> . . . . .	36
Figura 20 – Diagrama de blocos da técnica <i>Optimal Tip-Speed Ration Control</i> (OTSR). . . . .	36
Figura 21 – Curva MPPT em função de curvas de potência. . . . .	37
Figura 22 – Diagrama de blocos da técnica PSF. . . . .	38
Figura 23 – Protótipo do Microgerador com estrutura de testes. . . . .	39
Figura 24 – Novo modelo para a nacele. . . . .	40
Figura 25 – Modelo do gerador Koford 33H412A. . . . .	41
Figura 26 – Modelo de ponte retificadora trifásica 36MT160. . . . .	42
Figura 27 – Circuito conversor Buck-Boost Não Inversor. . . . .	43
Figura 28 – Bateria de LiFePO4 modelo ANR26650M1B. . . . .	44
Figura 29 – Plataforma Arduino Nano com microcontrolador ATmega328. . . . .	45
Figura 30 – Exemplo de curva de potência de um aerogerador. . . . .	48
Figura 31 – Exemplo de curva de coeficiente de potência de um aerogerador. . . . .	48
Figura 32 – Circuito em malha aberta com uso do <i>software</i> PSIM. . . . .	49
Figura 33 – Ensaio em túnel de vento no LabTermo da UFSC. . . . .	50
Figura 34 – Curva de potência em função da velocidade do vento. . . . .	51
Figura 35 – Coeficiente de potência em função da velocidade do vento. . . . .	52

Figura 36 – Coeficiente de potência para 17 m/s em função do <i>tip speed ratio</i> . . . . .	53
Figura 37 – Rastreamento do ponto de máxima potência em função da velocidade de rotação do rotor. . . . .	54
Figura 38 – Conversor Buck-Boost Não Inversor simulado em <i>software</i> PSIM. . . . .	57
Figura 39 – Extrapolação da curva de MPPT para velocidades do vento de até 31 m/s. . . . .	58
Figura 40 – Diagrama de controle da técnica PSF em <i>software</i> PSIM. . . . .	58
Figura 41 – Diagrama de controle da técnica PSF com alterações para otimizar o processo em <i>software</i> PSIM. . . . .	60
Figura 42 – Modelo não linear do circuito da bateria. . . . .	61
Figura 43 – Diagrama de fornecimento de potência para carga e bateria. . . . .	61
Figura 44 – Potência gerada em malha aberta. . . . .	64
Figura 45 – Circuito simples de carga e descarga do <i>pack</i> de baterias. . . . .	64
Figura 46 – Simulação de carga e descarga do <i>pack</i> de baterias. . . . .	65
Figura 47 – Resultado de simulação para o circuito em malha fechada. . . . .	66
Figura 48 – Resultado de simulação para o gerenciamento de energia excedente. . . . .	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do gerador Koford 33H412A. . . . .	41
Tabela 2 – Especificações técnicas do retificador trifásico 36MT160. . . . .	42
Tabela 3 – Parâmetros a serem atendidos pelo <i>pack</i> de baterias. . . . .	43
Tabela 4 – Especificações técnicas da bateria de LiFePO4 modelo ANR26650M1B. . . . .	44
Tabela 5 – Especificações técnicas da plataforma Arduino Nano. . . . .	45
Tabela 6 – Principais componentes do microgerador proposto. . . . .	46
Tabela 7 – Valores de potência obtidos em testes de túnel de vento. . . . .	51
Tabela 8 – Valores de coeficiente de potência obtidos em testes de túnel de vento. . . . .	53
Tabela 9 – Tabela de especificações para o conversor Buck-Bost não Inversor. . . . .	55
Tabela 10 – Valores de potência máxima gerada para cada velocidade de rotação do rotor para cada variação da velocidade do vento. . . . .	59
Tabela 11 – Especificações técnicas do ambiente computacional. . . . .	63

## LISTA DE ABREVIATURAS

AWE	<i>Airborne Wind Energy</i>
AWT	<i>Airborne Wind Turbine</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CSV	<i>Comma-Separeted Values</i>
INEP	Instituto de Eletrônica de Potência da UFSC
LabTermo	Laboratório de Ciências Térmicas da UFSC
LMM	Laboratório de Montagem Mecatrônica da UFSC
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
OTSR	<i>Optimal Tip-Speed Ration Control</i>
PLA	Polímero Termoplástico de Ácido Láctico
PO	<i>Pertubation &amp; Observation</i>
PSF	<i>Power Signal Feedback</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UFSCkite	Grupo de Pesquisa em Aerofólios Cabeados para Energia Eólica da UFSC

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v_w$	Velocidade do vento
$\theta$	Ângulo de inclinação das pás
$A$	Área de contato das pás
$P_m$	Potência Mecânica
$C_p$	Coefficiente de Potência
$\rho$	Densidade do Ar
$\omega$	Velocidade de Rotação da Turbina
$P_{mideal}$	Potência Mecânica Ideal Extraída do Vento
$\lambda$	<i>Tip-Speed Ratio</i> (Razão de velocidade na ponta da pá)
$\omega_{opt}$	Velocidade de Rotação Ótima da Turbina
$R_b$	Raio do rotor de um aerogerador
$k_{opt}$	Parâmetro de ajuste para curva de potência
$\eta$	Coefficiente de Eficiência Energética
$P_{eopt}$	Potência Elétrica Ótima
$I_{ref}$	Corrente de referência de controle
$U$	Tensão de referência de controle
$f_{sw}$	Frequência de chaveamento
$D$	<i>Duty Cycle</i> (Ciclo de trabalho de sinal PWM)
$SOC$	<i>State of Charge</i> (Estado de carga da bateria)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	AEROGERADORES COM ASAS CABEADAS	19
<b>1.1.1</b>	<b><i>Pumping Kite</i></b>	<b>21</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Unidade de voo</b>	<b>23</b>
1.2	OBJETIVO DA PESQUISA	24
1.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
<b>2</b>	<b>ENERGIA EÓLICA</b>	<b>27</b>
2.1	FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO EÓLICA	28
2.2	AEROGERADOR	29
<b>2.2.1</b>	<b>Rotor</b>	<b>29</b>
2.3	RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)	32
<b>2.3.1</b>	<b><i>Perturbation &amp; Observation (P&amp;O)</i></b>	<b>33</b>
<b>2.3.2</b>	<b><i>Optimal Tip-Speed Ratio Control (OTSR)</i></b>	<b>35</b>
<b>2.3.3</b>	<b><i>Power Signal Feedback (PSF)</i></b>	<b>36</b>
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
<b>3</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO SISTEMA</b>	<b>39</b>
3.1	MICROGERADOR	39
<b>3.1.1</b>	<b>Rotor</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Gerador</b>	<b>40</b>
3.2	RETIFICADOR	41
3.3	CONVERSOR CC-CC	41
<b>3.3.1</b>	<b>Conversor <i>Buck-Boost</i> Não Inversor</b>	<b>42</b>
3.4	BATERIA	43
3.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	44
3.6	CUSTO DE DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	45
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
<b>4</b>	<b>MODELAGEM E CONTROLE</b>	<b>47</b>
4.1	MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DO MODELO	47
4.2	CURVAS DO MICROGERADOR EÓLICO	50
<b>4.2.1</b>	<b>Potência Gerada</b>	<b>51</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Coeficiente de Potência</b>	<b>52</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Rastreamento de Máxima Potência</b>	<b>53</b>
4.3	CONVERSOR BUCK-BOOST NÃO INVERSOR	54
4.4	PROJETO DO CONTROLADOR MPPT	57
<b>4.4.1</b>	<b>PSF Convencional</b>	<b>57</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Ajuste de Referência para o PSF</b>	<b>60</b>
4.5	BATERIA E LÓGICA DE CARGA/DESCARGA	60

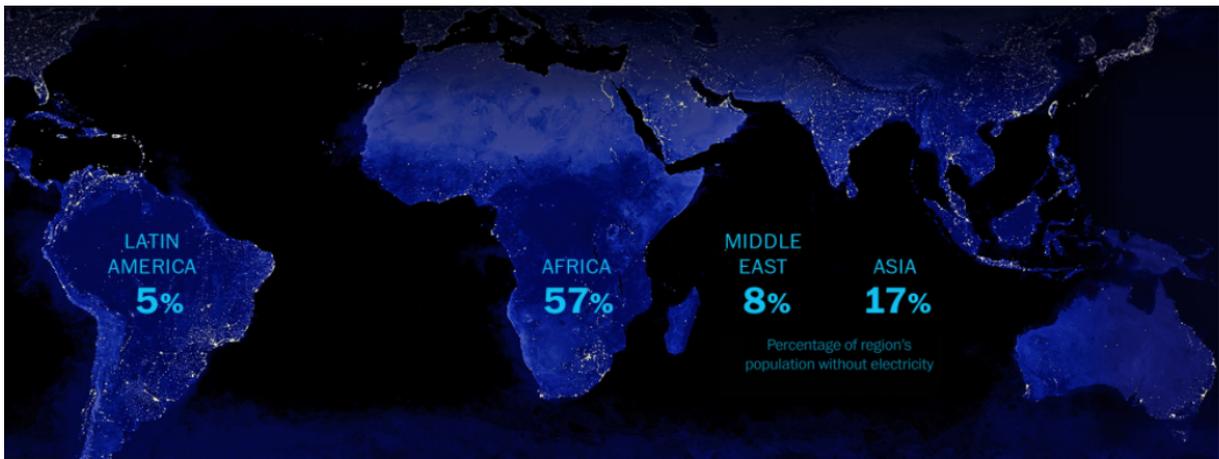
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	61
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>63</b>
5.1	GERAÇÃO EM MALHA ABERTA . . . . .	63
5.2	BATERIA . . . . .	63
5.3	GERAÇÃO EM MALHA FECHADA . . . . .	65
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>70</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	71
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DE LEITURA DE SENSORES PARA LE- VANTAMENTO DE MODELO DA MICROTURBINA EM TESTES DE TÚNEL DE VENTO. . . . .</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE B – PARTE DO CÓDIGO DE GERAÇÃO DA IN- TERFACE GRÁFICA E ARMAZENAMENTO DE DADOS AQUISITADOS PELO MICROCONTRO- LADOR EM TESTES DE TÚNEL DE VENTO. . . . .</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE C – INTERFACE GRÁFICA PARA ACOMPANHA- MENTO DOS ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO. . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE D – CIRCUITO DE GERAÇÃO EM MALHA FECHADA (PSIM). . . . .</b>	<b>84</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A importância do uso de energia na vida do ser humano é evidente, seja elétrica, mecânica, térmica ou qualquer outra disponível no ambiente. Por isso o homem vem manipulando diferentes fontes de geração de energia há milhares de anos para seu bem estar e comodidade. É inimaginável, nos dias de hoje, ter uma vida sem energia elétrica, por exemplo. Mas ainda há locais no mundo que apresentam essa fatídica realidade. Segundo um levantamento realizado por Lindemann (2015), em 2012, 1,3 bilhão de pessoas estava vivendo na escuridão, o que representa cerca de 25% da população de todos os países em desenvolvimento sem acesso à energia elétrica. A Figura 1 apresenta a porcentagem da população de cada região do mundo sem energia.

Figura 1 – Porcentagem das populações de regiões sem acesso à energia.



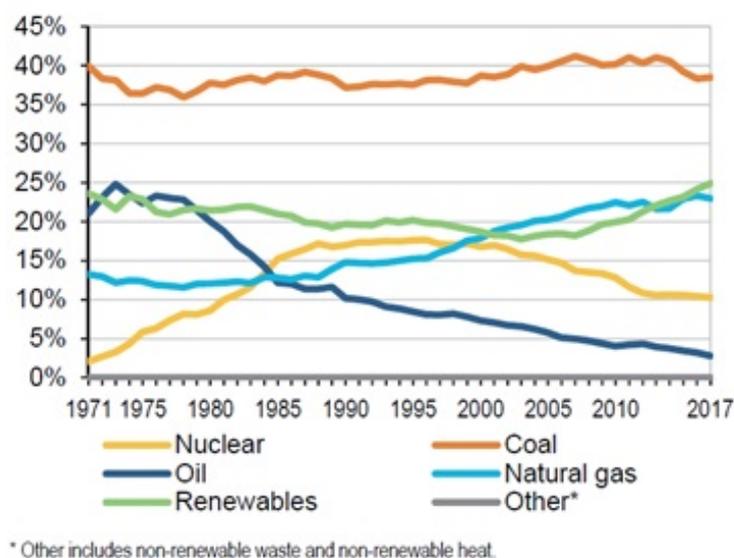
Fonte: Lindemann (2015).

O desafio de suprir a falta de acesso à energia elétrica para toda população mundial tem relação direta com a distribuição de riquezas. Basta observar que a África possui, em sua população, a maior porcentagem de pessoas sem energia, conhecidamente também é o continente mais pobre do globo. O uso de fontes de energia mais baratas e acessíveis se torna fundamental não só para essas localidades, mas também para qualquer outra parte do mundo.

Os combustíveis fósseis continuam sendo a principal fonte de geração de energia elétrica, de acordo com Siqueira (2020). A Figura 2 apresenta a porcentagem de participação de cada fonte na produção de energia elétrica mundial. Apesar dos combustíveis fósseis apresentarem a maior porcentagem de uso, as fontes renováveis vêm crescendo nos últimos anos, criando um cenário em 2020 de aumento de 4% da capacidade energética renovável em relação a 2019. Isso representa uma instalação

de mais de 198 GW de capacidade renovável. Números puxados principalmente pela energia eólica (+8%) e hidrelétrica (+43%) (IEA, 2020).

Figura 2 – Diferentes fontes de geração de energia elétrica.



Fonte: Siqueira (2020).

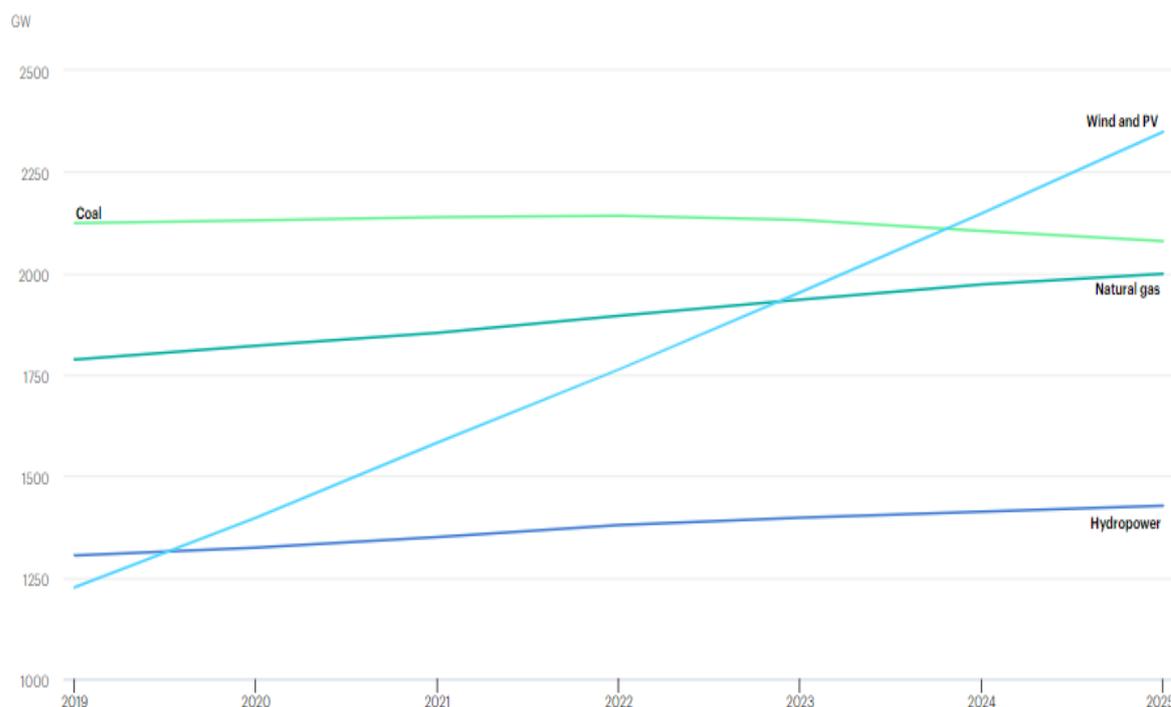
A energia eólica, tema central desta pesquisa, juntamente com a energia fotovoltaica, devem superar, nos próximos anos, a capacidade total de potência instalada do gás natural e do carvão (IEA, 2020). A Figura 3 apresenta as curvas das fontes de energia com uma perspectiva até 2025 de suas capacidades totais de potência instalada.

A crescente procura pela utilização de energias renováveis caracteriza uma forte corrida a favor de processos com menor custo de desenvolvimento e menor impacto frente ao meio ambiente, visando sempre à maximização da produção energética com a possibilidade de abranger um maior número de localidades ao redor do globo. A sintetização dessas características pode ser apresentada pela tecnologia de energia eólica com asas cabeadas, mais conhecida pelo termo em inglês *Airborne Wind Energy* (AWE). Uma série de vantagens podem ser encontradas em sistemas AWE comparados às tradicionais torres de eixo horizontal, como o alcance de uma maior altitude, o que leva a velocidades do vento mais acentuadas, além de um menor custo de instalação e manutenção. Características que impulsionam grupos de pesquisa e empresas a debruçarem sobre o assunto e investirem em seu desenvolvimento.

### 1.1 AEROGERADORES COM ASAS CABEADAS

A tecnologia AWE se baseia no uso de uma série de dispositivos sustentados por forças aerodinâmicas geradas pelo vento sobre dispositivos que transformam parte

Figura 3 – Capacidade total de potência instalada por fonte de energia 2019-2025.

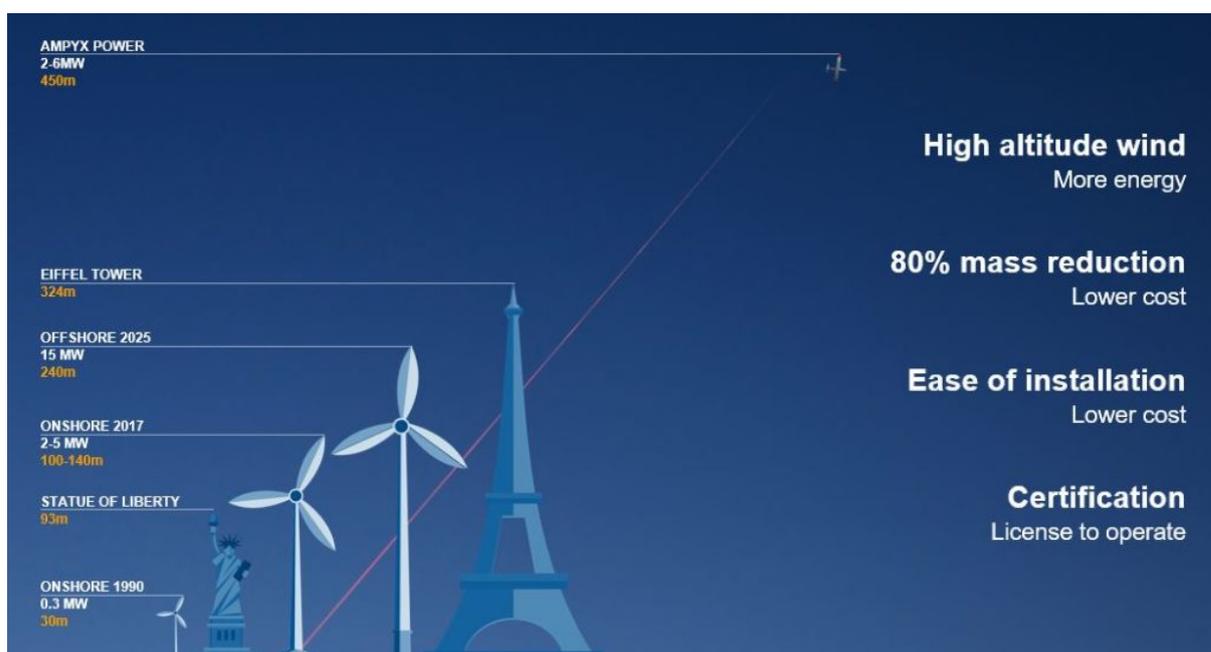


Fonte: IEA (2020).

da energia cinética proveniente do vento em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Há duas principais vantagens dessa tecnologia em relação à energia eólica convencional de turbinas de eixo horizontal: primeiramente, pode-se realizar a substituição da torre por cabo de comprimento variável, permitindo a exploração do vento em altitudes mais elevadas onde ocorre rajadas com maiores velocidades e, como consequência, tem-se um maior potencial energético (CHERUBINI *et al.*, 2015). A segunda vantagem tange à redução nos custos de empreendimento, no que diz respeito ao transporte, custo de materiais e instalação dos dispositivos, uma vez que componentes pesados, como a torre e as pás, são eliminados (OLIVEIRA, 2016). A Figura 4 ilustra uma comparação de características do sistema AWE apresentado por Ampyx (s.d.) em relação às torres eólicas convencionais, além de outros monumentos históricos, como a Torre Eiffel e a Estátua da Liberdade.

Ao redor do mundo há dezenas de grupos dedicados ao desenvolvimento de tecnologia AWE. A Figura 5 apresenta um mapa com empresas e grupos de pesquisa, e suas respectivas localidades, que trabalham diretamente com essa tecnologia. Nos últimos anos a quantidade de instituições envolvidas no desenvolvimento desta tecnologia vem aumentando e cada vez mais investimento é aplicado no ramo. Inicialmente havia apenas uma concepção da ideia, hoje há uma série de grupos de desenvolvi-

Figura 4 – Comparação entre sistemas eólicos.



Fonte: Ampyx (s.d.)

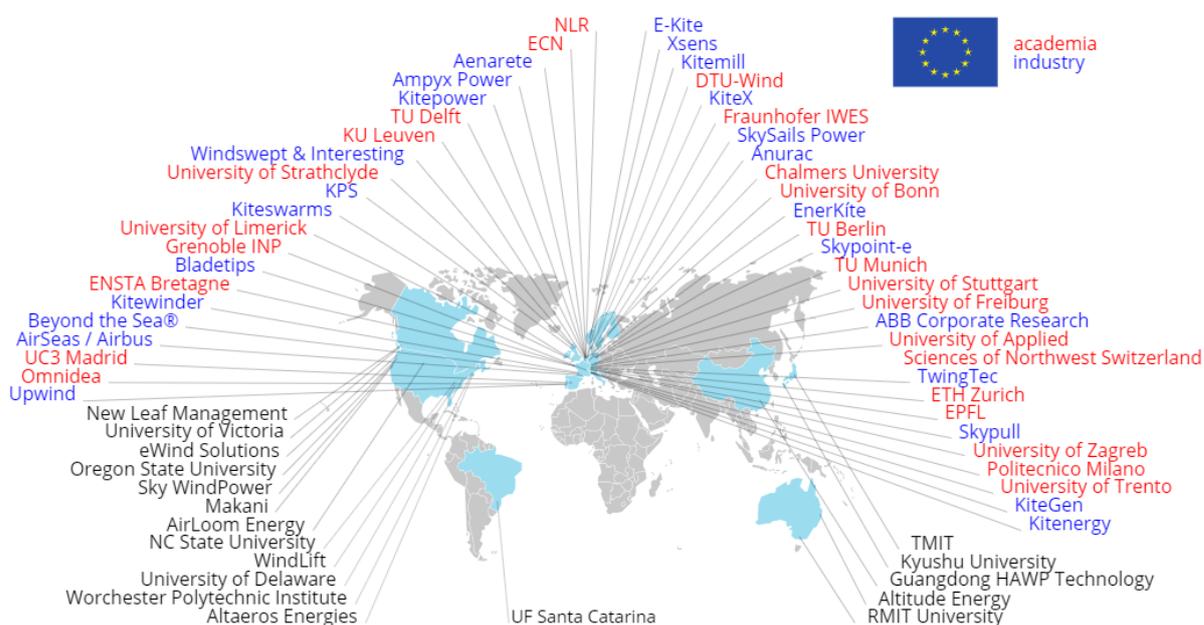
mento com intuito de gerar energia na casa das centenas de quilowatts. Ainda há vários desafios técnicos a serem superados como a captação automática de energia, sensores confiáveis e estimativa de estado (SCHMEHL, 2019).

Neste meio de pesquisa de sistemas AWE está o UFSCkite, criado em 2012 na Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis. Dentre os diversos tipos de configuração para aerogerador AWE, o grupo optou pelo uso do chamado *pumping kite* com asa flexível, assim como é desenvolvido em Salma, Friedl e Schmehl (2019) que busca melhorar a confiabilidade e o nível de segurança de sistemas AWE para geração de energia elétrica.

### 1.1.1 *Pumping Kite*

A configuração de *pumping kite* desenvolvido pelo UFSCkite apresenta uma asa flexível, uma unidade de voo e outra de solo, como ilustrado na Figura 6. Na unidade de solo há um gerador elétrico de 12 kW que se conecta a um carretel com o cabo de tração enrolado. Esse cabo, por sua vez, conecta-se à asa através da unidade de voo, diretamente responsável pelo controle de trajetória. A energia é gerada na unidade de solo ao desenrolar o cabo sob alta tração à medida em que a asa se afasta do gerador. Após gerar energia durante um certo tempo, a asa é recolhida de volta ao ponto de partida e, para isso, utiliza-se um pouco da energia gerada durante o ciclo de geração, finalizando ainda com um saldo positivo energético. A partir daí um novo ciclo pode ser

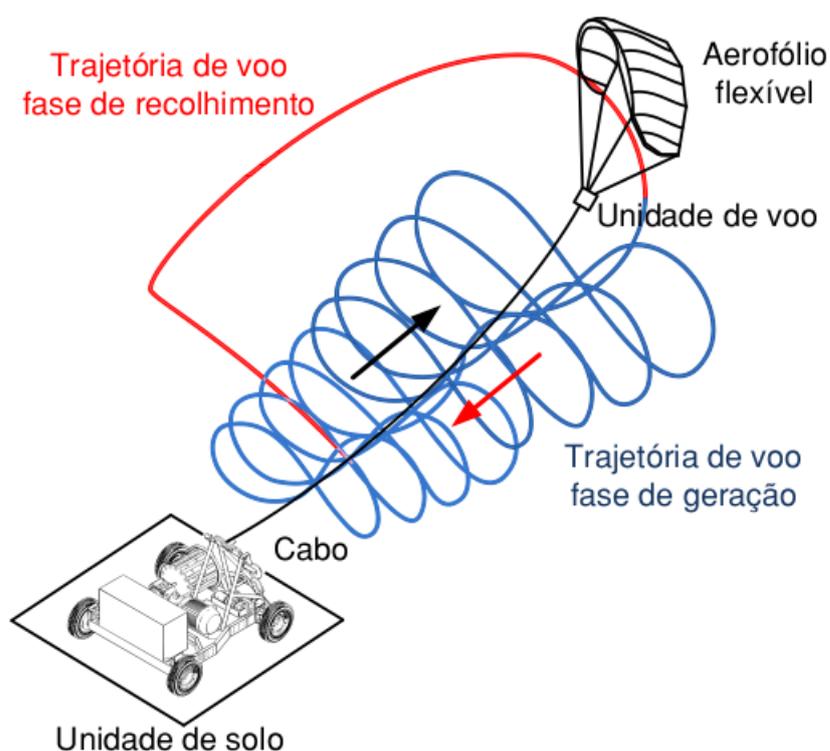
Figura 5 – Grupos de Pesquisa e Empresas que desenvolvem AWE.



Fonte: Schmehl (2019).

iniciado (OLIVEIRA, 2016).

Figura 6 – Sistema AWE do tipo *pumping kite* do grupo UFSCkite.



Fonte: Araujo (2017).

A maximização da potência gerada durante o clique tem relação direta com a otimização da trajetória de voo, de acordo com a pesquisa de Venegas (2017). Para forçar a asa a seguir a trajetória desejada, o controle de voo é caracterizado por um sistema de alavanca diferencial feito por dois cabos conectados à parte traseira da asa, chamado bordo de fuga. Na outra ponta dos cabos são conectados dois servomotores embutidos na unidade de voo.

### 1.1.2 Unidade de voo

A unidade de voo desenvolvida pelo UFSCkite comporta, atualmente, uma plataforma microcontrolada, em conjunto com seus periféricos, para aquisição de dados e controle de ações, um *pack* de baterias com sete células do tipo LiFePO4, além dos já mencionados servomotores conectados aos cabos de comando. A Figura 7 apresenta o projeto em CAD da unidade de voo descrita que deve realizar o controle da trajetória.

Figura 7 – Projeto em CAD da unidade de voo do AWE.

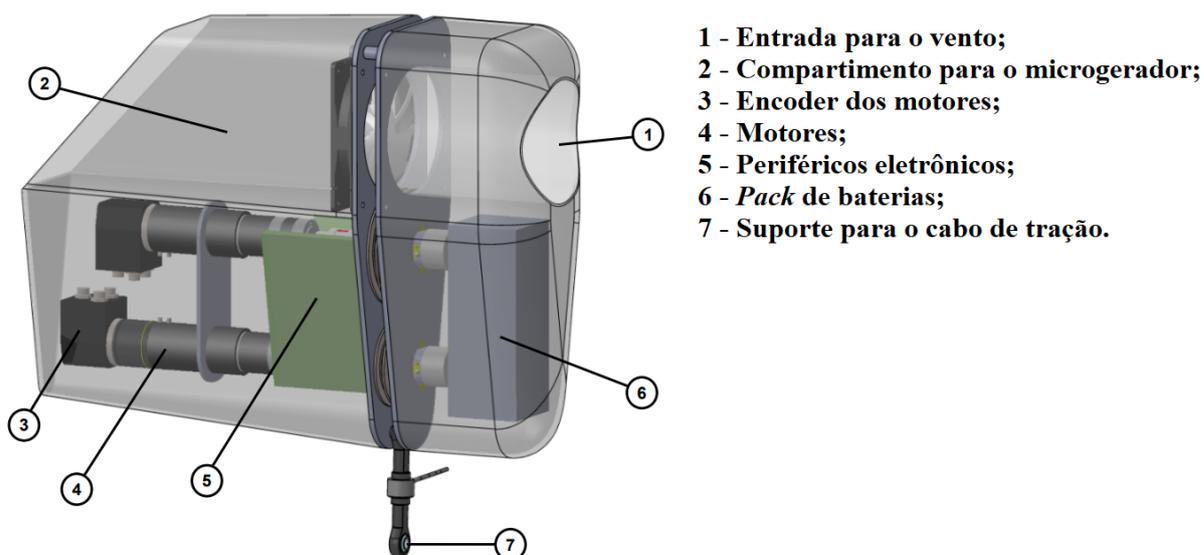


Fonte: Autor.

Nesse esquema, há a necessidade clara de atender a demanda de energia elétrica proveniente de toda a eletrônica embarcada na unidade de voo. Apesar da boa capacidade do *pack* de baterias, a sua autonomia é limitada a algumas horas de operação, o que se torna inviável para uma possível solução comercial que deve operar de forma contínua. Uma das alternativas para esse problema é a utilização de fios para transmissão de energia elétrica acoplados ao cabo de tração que conecta a unidade de solo na unidade de voo do *pumping kite*. Porém, essa solução gera outros dois problemas: torna o cabo de tração mais pesado e grosso, reduzindo a eficiência de geração, além de deixar o cabo mais caro, pois há a necessidade de contatos deslizantes na unidade de solo para que o cabo possa ser enrolado e desenrolado

à medida em que o processo de geração ocorre. Outra possível solução, que foi adotada pelo UFSCkite, é acoplar um microgerador eólico na unidade de voo. Deve-se aproveitar o forte vento aparente em grandes altitudes durante o ciclo de geração para ajudar na alimentação de toda eletrônica embarcada na unidade de voo. A Figura 8 apresenta o projeto em CAD da solução aplicada.

Figura 8 – Projeto em CAD da nova unidade de voo proposta.



Fonte: Adaptado de Roza (2018).

## 1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

No contexto apresentado, este trabalho tem por objetivo desenvolver um microgerador embarcado na unidade de voo de um aerogerador AWE do tipo *pumping kite* capaz de gerar em torno de 60W de potência para velocidades de vento que variam entre 22 m/s e 33 m/s, através do rastreamento de ponto de máxima potência - do inglês *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). A ideia central é aproveitar a energia presente no vento aparente durante o ciclo de geração, convertendo-a em energia elétrica efetiva para uso dos componentes da unidade de voo. Dessa forma, pretende-se alimentar os servomotores, sensores, microcontrolador embarcado e demais periféricos eletrônicos da unidade de voo, além de manter o estado de carga do *pack* de baterias sempre em um nível satisfatório, com isso viabilizando a geração contínua de energia elétrica.

A pesquisa desenvolvida por Salma, Friedl e Schmehl (2019) utiliza uma ideia similar ao proposto neste trabalho, denominada *Airborne Wind Turbine* (AWT), ou uma turbina eólica aérea, em uma tradução livre. Essa mini turbina se encontra também

localizada na unidade de voo do protótipo de Salma, Friedl e Schmehl (2019), reutilizando a energia do vento para alimentar os componentes dessa unidade. Outra pesquisa voltada a sistemas AWE, mas com foco centrado no desenvolvimento de um microgerador, assim como delimitado no presente trabalho, é a de Kieboom (2017) que, além de estruturar um microgerador com testes em túnel de vento, obteve resultados quanto ao nível de ruído produzido pelo mesmo com consequente impacto para a população residencial em solo.

De forma específica, este trabalho buscou atender os seguintes objetivos:

- Projetar um microgerador capaz de gerar cerca de 60 W de potência ao trabalhar com velocidades do vento aparente entre 22 m/s e 33 m/s;
- Projetar um conversor CC-CC do tipo *buck-boost* não inversor como interface entre o microgerador e o circuito de carga;
- Realizar o levantamento do modelo do microgerador através de testes em túnel de vento;
- Projetar um controlador MPPT para controle do sinal de modulação por largura de pulso - do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM) no chaveamento do conversor CC-CC;
- Realizar o gerenciamento do *pack* de baterias, com o intuito de manter seu estado de carga em níveis satisfatórios (cerca de 80%);
- Realizar o controle otimizado de geração de potência para evitar dissipação excessiva de energia sobressalente, isto é, evitar gerar mais energia que o necessário para alimentar a unidade de voo;
- Aplicar simulações com parâmetros identificados na prática para determinar a confiabilidade do sistema.

A principal contribuição desta pesquisa diz respeito a um problema existente na configuração em *pumping kite* para sistemas AWE: a baixa autonomia na geração de energia elétrica pela falta de fornecimento de potência para os elementos presentes na unidade de voo do sistema. Com a aplicação de uma técnica de MPPT adaptada, o microgerador proposto, com auxílio de um *pack* de baterias, deve fornecer a energia necessária para o trabalho ininterrupto do sistema AWE.

### 1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 1 apresentou a parte introdutória desta pesquisa, abordando os principais conceitos da tecnologia de aerogeradores com asas cabeadas, o cenário

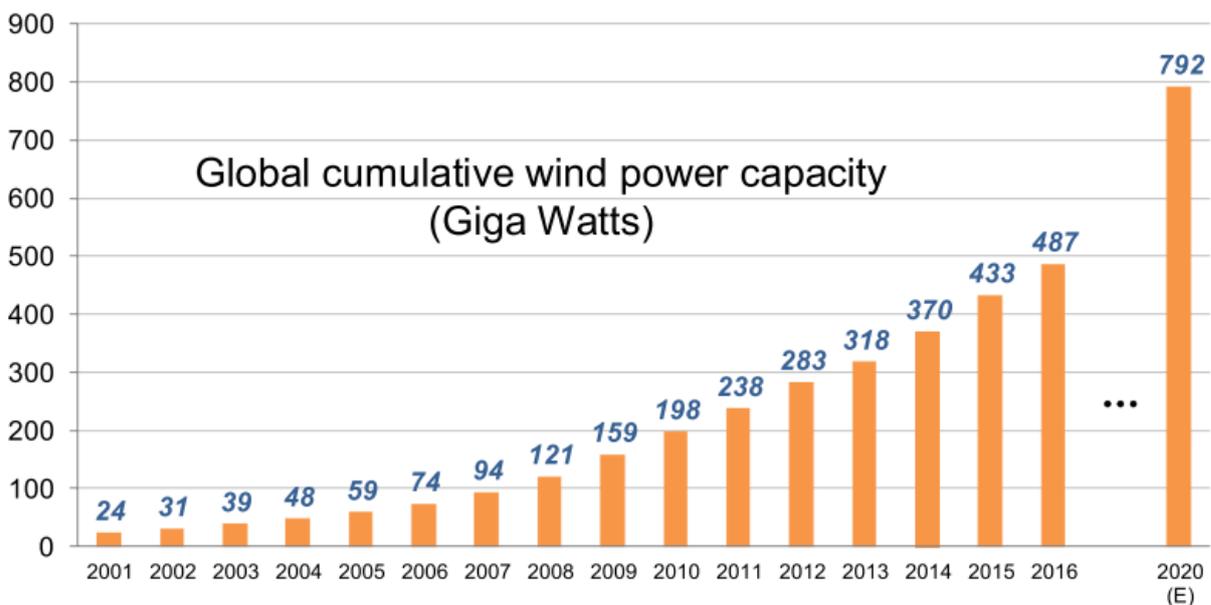
que envolve os sistemas AWE, além de sua configuração de trabalho abordada pelo UFSCkite e a devida aplicabilidade do microgerador eólico projetado. De forma geral, este trabalho está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 tem-se a formulação de conceitos ligados à Energia Eólica, mais especificamente em relação a aspectos teóricos que dizem respeito à geração de energia. São apresentados os principais componentes e conceitos de um sistema clássico de energia eólica. No Capítulo 3 é apresentada a concepção do sistema abordando, de forma específica, os componentes e estrutura definidos para o microgerador proposto. O Capítulo 4 trata da modelagem e controle, apresentando a identificação do sistema em testes de túnel de vento, o projeto do controlador MPPT, além do gerenciamento de bateria e sistema de proteção resistiva. Já no Capítulo 5 se concentram os resultados de simulação tanto em malha aberta, sem controle de dissipação de energia excedente, como em malha fechada, com aplicação de controle da energia excedente. Por fim, o Capítulo 6 contempla a conclusão do trabalho, apresentando a sintetização dos objetivos alcançados, assim como a perspectiva para trabalhos futuros.

## 2 ENERGIA EÓLICA

A energia presente no vento já vem sendo aproveitada há séculos com a aplicação de barcos à vela. Os novos continentes foram explorados a partir do uso dessa tecnologia, sendo um dos únicos meios de movimentação de barcos até James Watt contribuir para o desenvolvimento do motor a vapor no século XVIII (JOHNSON, 2006). De lá para cá, muitas outras formas de aproveitamento do vento vêm surgindo, sendo a principal delas a geração de energia elétrica limpa e renovável com uso de aerogeradores.

A produção de energia a partir da força do vento vem crescendo consideravelmente com o passar dos anos. De acordo com Blaabjerg e Ma (2017), em 2017, a quantidade de potência gerada com sistemas eólicos instalados já passava de 440 GW e, na época, a expectativa para 2020 excedia os 760 GW. A Figura 9 apresenta a capacidade global de geração de energia eólica acumulada. Ainda há alguns passos para que a tecnologia AWE esteja incorporada aos números de produção energética, uma vez que ainda não há uma geração efetiva de energia elétrica com uso de asas cabeadas de forma contínua e comercial. Muito embora o presente trabalho esteja inserido no contexto de AWE, a microturbina a ser embarcada na unidade de voo, foco deste trabalho, é uma turbina eólica clássica, porém com dimensões reduzidas.

Figura 9 – Capacidade global de geração de energia eólica.



Fonte: Blaabjerg e Ma (2017).

A ideia central deste capítulo é apresentar a fundamentação teórica por trás da geração de energia eólica tradicional, além dos componentes principais que compõem um aerogerador e seu sistema de geração, uma vez que este trabalho se baseia em

um sistema de turbina com eixo horizontal para geração de energia a partir do vento. Porém, isso é realizado em escalas muito menores do que as usualmente aplicadas. As torres convencionais trabalham na casa de quilowatts de potência, enquanto o sistema proposto neste trabalho irá trabalhar na casa de algumas dezenas de watts.

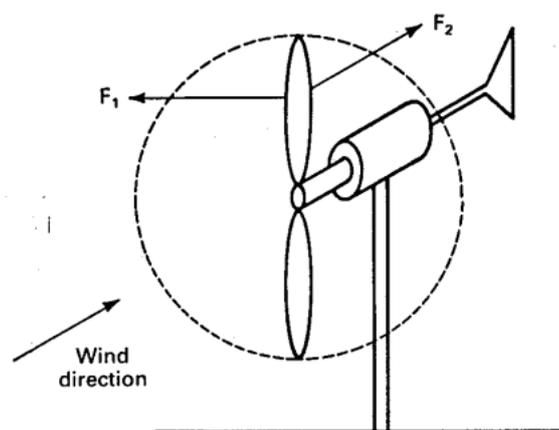
## 2.1 FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO EÓLICA

A geração de energia eólica se baseia na utilização de princípios de mecânica dos fluidos e aerodinâmica. A Figura 10 apresenta o esquema de forças distribuídas ao haver contato do vento com as pás de um aerogerador. As forças  $F_1$  (tangencial) e  $F_2$  (axial) dependem diretamente da velocidade do vento ( $v_w$ ), do ângulo de inclinação ( $\theta$ ) e da área de contato ( $A$ ) das pás (JOHNSON, 2006). A capacidade de extração da energia mecânica ( $P_m$ ) presente no vento depende destes parâmetros e é denominada coeficiente de potência ( $C_p$ ), expressa por

$$P_m = C_p \left( \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \right) = C_p P_w, \quad (1)$$

em que  $P_w$  é a potência que está disponível no vento e  $\rho$  é a densidade do ar. O principal objetivo dos sistemas de geração eólica é maximizar  $C_p$  para a consequente maximização da potência extraída do vento, o que varia em função de  $v_w$ ,  $\theta$  e da velocidade de rotação da turbina ( $\omega$ ).

Figura 10 – Esquema de distribuição de forças em um aerogerador.

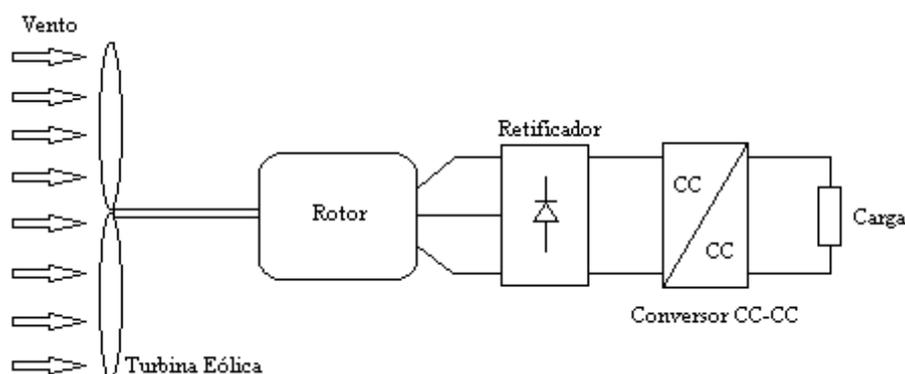


Fonte: Johnson (2006).

Os sistemas de geração possuem algumas variações na construção, mas no geral, após a incidência do vento no rotor do aerogerador e a consequente extração de sua energia mecânica, faz-se necessária realizar a conversão em energia elétrica com o uso de um gerador. Um retificador trifásico converte a forma de onda da potência gerada, assim permitindo alimentar uma determinada carga com a interface de um

conversor CC-CC. A Figura 11 apresenta o esquema básico de sistemas de geração eólica de pequeno porte.

Figura 11 – Esquema básico de sistemas de geração eólica.



Fonte: Autor.

Cada componente presente no esquema será melhor detalhado no Capítulo 3, onde são apresentadas suas características específicas para o microgerador proposto. As próximas seções deste capítulo irão contemplar os tipos de aerogeradores existentes, além das técnicas de MPPT comumente utilizadas.

## 2.2 AEROGERADOR

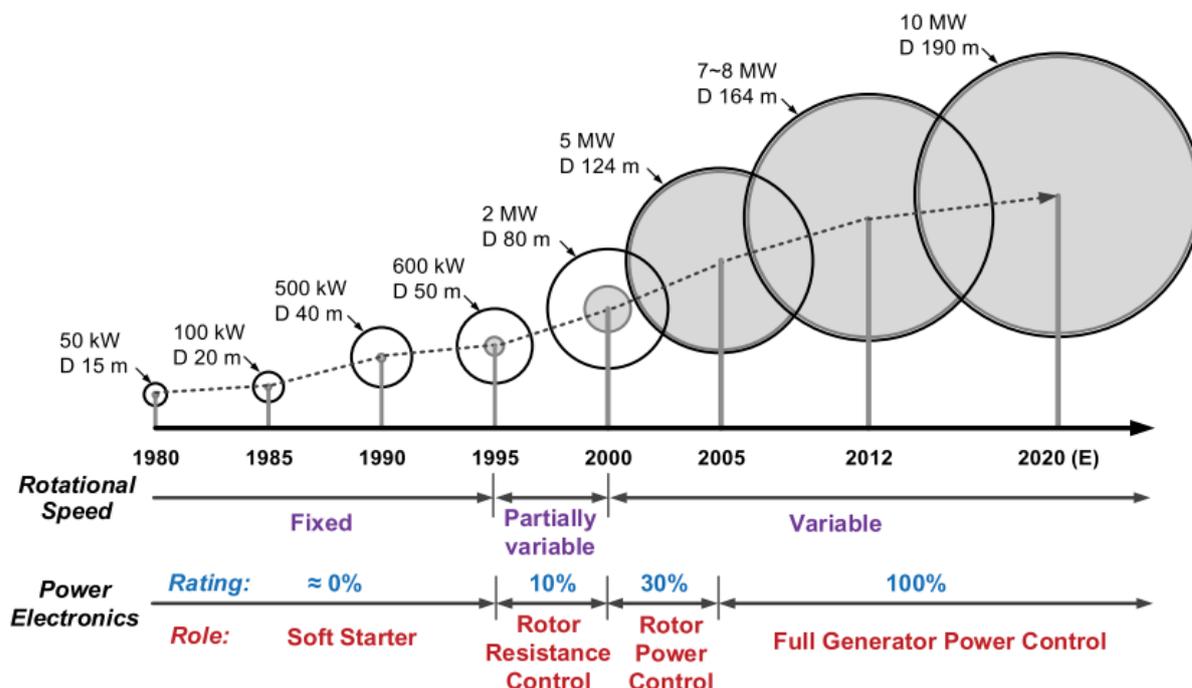
Os primeiros eventos de geração de energia com uso de aerogeradores são datados de 1890, na Dinamarca. Foi utilizada uma turbina de vento com 23 m de diâmetro para produzir eletricidade. Por volta de 1910, já haviam centenas de unidades instaladas operando neste país com uma capacidade entre 5 e 25 kW de potência (JOHNSON, 2006). Essa tecnologia evolui a cada ano, como pode ser visto na Figura 12, que ilustra a evolução das torres eólicas de acordo com o diâmetro das pás e sua capacidade de geração, acompanhada pelo aprimoramento das técnicas de controle.

O aerogerador de um sistema de energia eólica é responsável por extrair a energia do vento e transformá-la em energia elétrica. Ele é composto, principalmente, por uma nacele que tem contato direto com a força do vento, e um rotor responsável pela produção de movimentos de rotação em torno de um eixo onde se acopla a nacele.

### 2.2.1 Rotor

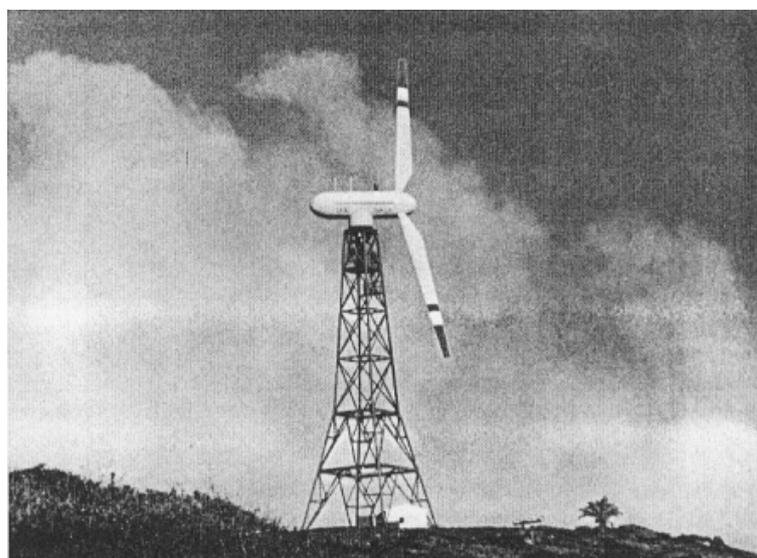
Existem basicamente dois tipos de rotores: com eixo horizontal e eixo vertical. As turbinas eólicas com rotor em eixo horizontal foram as primeiras a serem desenvolvidas e aplicadas no mercado. A Figura 13 apresenta um dos primeiros modelos de turbina eólica com eixo horizontal desenvolvidos no mundo.

Figura 12 – Evolução das turbinas eólicas de 1980 aos dias atuais.



Fonte: Blaabjerg e Ma (2017).

Figura 13 – Modelo precursor de turbina com eixo horizontal.

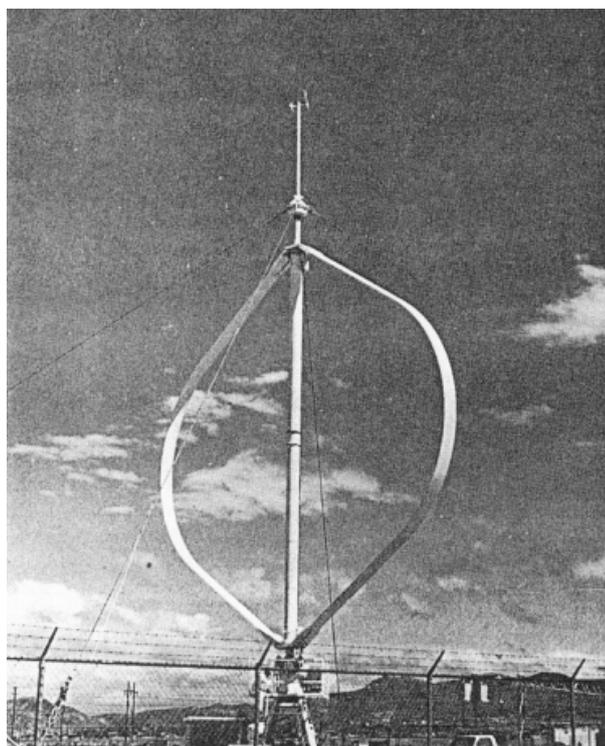


Fonte: Johnson (2006).

Apesar da evolução e criação de novos modelos a partir do apresentado inicialmente para turbinas eólicas, elas concentravam um alto custo de implementação, além do tipo de tecnologia ser limitada, pois as pás deveriam sempre estar orientadas no sentido do vento. Por isso, outros tipos de aplicação foram estudadas com o objetivo de

mitigar esses problemas. Uma das soluções desenvolvidas é a chamada Turbina de Darrieus, representada na Figura 14, que consiste em utilizar um rotor de eixo vertical com pás acopladas de ponta a ponta do eixo, onde seu diâmetro é coincidente com a altura da turbina (JOHNSON, 2006).

Figura 14 – Construção da Turbina de Darrieus com eixo vertical.



Fonte: Johnson (2006).

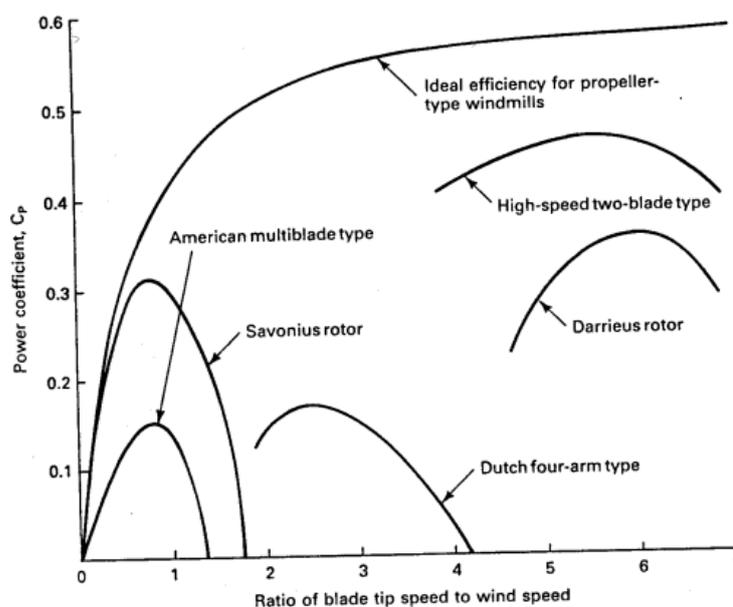
Diferentes tipos de turbinas de eixo vertical foram baseadas neste modelo e melhor desenvolvidas com o passar dos tempos. Apesar de que, hoje, ainda possuem um desempenho inferior em relação às torres de eixo horizontal, como observado na Figura 15. Essa variação de eficiência para diferentes turbinas depende diretamente de seu modelo de construção, número de pás, direção do eixo de rotação e outros aspectos. De acordo com Johnson (2006), no caso de uma turbina ideal com uso de hélices, onde é aplicada uma força do vento contínua na área de contato de suas pás, o método usual para expressar a potência extraída a partir da velocidade do vento se dá por

$$P_{m_{ideal}} = \frac{1}{2}\rho \left( \frac{16}{27}Av_w^3 \right), \quad (2)$$

em que o fator  $16/27 \approx 0,593$  é conhecido por limite de *Betz*. Portanto, a máxima eficiência apresentada por uma turbina eólica, ou seja, sua capacidade de extração da energia presente no vento, é de 59,3%. Essa capacidade de extração tem relação direta com a máxima potência em que um aerogerador consegue produzir, de acordo com

uma dada velocidade do vento. A seção a seguir trata diretamente das técnicas mais comumente utilizadas para que o aerogerador consiga alcançar a máxima potência desejada.

Figura 15 – Eficiência de diferentes turbina eólicas.



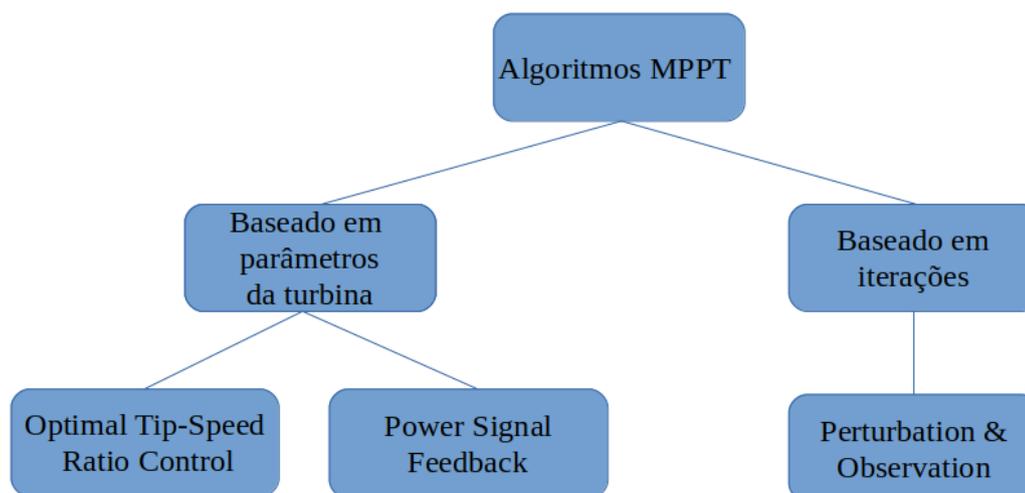
Fonte: Johnson (2006).

### 2.3 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

O algoritmo de MPPT é utilizado para realizar o rastreamento do ponto de máxima potência que um determinado sistema de energia pode fornecer. Como pode ser visto em Caixeta (2011), é realizada a maximização da potência de uma turbina eólica a partir de medidas de tensão e de corrente nos terminais de um retificador trifásico, realizando o controle de velocidade do rotor ao chavear um conversor *boost*. Essa técnica também pode ser vista em Trivedi e Patel (2018), ao ser aplicada em um sistema híbrido eólico-solar, em nível de simulação.

Essa maximização se torna um fator relevante no dimensionamento do aerogerador que deve fornecer potência suficiente, mas não em excesso, na unidade de voo. Há diferentes alternativas de algoritmos MPPT, cada uma com suas características. A Figura 16 ilustra um diagrama com as técnicas de MPPT mais aplicadas em sistemas de energias renováveis, ao passo que as subseções que seguem apresentam cada uma das três técnicas presentes no diagrama.

Figura 16 – Diferentes algoritmos de MPPT.



Fonte: Autor.

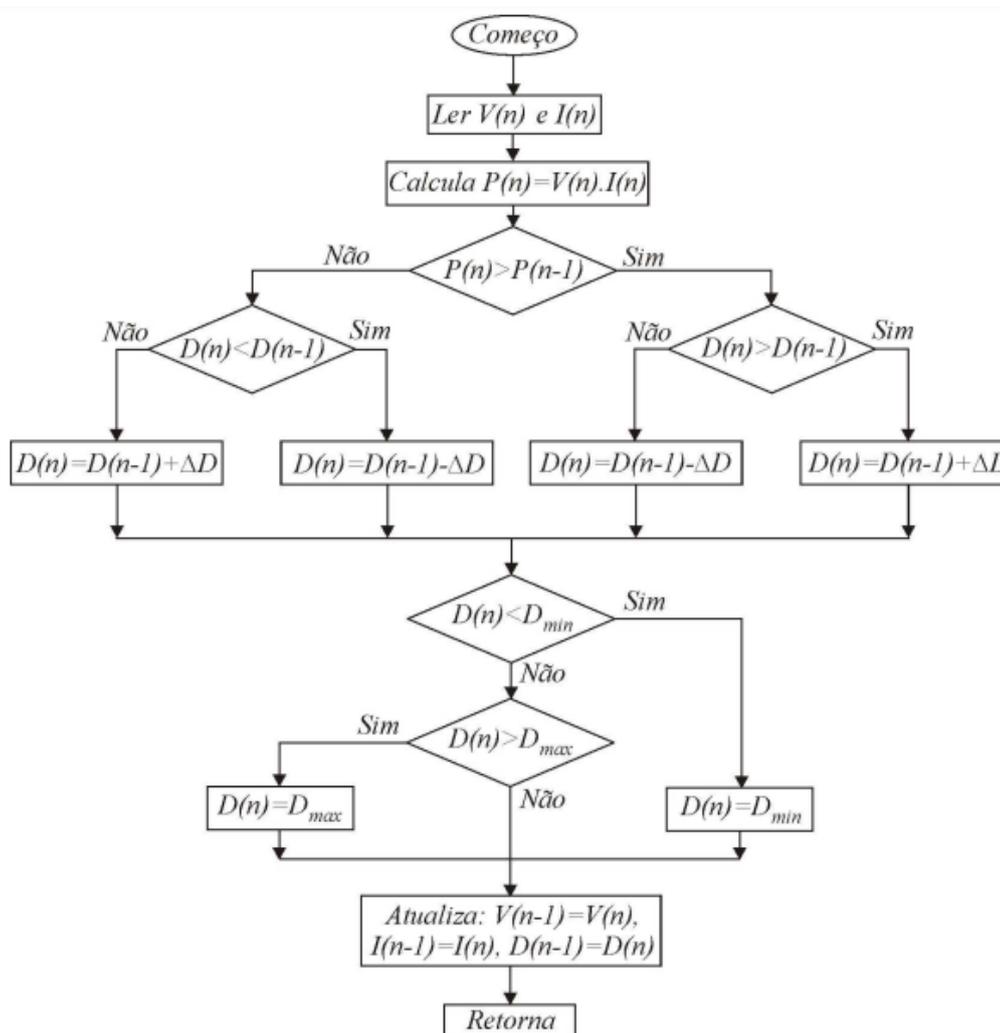
### 2.3.1 *Perturbation & Observation (P&O)*

A primeira técnica a ser abordada é também a mais simples de ser implementada e a mais difundida na literatura. Sua principal vantagem é a não necessidade do levantamento de um modelo do aerogerador para a realização do rastreamento da máxima potência. Em Lahfaoui *et al.* (2016), pode-se observar a implementação da técnica P&O para a otimização da operação de um aerogerador, submetendo-o a testes em túnel de vento. Os resultados mostram que o algoritmo, aplicado na prática ao ser embarcado em uma plataforma Arduino, obteve sucesso ao realizar o rastreamento da máxima potência. A Figura 17 ilustra o fluxograma empregado para o desenvolvimento do algoritmo.

Como pode ser observado na Figura 17 e de acordo com Coelho (2008), neste método são consideradas duas iterações para o rastreamento, cada uma delas operando em uma determinada razão cíclica. Na primeira, temos uma razão cíclica  $D(n-1)$  sendo operada em um determinado conversor CC-CC, seja *buck*, *boost* ou *buck-boost*, assim são lidos os valores de tensão para o cálculo da potência  $P(n-1)$ . Na segunda iteração, uma perturbação é incrementada ou decrementada à razão cíclica, realizando uma nova leitura de corrente, tensão e conseqüente cálculo de uma nova potência  $P(n)$ . Caso  $P(n) > P(n-1)$ , após a perturbação, então o sistema caminha na direção da máxima potência e o sentido dessa perturbação deve ser mantido.

A principal vantagem da técnica P&O é a não necessidade de realizar o levantamento do modelo do sistema para realização do controle. Em contrapartida, como o controle é feito com iterações ao perturbar o sistema e observação de sua resposta, o controle se dá de uma forma um tanto quanto lenta, o que pode inviabilizar sua utilização em sistemas AWE pela existência de variações abruptas na trajetória da asa,

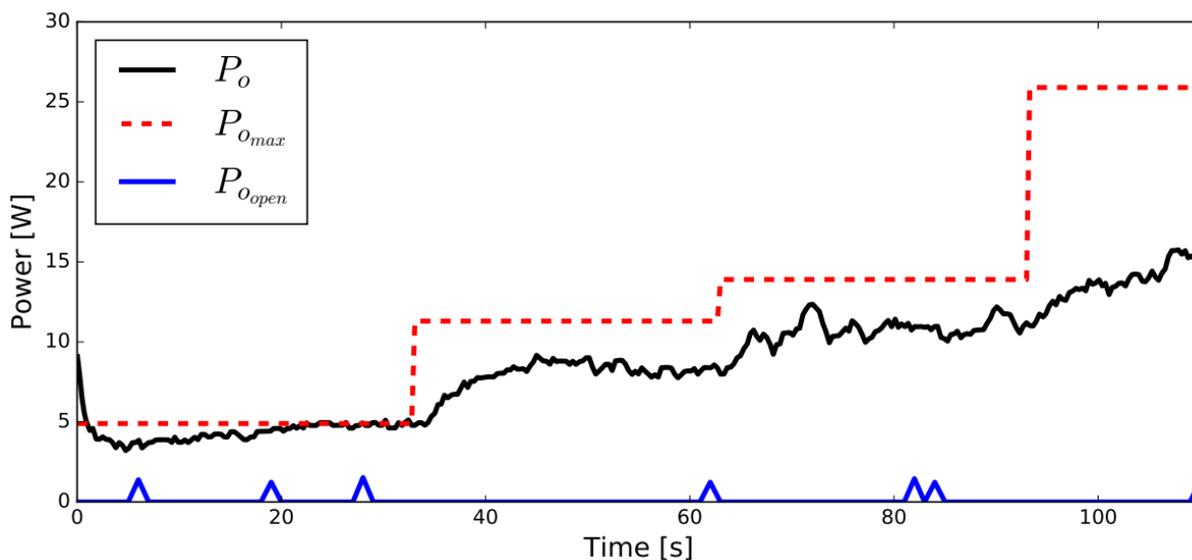
Figura 17 – Fluxograma do Algoritmo PO.



Fonte: Coelho (2008).

além da velocidade do vento em si, exigindo uma rápida resposta de controle. Partindo de um exemplo, (ROZA, 2018) testou o método de P&O como técnica de MPPT em simulações computacionais e em testes de túnel de vento com protótipo. Experimentos realizados com uma carga de bateria de 24 V demonstraram que a técnica P&O pode ser mais adequada para aplicações em que as perturbações atuam de forma mais lenta no sistema, a exemplo da irradiação solar em sistemas fotovoltaicos. Isso se deve ao fato de que, como apresentado na Figura 18, onde apresenta-se o gráfico comparativo entre a potência gerada utilizando a técnica P&O, a potência em malha aberta e a potência máxima esperada a ser gerada, pode-se observar que, passados cerca de dois minutos e após quatro degraus sucessivos na velocidade do vento que era imposta, o sistema deveria fornecer uma potência máxima em torno de 25 W, porém conseguiu-se gerar cerca de 16 W.

Figura 18 – Aplicação de técnica P&amp;O para o rastreamento da máxima potência.



Fonte: Roza (2018).

### 2.3.2 Optimal Tip-Speed Ratio Control (OTSR)

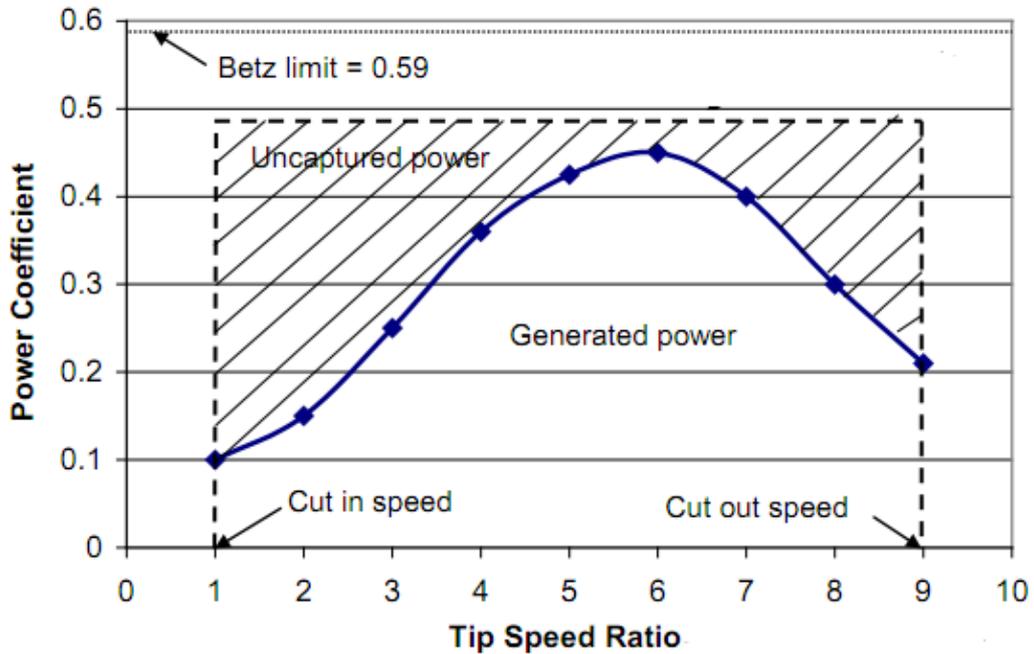
Esta técnica consiste em controlar a velocidade de rotação do gerador a ponto de alcançar a relação ótima entre a velocidade na ponta da pá e a velocidade do vento. Essa relação, chamada de *optimal tip-speed ratio* ( $\lambda_{opt}$ ), pode ser expressa pela Equação 3.

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} \cdot R_b}{v_w} \quad (3)$$

Portanto, além da velocidade de rotação ótima da turbina ( $\omega_{opt}$ ) e a velocidade do vento ( $v_w$ ), o raio do rotor ( $R_b$ ) também gera influência sobre o  $\lambda_{opt}$ . A Figura 19 ilustra a curva de coeficiente de potência em relação ao  $\lambda$  de um sistema teórico de turbinas eólicas presente em Ragheb e Ragheb (2011). A Figura 20 apresenta o método implementado em diagrama de blocos, representando seu controle em malha fechada.

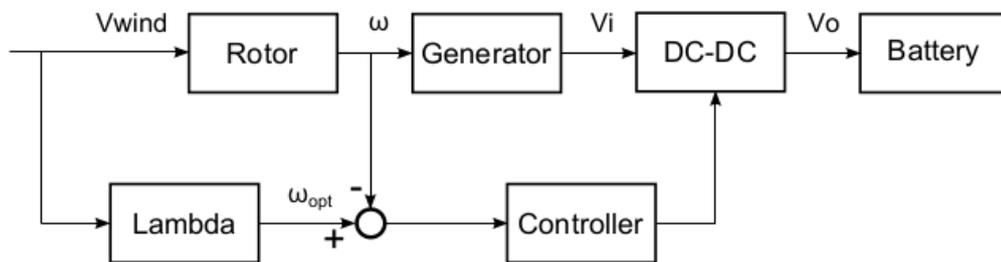
Como principal desvantagem da técnica, há a necessidade de medição da velocidade do vento com o uso de um anemômetro, por exemplo. Algo que se torna inviável de ser aplicado pela dificuldade em realizar a instalação de um sensor desse tipo em pleno voo da asa, além de trabalhar com mudanças bruscas de trajetória durante o voo, o que pode levar a falsas leituras do sensor e, conseqüentemente, problemas no referencial de controle podem surgir.

Figura 19 – Coeficiente de potência vs *Tip-speed ratio*.



Fonte: Adaptado de Ragheb e Ragheb (2011).

Figura 20 – Diagrama de blocos da técnica OTSR.



Fonte: Roza (2018).

### 2.3.3 Power Signal Feedback (PSF)

A terceira técnica de rastreamento de máxima potência abordada por esta pesquisa, assim como a OTSR, depende da identificação do modelo do aerogerador, porém o sensoriamento se torna mais simples, exigindo apenas a leitura de corrente e tensão na saída do retificador, onde sensores podem ser facilmente instalados no circuito. Além disso, deve haver o sensoriamento da velocidade de rotação do rotor, o que pode ser feito através do *encoder* já acoplado ao gerador utilizado, a ser especificado no Capítulo 3.

O princípio desse método se baseia na leitura da velocidade de rotação da

turbina para determinar a potência mecânica ótima, de acordo com a equação

$$P_{m_{opt}} = k_{opt} \omega^3, \quad (4)$$

em que  $k_{opt}$  representa um parâmetro a ser ajustado através de identificação do modelo do sistema, e  $\omega$  é a velocidade de rotação da turbina. Considerando a eficiência  $\eta$ , temos que a potência elétrica ótima é dada por

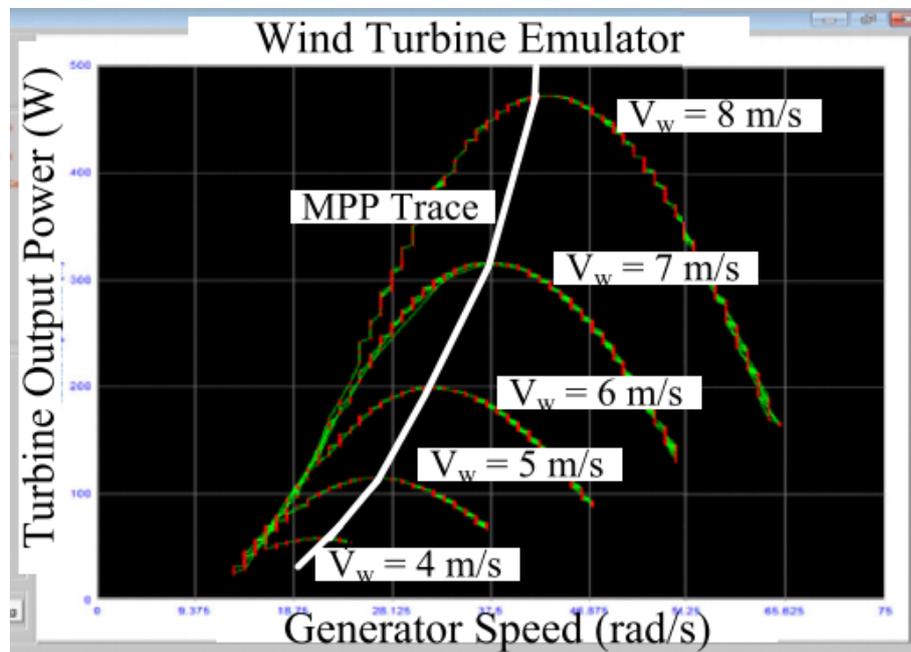
$$P_{e_{opt}} = \eta P_{m_{opt}} = \eta k_{opt} \omega^3, \quad (5)$$

permitindo-se o cálculo de uma corrente de referência para o controle de potência

$$I_{ref} = \frac{P_{e_{opt}}}{U}. \quad (6)$$

Este valor de referência é utilizado em uma malha de controle de corrente para o rastreamento do ponto de máxima potência do aerogerador. A função  $P_{e_{opt}}(W)$  corresponde à ligação dos pontos de máximo em curvas de potência para diferentes valores de  $v_w$ , assim como é mostrado em Hussain e Mishra (2016), com base na Figura 21. O gráfico apresentado foi criado a partir de simulações.

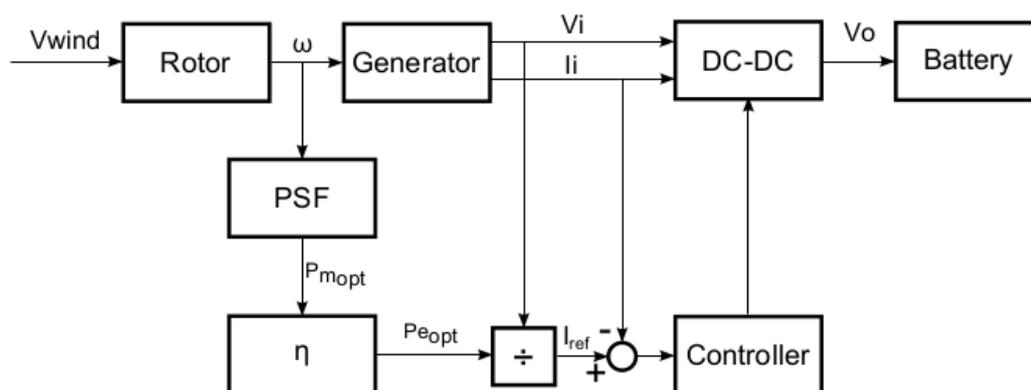
Figura 21 – Curva MPPT em função de curvas de potência.



Fonte: Hussain e Mishra (2016).

O diagrama de blocos na Figura 22 apresenta a técnica de controle PSF já em malha fechada com a incorporação, à saída do sistema, de uma bateria. Um ponto importante para o controle é a consideração das perdas elétricas ( $\eta$ ) ao converter a potência mecânica presente no vento em potência elétrica.

Figura 22 – Diagrama de blocos da técnica PSF.



Fonte: Roza (2018).

Em função dos dados levantados para cada técnica de rastreamento de máxima potência, e considerando suas devidas vantagens e desvantagens, neste projeto será adotada a técnica PSF, pela sua eficácia, exigindo parâmetros de controle e sensoriamento simples, além do baixo custo de implementação.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fundamentação teórica por trás da geração de energia eólica foi o foco do Capítulo 2. Apesar deste trabalho ser aplicado em sistemas de aerogeradores com asas cabeadas, o microgerador proposto é do tipo tradicional, com rotor horizontal, e trabalha sob a ação do vento com a movimentação de suas pás e consequente geração de energia a partir de um gerador elétrico. Deste modo, as técnicas para energia eólica tradicional são aplicadas, porém em escalas menores ao habitual.

Assim como a teoria matemática de energia eólica, as técnicas de controle para o rastreamento de máxima potência mais comumente aplicadas em sistemas de energias renováveis foram apresentadas. Tanto P&O, assim como OTSR e PSF possuem suas devidas vantagens e desvantagens. No entanto, pode-se observar que a técnica de PSF se encaixa melhor à aplicação visada por este trabalho.

A teoria de energia eólica apresentada neste capítulo, além da escolha para implementação da técnica PSF, assumem um ponto fundamental para o capítulo seguinte, que trata diretamente da composição do protótipo de microgeração eólica para aplicação em sistemas AWE, detalhando os aspectos principais para os componentes do microgerador.

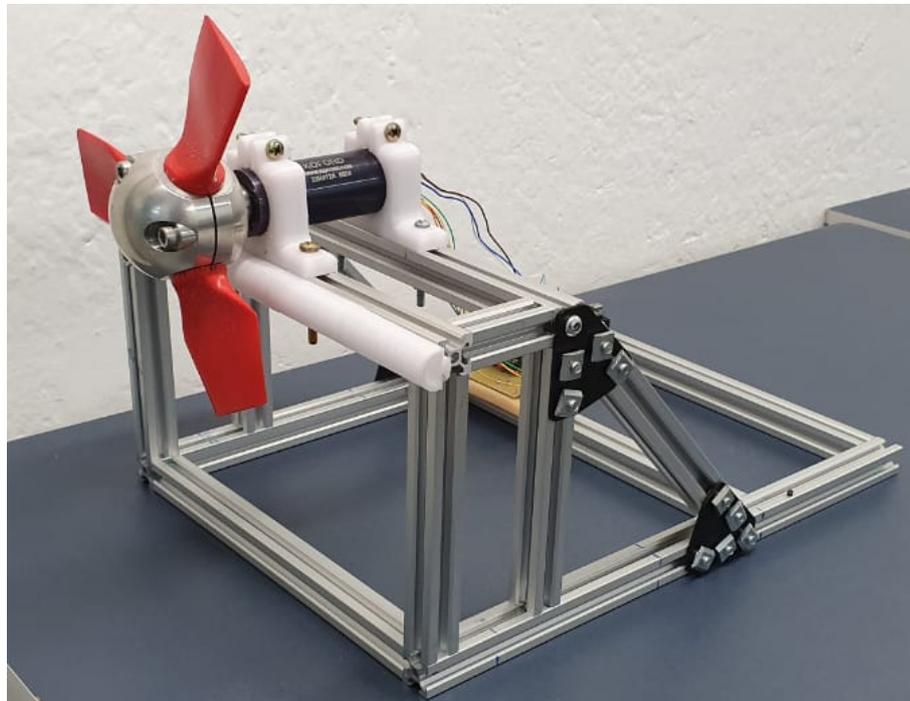
### 3 COMPOSIÇÃO DO SISTEMA

A pesquisa prevê o desenvolvimento de um protótipo para geração de eletricidade por meio de uma microturbina eólica de eixo horizontal, a ser acoplada na parte superior da unidade de voo de um sistema AWE. Em condições nominais de operação do aerogerador, essa turbina deve ser capaz de gerar, aproximadamente, 60 W de potência, o que corresponde à estimativa da potência elétrica média consumida pelo circuito eletrônico contido na unidade de voo. Este capítulo apresenta os componentes principais do microgerador proposto como solução nesta pesquisa. São abordados, além do microturbina em si, a composição de sua nacele e gerador, além dos componentes: retificador, conversor CC-CC, pack de baterias e o sistema de aquisição de dados.

#### 3.1 MICROGERADOR

O microgerador proposto é do tipo turbina de eixo horizontal de três pás, que deve ser embarcado na unidade de voo do sistema AWE desenvolvido no UFSCkite. A Figura 23 apresenta o protótipo desenvolvido para testes em túnel de vento com uma estrutura de suporte em perfil de alumínio.

Figura 23 – Protótipo do Microgerador com estrutura de testes.



Fonte: Autor.

Ao ser instalado no sistema AWE, a estrutura de alumínio deve ser retirada para redução de peso e o microgerador deve ser instalado conforme Figura 8. Os

subtópicos a seguir relatam os principais componentes da microturbina desenvolvida nesta pesquisa: rotor e gerador.

### 3.1.1 Rotor

O rotor utilizado é do tipo eixo horizontal e possui 18 cm de diâmetro (conjunto nacele e pás). A nacele é composta de aço e possui três encaixes equidistantes para as pás, produzidas em Polímero Termoplástico de Ácido Láctico (PLA) (material utilizado para impressão 3D). O rotor é acoplado ao eixo do gerador para transmissão da rotação resultante a partir da força do vento aplicada ao ter contato com as pás. Uma segunda versão da nacele em material plástico foi considerada para redução de peso. A Figura 24 ilustra o novo modelo para a nacele.

Figura 24 – Novo modelo para a nacele.



Fonte: Autor.

Este novo modelo para a nacele deve ser utilizado no microgerador quando o mesmo for embarcado na unidade de voo, possuindo as mesmas dimensões e mesmos encaixes que sua versão em aço. A consideração da redução de peso se deve, principalmente, pela necessidade de uma unidade de voo leve, o que contribui na eficiência da geração de energia durante a trajetória em *pumping kite*.

### 3.1.2 Gerador

O gerador utilizado, cujo eixo deve ser acoplado ao rotor descrito anteriormente, é do tipo AC de ímãs permanentes com 425 W de potência nominal, 48 V de tensão nominal e velocidade máxima de rotação de 19.756 rpm. Esse gerador, que já possui um *encoder* óptico de 1024 pulsos por revolução, foi escolhido com base na estimativa

de consumo de potência com picos de 60W, com uma ampla margem de segurança. A Figura 25 apresenta o modelo de gerador utilizado no sistema.

Figura 25 – Modelo do gerador Koford 33H412A.



Fonte: ENGINEERING (2020).

A partir da rotação de seu eixo, a energia mecânica presente no vento é extraída (parcialmente) e transformada em energia elétrica, com saída de corrente alternada em seus terminais. A partir daí, um estágio de retificação é realizado para uso da potência gerada na carga pretendida. A Tabela 1 apresenta as especificações técnicas do gerador utilizado.

Tabela 1 – Especificações técnicas do gerador Koford 33H412A.

Potência Nominal	425 W
Velocidade de rotação sem carga	19.756 rpm
Resistência de enrolamento	0,285 $\Omega$
Eficiência máxima	94%
Indutância de enrolamento	0,11 H
Encoder óptico	1024 pulsos por resolução

Fonte: Adaptado de ENGINEERING (2020).

## 3.2 RETIFICADOR

Como citado anteriormente, após o estágio de transformação de energia mecânica em energia elétrica, tem-se corrente alternada nos terminais do gerador. E, para alimentar a carga da unidade de voo (bateria e eletrônica embarcada), o sistema deve passar por um estágio de retificação da corrente alternada. Para tal processo é utilizada a ponte retificadora trifásica modelo 36MT160, cuja representação pode ser vista na Figura 26, ao ponto que a Tabela 2 apresenta as especificações técnicas do componente.

## 3.3 CONVERSOR CC-CC

Após a retificação da corrente, o sistema passa por um estágio de conversão CC-CC, alterando a amplitude de corrente e/ou tensão contínuas para o nível desejado

Figura 26 – Modelo de ponte retificadora trifásica 36MT160.



Fonte: Semiconductors (2019).

Tabela 2 – Especificações técnicas do retificador trifásico 36MT160.

Corrente máxima de saída	35 A
Tensão máxima reversa	1600 V
Temperatura de trabalho	-55 a +150 °C
Corrente máxima reversa	100 $\mu$ A%

Fonte: Adaptado Semiconductors (2019).

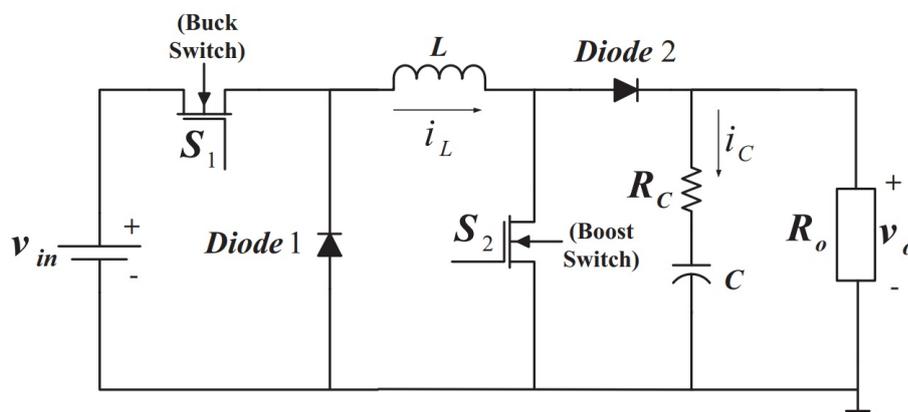
ao alimentar a carga. Nesse estágio, o circuito de controle MPPT atua para gerar a potência otimizada para o sistema. Existe uma série de conversores CC-CC presentes na literatura. Este trabalho optou por utilizar o conversor *buck-boost* não inversor, uma vez que o mesmo pode trabalhar tanto como elevador, assim como abaixador, dependendo da demanda de potência exigida pela carga ou do nível de potência gerada pela micro turbina. Além disso, a topologia não inversora é aplicada, uma vez que o circuito *buck-boost* tradicional apresenta uma saída com sinal invertido ao da entrada.

### 3.3.1 Conversor *Buck-Boost* Não Inversor

O circuito conversor *buck-boost* não inversor apresenta a propriedade de chaveamento com sinal PWM para trabalhar como elevador ou abaixador. O modo em que o mesmo trabalha irá depender diretamente da demanda da carga e da geração da turbina. A Figura 27 apresenta o circuito do conversor utilizado na pesquisa.

Nesse circuito, realize-se a combinação de um conversor *buck* e um conversor *boost* com uso de duas chaves ( $S_1$  e  $S_2$ ), além de um indutor (L) e um capacitor (C). Esse conversor é capaz de operar em três modos diferentes: *buck*, onde  $S_1$  é chaveada por um período e  $S_2$  fica aberta; *boost*, onde  $S_2$  é chaveada por um período e  $S_1$  per-

Figura 27 – Circuito conversor Buck-Boost Não Inversor.



Fonte: Almasi *et al.* (2017).

manece fechada: *buck-boost*, onde ambas,  $S_1$  e  $S_2$ , são chaveadas simultaneamente (ALMASI *et al.*, 2017).

### 3.4 BATERIA

A utilização de baterias como forma de *backup* é fundamental para o sistema, uma vez que, como a geração de energia da microturbina depende diretamente do vento, podem ocorrer situações (baixa incidência de vento) em que a potência gerada não seja suficiente para alimentar toda a carga presente na unidade de voo do sistema. Para isso, um *pack* de baterias do tipo LiFePO4 é utilizado, com o intuito de suprir a demanda excedente em eventuais ocasiões de baixa produção energética por parte do microgerador. As baterias precisam atender às especificações dos eletrônicos embarcados na unidade de voo. A Tabela 3 apresenta esses parâmetros a serem seguidos, cujos valores são baseados em Faulhaber Drive Systems (2013) que indica as especificações técnicas dos servomotores utilizados para controle de voo da asa.

Tabela 3 – Parâmetros a serem atendidos pelo *pack* de baterias.

Tensão de alimentação	24 V
Capacidade de carga	2,5 Ah
Corrente mínima de operação	2,5 A

Fonte: Adaptado de Faulhaber Drive Systems (2013).

Como a tensão de alimentação deve ser de 24 V, optou-se por utilizar 7 baterias do modelo ANR26650M1B em série, onde cada bateria de lítio possui 3,3 V de tensão nominal e 3,6 V de tensão máxima, totalizando 25,2 V para o *pack*. A Tabela 4

apresenta suas especificações técnicas e sua representação pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 – Bateria de LiFePO4 modelo ANR26650M1B.



Fonte: A123 Systems (2012).

Tabela 4 – Especificações técnicas da bateria de LiFePO4 modelo ANR26650M1B.

Tensão nominal	3,3 V
Tensão máxima	3,6 V
Massa de uma célula	76 g
Capacidade da carga nominal	2.5 Ah
Impedância interna	6 m $\Omega$

Fonte: Adaptado de A123 Systems (2012).

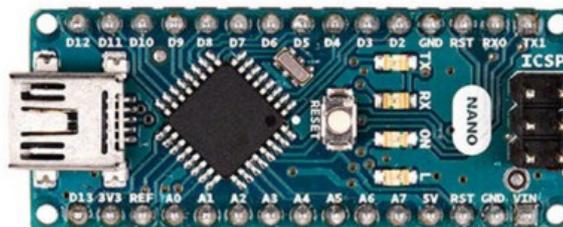
### 3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a realização da leitura de sensores e processamento dos dados pertinentes ao sistema de microgeração eólica, faz-se necessária a utilização de um microcontrolador capaz de realizar essas atividades. Optou-se por utilizar um microcontrolador de 8 bits da arquitetura AVR, pela simplicidade, baixo custo e que atende aos requisitos para processamento de todos os dados. Nesse caso, escolheu-se a plataforma Arduino Nano para utilização prévia no protótipo, uma vez que o componente já se fazia presente nas instalações do laboratório UFSCkite.

A plataforma Arduino Nano possui um microcontrolador da família AVR, modelo ATmega328 e é utilizado, nesta pesquisa, para realização de leitura de sensores e aquisição dos dados para controle do sistema. A Figura 29 apresenta o modelo de plataforma microcontrolada utilizada na pesquisa e a Tabela 5 contém suas principais características.

Em um primeiro estágio, para levantamento das curvas de potência em malha aberta, o sensoriamento se baseia na utilização de um encoder, presente no gerador

Figura 29 – Plataforma Arduino Nano com microcontrolador ATmega328.



Fonte: Arduino (2021).

Tabela 5 – Especificações técnicas da plataforma Arduino Nano.

Microcontrolador	ATmega328
Arquitetura	AVR
Tensão de operação	5 V
Memória Flash	32 kB
Memória RAM	2 kB
Velocidade de clock	16 MHz
Pinos digitais de I/O	22 (6 com PWM)

Fonte: Adaptado de Arduino (2021).

Koford, além de um sensor de corrente e de um sensor de tensão, ambos instalados na saída do circuito retificador. O ATmega328 realiza a leitura dos sinais gerados pelos sensores através de pinos específicos de I/O (entrada e saída). Cada leitura é processada para identificação do modelo do sistema. Essa identificação é apresentada com mais detalhes no Capítulo 4 deste documento.

### 3.6 CUSTO DE DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

De forma geral, foi realizado um levantamento do custo dos principais componentes que fazem parte do microgerador eólico proposto nesta pesquisa, com o intuito de compor o empreendimento total do sistema AWE desenvolvido pelo UFSCkite. A Tabela 6 apresenta os principais componentes, em conjunto com suas especificações e custos de mercado.

Todos os valores apresentados são expressos em dólares, a partir de uma pesquisa realizada em Julho de 2020 de acordo com uma média de preços encontrados no mercado internacional. Convém destacar que, em um cenário de comercialização desta tecnologia, espera-se que os custos sejam reduzidos, em particular os da nacele e do próprio gerador, devido, por exemplo, à alteração do material de composição da nacele, já citado neste documento.

Vale destacar que cerca de 60% do valor total de custo dos componentes é

Tabela 6 – Principais componentes do microgerador proposto.

<b>Componente</b>	<b>Especificação</b>	<b>Preço (US\$)</b>
Placa de Aquisição	Arduino Nano	20,00
Sensor de corrente	ACS712-5A	1,00
Sensor de tensão	Resistivo - 0 a 25Vcc	0,79
Ponte retificadora	Trifásica - 36MT160	13,28
Conversor DC-DC	<i>Buck-boost</i>	3,48
Gerador com encoder	Koford 33H412A	658,00
Bateria de lítio	ANR26650M1B	11,12 x 7
Pá da hélice	PLA - sob medida	35,00 x 3
Nacelle	Aço - sob medida	200,00
	<b>Total</b>	<b>US\$ 1.079,39</b>

Fonte: Autor.

representado pelo gerador, uma vez que o mesmo foi dimensionado com potência nominal acima do especificado para projeto, mas que se encaixa no parâmetro de velocidade de rotação. Enquanto outros modelos pesquisados não atingiam uma alta rotação, fator este fundamental, devido às altas velocidades do vento submetidas ao sistema.

### 3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 3 abordou, de forma específica, os principais componentes do microgerador eólico proposto nesta pesquisa: rotor de eixo horizontal com nacelle para encaixe das pás produzidas em PLA; gerador do tipo AC de ímãs permanentes com 425 W de potência nominal; ponte retificadora trifásica para realizar a conversão AC-CC; conversor CC-CC do tipo *buck-boost* não inversor; pack de baterias de lítio, com tensão máxima de 25,2 V; plataforma arduino nano para realização de leitura de sensores e aquisição dos dados. Além das especificações técnicas dos componentes, o capítulo apresenta uma tabela com custo médio encontrado no mercado internacional.

Com a especificação detalhada dos componentes que fazem parte do microgerador eólico, o Capítulo 4 aborda a modelagem e controle do sistema como um todo, aplicando-se a integração destes componentes. A identificação do modelo a partir de testes em túnel de vento de forma controlada, além do projeto do controlador de rastreamento de máxima potência serão discutidos com base nas características apresentadas anteriormente.

## 4 MODELAGEM E CONTROLE

Este capítulo trata de toda modelagem do sistema de microgeração eólica, abordando o método utilizado para identificação do modelo da microturbina, a apresentação das curvas de potência geradas a partir da identificação, além do projeto do microcontrolador com base na técnica de PSF para rastreamento da máxima potência e da lógica de gerenciamento da bateria.

### 4.1 MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DO MODELO

Como citado no tópico referente a algoritmos de MPPT, mais especificamente no subtópico que aborda a técnica de PSF, é necessário realizar a identificação do modelo (levantamento de suas curvas de potência), para caracterizar o controle de potência do microgerador. O levantamento de tal modelo requer medições sob condições satisfatórias, como a planicidade do local onde um aerogerador está estruturado, além de um baixo nível de turbulência no vento gerado (PAPADOPOULOS, 2018).

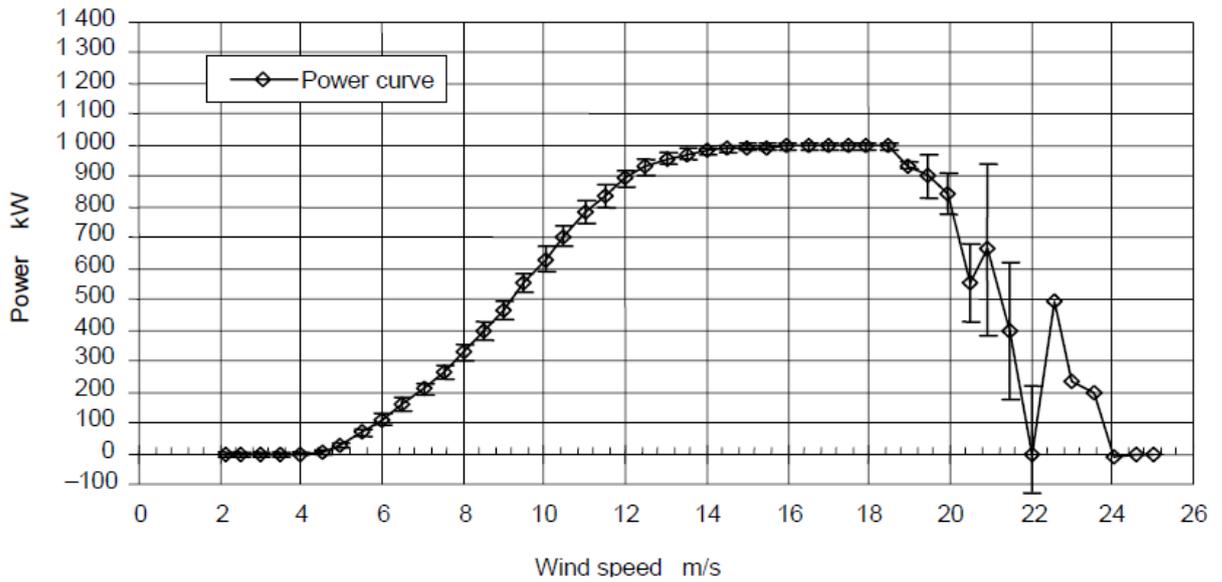
Como exemplo de levantamento de curvas, a Figura 30 apresenta a curva de potência de um determinado aerogerador. O levantamento das curvas de potência é padronizado pela IEC (2005), que estabelece a medição do desempenho de turbinas eólicas. Um exemplo presente na literatura, em relação ao levantamento da curva de potência de aerogeradores, pode ser encontrado em Quintas *et al.* (2017), cuja pesquisa submeteu um microgerador a testes em túnel de vento com velocidades de até 12 m/s, gerando aproximadamente 60 W de potência. O objetivo principal da pesquisa citada foi realizar o levantamento da curva de potência do microgerador desenvolvido a partir da variação da velocidade do vento com uso de túnel de vento em laboratório.

A partir da potência gerada, é possível calcular o coeficiente de potência ao longo da curva, uma vez que se conhece a velocidade do vento. A Figura 31 apresenta, como exemplo, a curva de  $C_p$  correspondente ao aerogerador da curva apresentada na Figura 30.

Testes em túnel de vento foram realizados com a composição de um circuito mínimo representado pela Figura 32 em ambiente de simulação com auxílio do *software* PSIM versão 9.1. *Software* este utilizado como ambiente de simulação para sistemas de conversão de potência e controle de motor, cujos módulos fornecem um sistema robusto para simulação de diversas áreas, como sistemas de energias renováveis (POWERSIM, 2021).

Os dados de entrada  $R$ ,  $\beta$  e  $V_{Wind}$  são, respectivamente, o raio do rotor em metros, o ângulo de inclinação das pás (*pitch*) e a velocidade do vento. O modelo da microturbina está encapsulado em um subcircuito que recebe esses parâmetros de entrada e apresenta, como saída, um torque mecânico acoplado diretamente ao

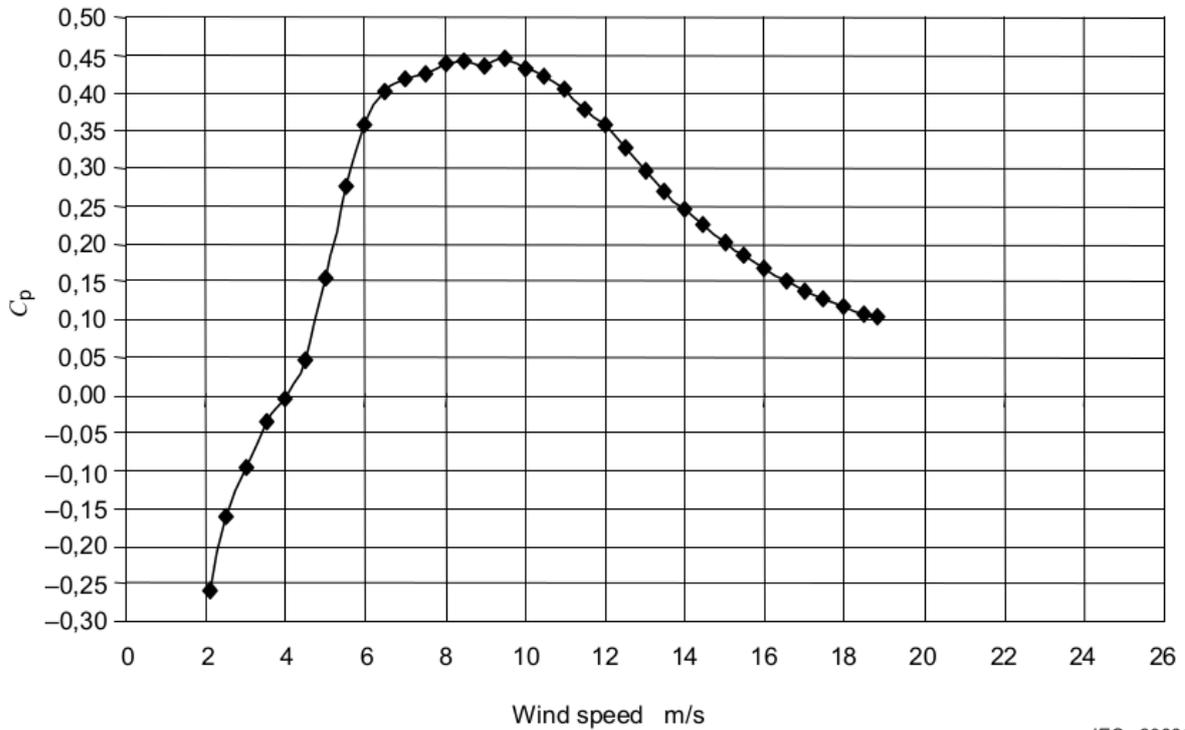
Figura 30 – Exemplo de curva de potência de um aerogerador.



Fonte: IEC (2005).

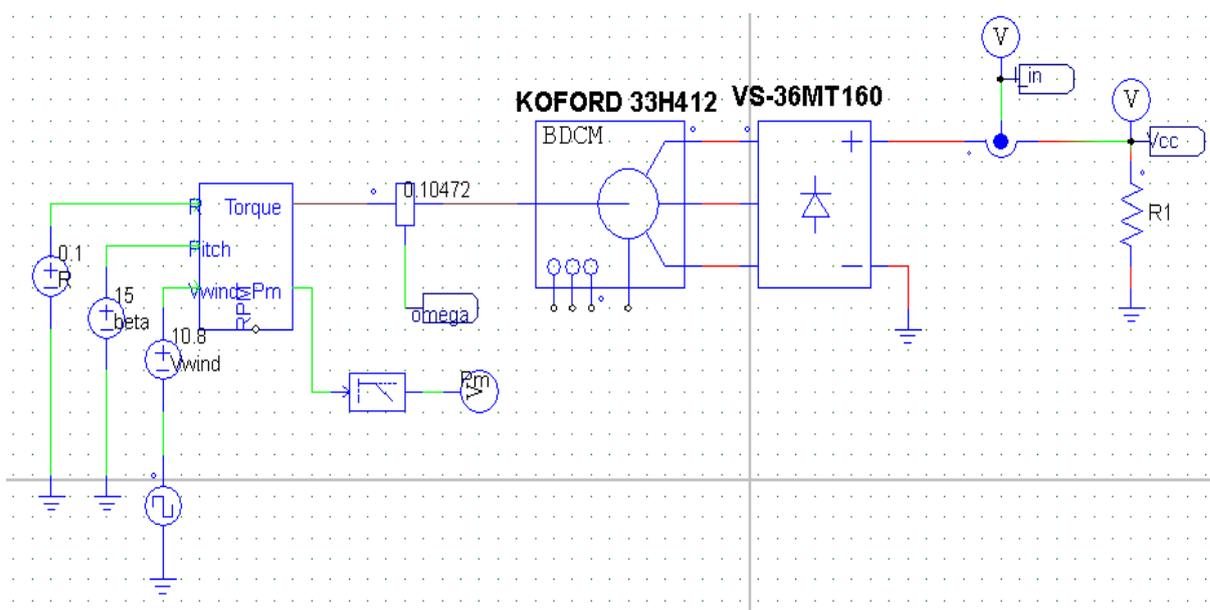
Figura 31 – Exemplo de curva de coeficiente de potência de um aerogerador.

$C_p$  at sea level air density  $1,225 \text{ kg/m}^3$  (database B)



IEC 2033/05

Fonte: IEC (2005).

Figura 32 – Circuito em malha aberta com uso do *software* PSIM.

Fonte: Autor.

gerador Koford de ímãs permanentes. No estágio seguinte, acopla-se um retificador trifásico ao gerador que, por sua vez, gera uma tensão retificada em sua saída para alimentar uma carga resistiva representada por R1. Para esta carga resistiva, durante os testes práticos, foi utilizado um resistor variável de alta potência, com capacidade máxima de corrente de 10 A e resistividade que varia entre 1  $\Omega$  e 20  $\Omega$ .

Para o levantamento das curvas de potência, foram realizados ensaios em laboratório, com circuito em malha aberta, de tal forma que rajadas de vento eram geradas a partir de um túnel de vento localizado no LabTermo, Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Tecnológico da UFSC. A Figura 33 apresenta a estrutura utilizada para os ensaios. Os ensaios seguiram os seguintes pontos:

1. A velocidade do vento esteve entre 3 m/s e 19 m/s;
2. A variação da velocidade do vento se deu de 2 m/s em 2 m/s;
3. A cada velocidade do vento considerada, realizava-se a variação do resistor de carga a partir de seu valor mínimo até seu valor máximo;
4. Durante a variação de resistência da carga, para cada velocidade do vento era realizada a leitura da velocidade de rotação do rotor e de corrente e tensão na saída do retificador;
5. Os valores lidos a partir do sensoriamento eram processados pelo ATmega328, cujo código pode ser visto no Apêndice A, e enviados para uma aplicação em

C++ (Apêndice B);

6. A partir dos valores recebidos pela aplicação, calculava-se a potência gerada, além do  $\lambda$  e de  $C_p$ . Os principais dados eram apresentados em uma interface (Apêndice C) para acompanhamento a cada leitura;
7. Esses dados eram então armazenados em um arquivo formatado em texto para posterior análise e geração das curvas de potência.

Figura 33 – Ensaios em túnel de vento no LabTermo da UFSC.



Fonte: Autor.

Com os dados devidamente armazenados a partir dos ensaios em túnel de vento, eles foram organizados em planilhas com formato *Comma-Separated Values* (CSV) e, em seguida, foram gerados os gráficos que representam o modelo do sistema.

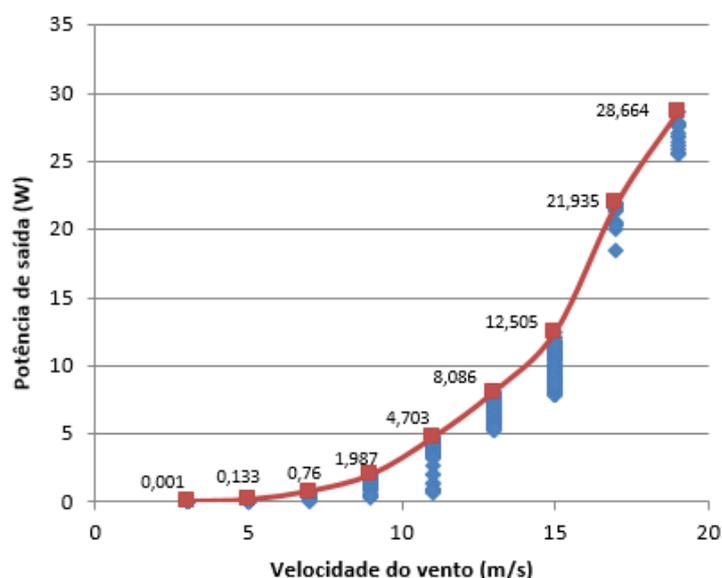
## 4.2 CURVAS DO MICROGERADOR EÓLICO

Há três curvas fundamentais para a caracterização do modelo da microturbina: a primeira relaciona as potências geradas em função da velocidade do vento; a segunda ilustra os diferentes coeficientes de potência em função da velocidade do vento; a terceira mostra os pontos de máxima potência para cada velocidade do vento em função da velocidade de rotação do rotor.

### 4.2.1 Potência Gerada

Como indicado no tópico anterior, a velocidade de vento produzida pelo túnel de vento do laboratório variou entre 3 m/s e 19 m/s a cada 2 m/s. Dessa forma, a Figura 34 apresenta a curva gerada a partir dos dados coletados. Além disso, a Tabela 7 apresenta os valores coletados para cada velocidade do vento considerada.

Figura 34 – Curva de potência em função da velocidade do vento.



Fonte: Autor.

Cada ponto em azul corresponde a um valor ajustado da carga resistiva na saída do circuito retificador trifásico. Ao passo que os pontos em vermelho indicam os picos de potência para cada velocidade do vento, atingindo em torno de 28,6 W para a velocidade de 19 m/s

Tabela 7 – Valores de potência obtidos em testes de túnel de vento.

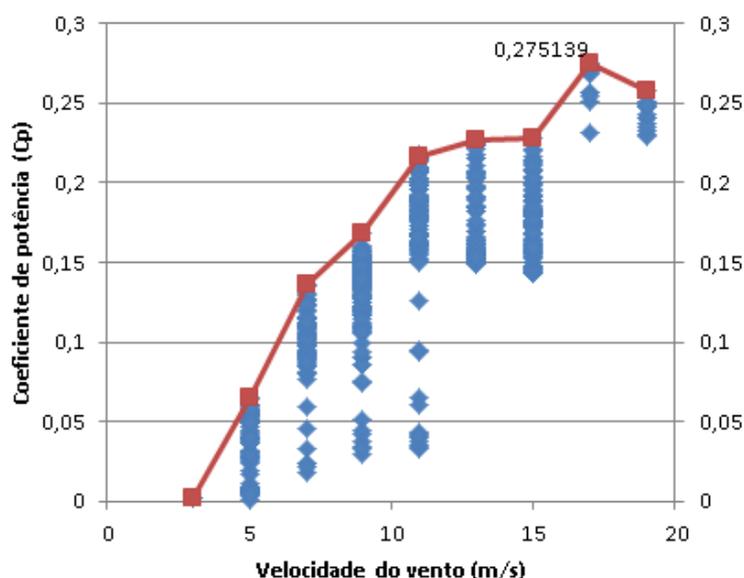
Velocidade do vento	Velocidade de rotação	Potência máxima de saída
5 m/s	135 rad/s	0,133 W
7 m/s	174 rad/s	0,805 W
9 m/s	213 rad/s	1,987 W
11 m/s	284 rad/s	5,129 W
13 m/s	340 rad/s	8,808 W
15 m/s	389 rad/s	12,505 W
17 m/s	502 rad/s	21,935 W
19 m/s	603 rad/s	28,665 W

Fonte: Autor.

### 4.2.2 Coeficiente de Potência

A curva de  $C_p$  para o microgerador pode ser vista na Figura 35. Os pontos computados foram gerados em função da variação da velocidade do vento, cujos valores estão representados na Tabela 8.

Figura 35 – Coeficiente de potência em função da velocidade do vento.



Fonte: Autor.

Como no gráfico anterior, os pontos em azul representam distintos valores para a carga resistiva, enquanto os pontos em vermelho correspondem ao máximo valor de  $C_p$  para diferentes velocidades do vento. Pode-se observar que, para a velocidade de 17 m/s, foi obtido o melhor aproveitamento relativo da energia cinética do vento: cerca de 27,5%. Supondo cerca de 2,5% de perdas do gerador ao converter energia mecânica em energia elétrica, a energia mecânica extraída do vento estaria em torno de 30%.

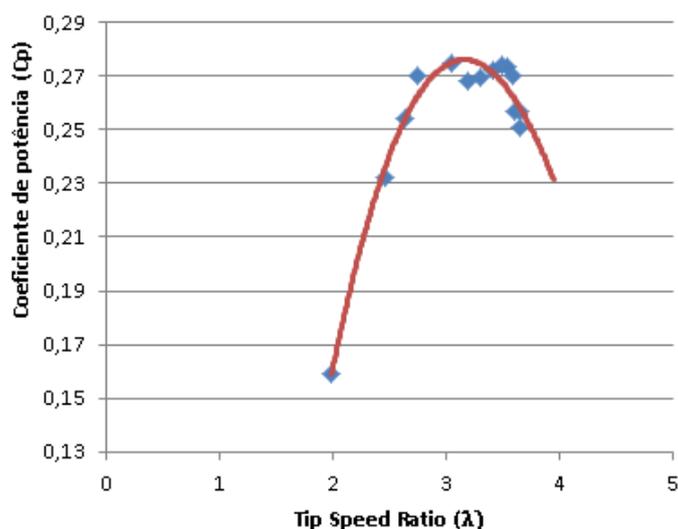
Assim como pode ser visto na Figura 19, o coeficiente de potência é frequentemente expresso, na literatura, em termos de  $\lambda$ . O *tip speed ratio* se torna fundamental na otimização do ponto de operação de um aerogerador, uma vez que sua variação impacta diretamente na variação do coeficiente de potência deste aerogerador. Valores consideravelmente baixos ou altos acabam gerando um  $C_p$  baixo, atingindo valores satisfatórios para um  $\lambda$  intermediário (KOT; ROLAK; MALINOWSKI, 2013).

O comportamento de  $C_p$ , descrito anteriormente, pode ser visto na Figura 36 que apresenta valores levantados em túnel de vento para velocidade de 17 m/s.

Tabela 8 – Valores de coeficiente de potência obtidos em testes de túnel de vento.

Velocidade do vento	Coefficiente Máximo de Potência
5 m/s	0,065
7 m/s	0,135
9 m/s	0,168
11 m/s	0,216
13 m/s	0,226
15 m/s	0,228
17 m/s	0,275
19 m/s	0,257

Fonte: Autor.

Figura 36 – Coeficiente de potência para 17 m/s em função do *tip speed ratio*.

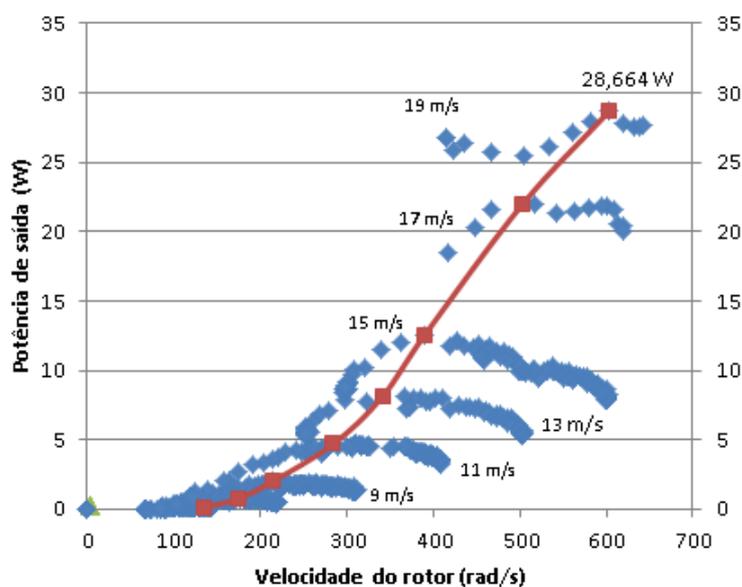
Fonte: Autor.

### 4.2.3 Rastreamento de Máxima Potência

A terceira curva gerada é de fundamental importância para a caracterização do controle de MPPT, uma vez que a técnica PSF se utiliza do polinômio característico da curva para realização do rastreamento da máxima potência. A Figura 37 ilustra a curva gerada.

A curva foi obtida a partir dos valores de máxima potência (pontos em vermelho) para cada curva de velocidade do vento (pontos em azul) em função da variação da velocidade de rotação do rotor em rad/s. Para um mesmo valor de  $v_w$ , os pontos em azul correspondem a diferentes ajustes da carga resistiva. Note que, caso seja realizada a divisão da curva da potência de saída pela potência disponível no vento, seria obtida uma curva de  $C_p$  com formato similar ao já conhecido na literatura para

Figura 37 – Rastreamento do ponto de máxima potência em função da velocidade de rotação do rotor.



Fonte: Autor.

turbinas de eixo horizontal.

É importante indicar que, para os três gráficos relacionados ao levantamento do modelo do sistema, com ênfase naquele que apresenta a curva de MPPT (Figura 37), os pontos em azul (leituras de valores com a variação do resistor na saída do retificador trifásico) reduziram de forma acentuada a partir das velocidades do vento de 17 m/s. Isso se deve ao fato de que, a partir dessas velocidades, a estrutura, cujo protótipo estava fixado, começou a apresentar considerada vibração com o aumento da força do vento. Esperava-se realizar novos testes, com a estrutura melhor fixada, para leitura de uma maior quantidade de pontos. Porém, a paralisação das atividades laboratoriais, devido à pandemia causada pelo novo Coronavírus, impossibilitou essa ação.

### 4.3 CONVERSOR BUCK-BOOST NÃO INVERSOR

Um conversor CC-CC do tipo *buck-boost* não inversor foi escolhido para o projeto em função da variação de potência exigida pela carga, além da variação da velocidade aparente do vento. Ambos os aspectos podem exigir que o circuito se comporte como abaixador ou elevador. Além disso, o circuito *buck-boost* clássico entrega uma tensão de saída invertida em relação à tensão de entrada. Como na saída do retificador trifásico sempre haverá uma tensão positiva, optou-se pela topologia não inversora do circuito *buck-boost* para evitar adicionar mais um estágio para inversão da tensão a ser repassada à carga e à bateria. O conversor CC-CC projetado para o sistema deve

atender às especificações de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Tabela de especificações para o conversor Buck-Bost não Inversor.

Tensão de saída ( $V_o$ )	25,2 V
Corrente de saída ( $I_o$ )	2,4 A
Frequência de chaveamento ( $f_{sw}$ )	25 kHz
Variação da tensão de entrada ( $V_i$ )	5 V - 48 V
Corrente pico-a-pico de <i>ripple</i> ( $\Delta I$ )	0,2 A
Tensão pico-a-pico de <i>ripple</i> ( $\Delta V$ )	0,2 V

Fonte: Autor.

Os dados apresentados na Tabela 9 foram baseados nas especificações de projeto, em que a tensão de saída é determinada pela tensão máxima do *pack* de baterias e a corrente de saída é determinada pela divisão entre a potência esperada (em torno de 60 W) e a tensão de saída do conversor.

A partir das especificações de projeto, deve-se determinar os componentes a serem utilizados. São necessárias duas chaves controladas por PWM, dois diodos, um indutor e um capacitor, além da parametrização do *duty cycle* ( $D$ ) de chaveamento do sinal. O cálculo de  $D$  pode ser feito de acordo com a equação

$$V_o = V_i \cdot \frac{D}{1 - D}, \quad (7)$$

como a tensão de saída  $V_o$  é fixa,  $D$  varia em função da tensão de entrada  $V_i$ . Para a tensão mínima de entrada em 5 V:

$$D_{max} = \frac{V_o}{V_{i_{min}} + V_o} \quad (8)$$

$$D_{max} = \frac{25,2}{5 + 25,2} \quad (9)$$

$$D_{max} = 0,834. \quad (10)$$

De forma semelhante, para a tensão máxima de entrada em 48V:

$$D_{min} = \frac{V_o}{V_{i_{max}} + V_o} \quad (11)$$

$$D_{min} = \frac{25,2}{48 + 25,2} \quad (12)$$

$$D_{min} = 0,344. \quad (13)$$

O valor de indutância é escolhido para limitar a corrente de *ripple*. Portanto, a indutância pode ser calculada por:

$$L = V_o \cdot \frac{1 - D_{min}}{\Delta I \cdot f_{sw}} \quad (14)$$

$$L = 25,2 \cdot \frac{1 - 0,344}{0,2 \cdot 25 \cdot 10^3} \quad (15)$$

$$L = 3,30 \text{ mH} . \quad (16)$$

Já em relação ao capacitor, tem-se que o valor de capacitância é direcionado para limitar a tensão de *ripple*. Assim, a capacitância é calculada por:

$$C = I_o \cdot \frac{D_{max}}{\Delta V \cdot f_{sw}} \quad (17)$$

$$C = 2,4 \cdot \frac{0,834}{0,2 \cdot 25 \cdot 10^3} \quad (18)$$

$$C = 400 \mu F . \quad (19)$$

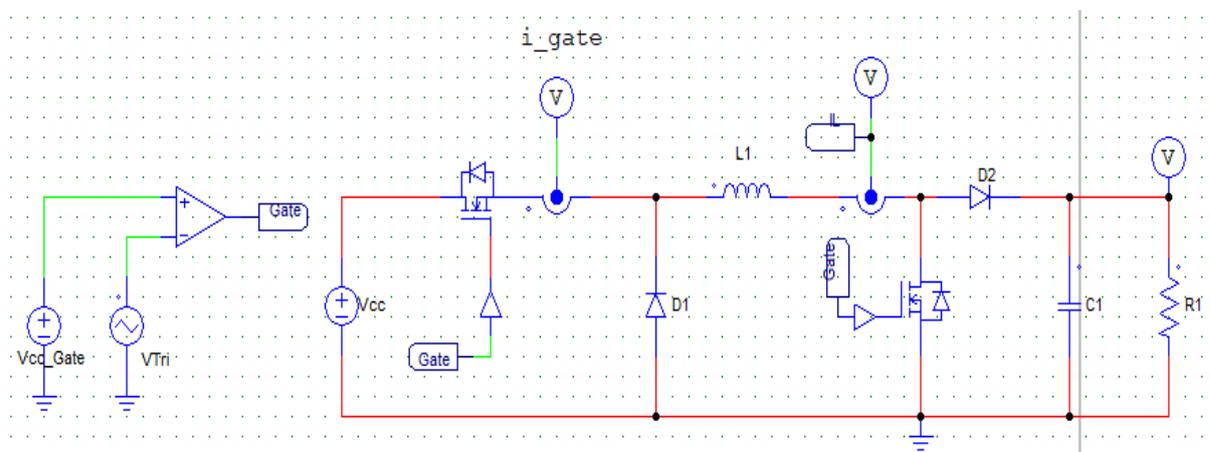
Para o cálculo de tensão do capacitor, deve-se considerar a tensão de saída do circuito e a tensão pico-a-pico de *ripple*, caracterizando a tensão máxima de saída:

$$V_C = V_o + \frac{\Delta V}{2} \quad (20)$$

$$V_C = 25,3 \text{ V} . \quad (21)$$

Completando as especificações dos componentes para o circuito do conversor CC-CC projetado para simulações, as chaves S1 e S2 (Figura 27) são do tipo MOSFET.

A Figura 38 apresenta o circuito do conversor projetado e testado em ambiente de simulação, em que  $V_{cc}$  representa a tensão na saída do retificador trifásico após o estágio de geração na microturbina e tem o papel de tensão de entrada no circuito conversor CC-CC. As entradas de chaveamento representadas por *Gate* são geradas com uma frequência de 25 kHz na saída do circuito de controle MPPT (apresentado no tópico a seguir) e, na Figura, é representado por  $V_{cc\_Gate}$ , em conjunto com uma onda triangular (VTri). O circuito produz, como saída, uma tensão nos terminais do capacitor C1 com conexão a uma carga resistiva R1, representando a carga da unidade de voo e a bateria do sistema, fornecendo a potência final controlada proveniente do microgerador eólico. O circuito obteve resposta satisfatória como saída, dados os parâmetros calculados anteriormente.

Figura 38 – Conversor Buck-Boost Não Inversor simulado em *software* PSIM.

Fonte: Autor.

#### 4.4 PROJETO DO CONTROLADOR MPPT

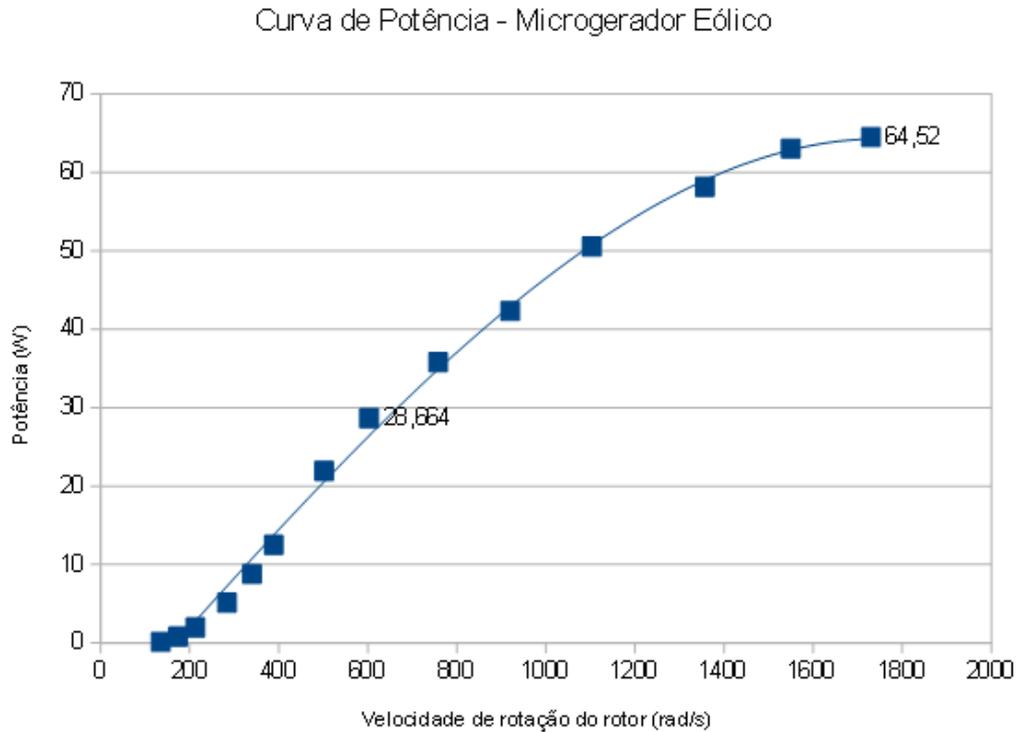
O primeiro passo para o projeto do controlador MPPT é a identificação da curva característica e sua respectiva equação. Como pode ser observado na Figura 37, os dados adquiridos dizem respeito a velocidades do vento que variam até 19 m/s. Isso se deve à impossibilidade de continuação do levantamento da curva em laboratório causada pela Pandemia que se instaurou no cenário mundial e, aqui no Brasil, no início de 2020. Desta forma, optou-se por realizar uma extrapolação da curva identificando sua tendência, de acordo com os dados levantados até então. Feito isso, a Figura 39 apresenta a tendência da curva de MPPT estabelecida, ao passo que a Tabela 10 apresenta cada valor obtido. Os valores de tendência para a curva são considerados entre 21 m/s e 31 m/s, uma vez que os dados até a velocidade de vento de 19 m/s já haviam sido levantados (variando-se a leitura a cada 2 m/s).

O controlador MPPT foi projetado e testado em nível de simulação com o auxílio do *software* PSIM versão 9.1. A partir da curva de MPPT apresentada na Figura 39, foi possível identificar o polinômio característico de terceiro grau para aplicar na técnica de PSF. Uma vez definido o polinômio e aplicado o controle, o sistema procura rastrear os pontos de máxima potência para cada velocidade do vento.

##### 4.4.1 PSF Convencional

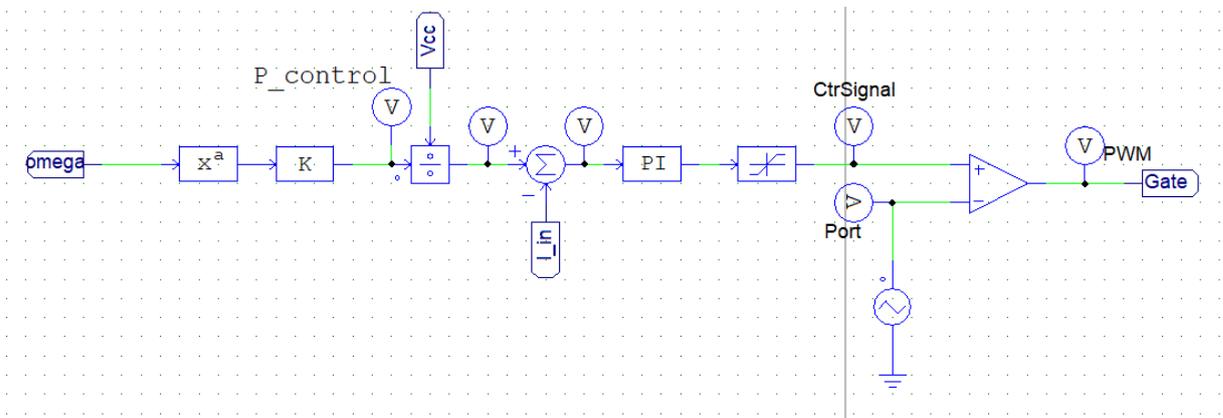
A princípio, realizou-se o projeto de controlador baseado na técnica de PSF convencional, caracterizada por utilizar apenas o coeficiente de terceiro grau do polinômio da curva de MPPT, além de considerar a geração máxima de potência para uma dada velocidade do vento. A Figura 40 apresenta o diagrama desenvolvido no *software* PSIM que caracteriza a técnica de PSF.

Figura 39 – Extrapolação da curva de MPPT para velocidades do vento de até 31 m/s.



Fonte: Autor.

Figura 40 – Diagrama de controle da técnica PSF em software PSIM.



Fonte: Autor.

Em que  $\omega$  é o valor em rad/s da velocidade de rotação do rotor lida através do *encoder* do gerador,  $x^a$  representa a curva de MPPT,  $K$  indica um coeficiente de rendimento de transformação de potência mecânica em potência elétrica de 95%,  $V_{cc}$  é a tensão e  $I_{in}$  a corrente, ambos lidos na saída do retificador trifásico. *Gate* indica o sinal PWM para chaveamento do circuito conversor CC-CC. *PI* é o bloco de controle com ganho  $k$  igual a 1,5 e constante de tempo  $T$  igual a 1, tendo sua função

Tabela 10 – Valores de potência máxima gerada para cada velocidade de rotação do rotor para cada variação da velocidade do vento.

Velocidade do vento	Velocidade de rotação	Potência Máxima
5 m/s	135 rad/s	0,133 W
7 m/s	174 rad/s	0,805 W
9 m/s	213 rad/s	1,987 W
11 m/s	284 rad/s	5,129 W
13 m/s	340 rad/s	8,808 W
15 m/s	389 rad/s	12,505 W
17 m/s	502 rad/s	21,935 W
19 m/s	603 rad/s	28,664 W
21 m/s	758 rad/s	35,789 W
23 m/s	920 rad/s	42,321 W
25 m/s	1103 rad/s	50,54 W
27 m/s	1357 rad/s	58,168 W
29 m/s	1550 rad/s	63,048 W
31 m/s	1730 rad/s	64,52 W

Fonte: Autor.

de transferência definida como:

$$G(s) = k \frac{(1 + sT)}{sT}, \quad (22)$$

em que os parâmetros de controle foram determinados de forma empírica durante as simulações.

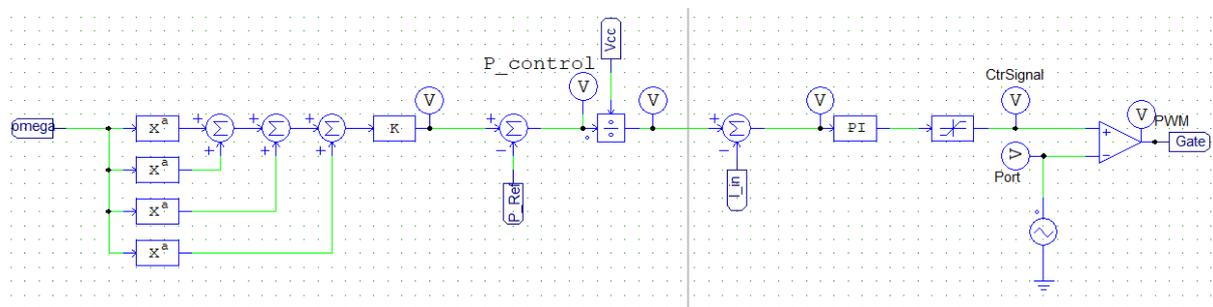
Apesar de ser uma técnica bem difundida na literatura, dois pontos fundamentais foram avaliados para serem melhor aproveitados, com o intuito de reduzir perdas e buscar a solução otimizada para o problema:

1. Como a curva de MPPT clássica apresenta apenas o coeficiente de terceiro grau, a tendência é de que, quanto maior a velocidade do vento, a potência gerada tende apenas a crescer indefinidamente. O que, na prática, não se caracteriza, uma vez que o gerador da microturbina apresenta um ponto de saturação na geração de energia;
2. Em momentos pontuais, a energia gerada pode ser maior do que àquela demandada pela bateria (circuito de carregamento) em conjunto com a exigida pela carga (eletrônica embarcada). Nesse contexto, o usual é dissipar a energia excedente em um resistor de proteção, comumente chamado de *protection box*. Para evitar a dissipação desnecessária de energia gerada, optou-se por reestabelecer a referência na malha de controle do MPPT para que, ao invés de gerar sempre a potência máxima, o circuito deve gerar apenas a potência ótima (necessária).

#### 4.4.2 Ajuste de Referência para o PSF

Visando os pontos descritos no subtópico anterior, o diagrama de controle da técnica PSF, com suas devidas alterações, é apresentado pela Figura 41 em ambiente de simulação. Para este diagrama, foi considerado o polinômio característico de terceiro grau completo da curva de MPPT, além de ser adicionado à malha de controle um novo valor de referência relacionado à energia dissipada no resistor de potência.

Figura 41 – Diagrama de controle da técnica PSF com alterações para otimizar o processo em *software* PSIM.



Fonte: Autor.

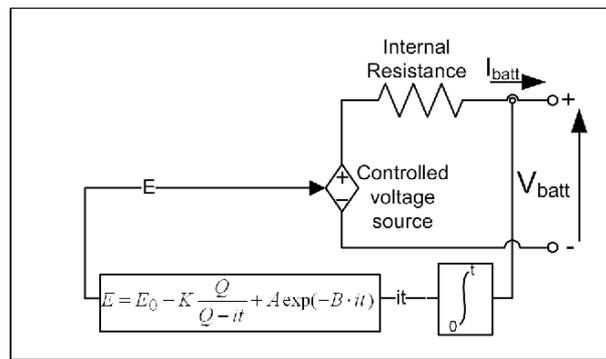
Nesse diagrama temos os mesmos parâmetros apresentados na Figura 40, exceto pelo uso completo do polinômio característico da curva de MPPT, onde pode-se observar a utilização dos 4 coeficientes no bloco de entrada do diagrama, além da inserção de  $P_{ref}$  que é a potência calculada a partir da leitura de tensão e corrente excedente no circuito usada como referência para o novo valor de potência gerado pelo microgerador. A lógica utilizada para o cálculo de  $P_{ref}$  é melhor detalhada na seção seguinte.

#### 4.5 BATERIA E LÓGICA DE CARGA/DESCARGA

O modelo da bateria foi encapsulado em um subcircuito e desenvolvido com base no circuito apresentado em Tremblay (2007), que utiliza uma fonte de tensão controlada em conjunto com uma resistência constante, representado na Figura 42. O *pack* de baterias foi integrado ao sistema desenvolvido em ambiente de simulação com auxílio do *software* PSIM. De forma a agregar positivamente ao desempenho do microgerador, uma lógica de carga e descarga foi aplicada a partir do que foi considerado no item 2 da subseção 4.4.1. Essa lógica de uso da bateria, seja no período de carga ou descarga, é apresentada na Figura 43, em que o *Switch\_Control* representa um bloco de lógica condicional, desenvolvido em linguagem C e facilmente portátil para o microcontrolador designado para o projeto, que atua na identificação dos níveis de potência: gerada pela microturbina; gerada/fornecida à bateria; dissipada

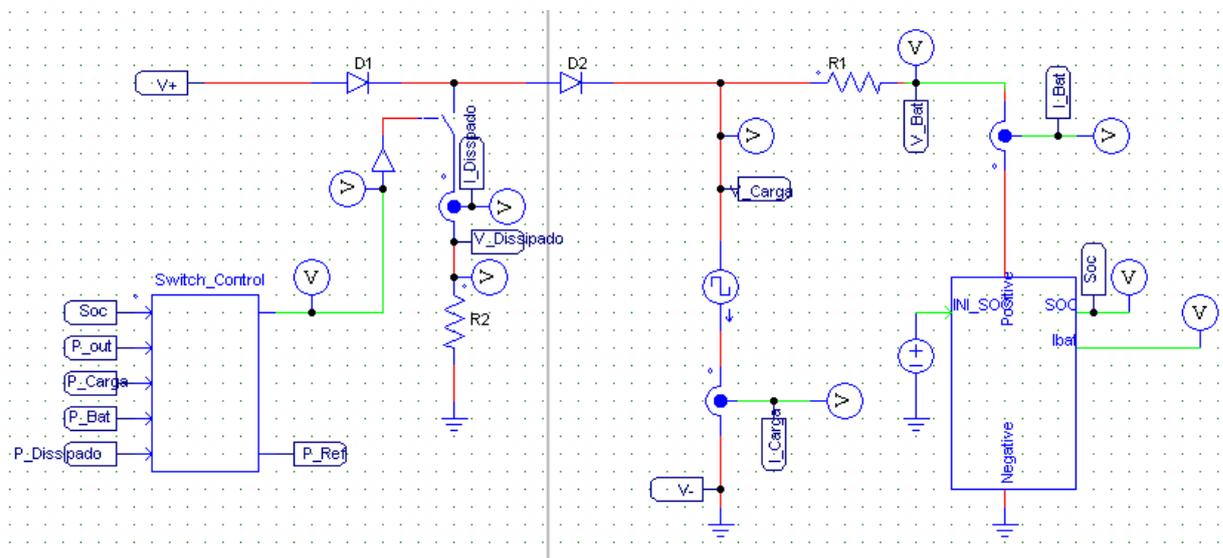
no resistor R2 (*protection box*) e demandada pela carga (no diagrama representada por uma fonte de corrente em onda quadrada). O estado de carga da bateria também é considerado. A partir disso, calcula-se uma nova potência servindo como referência para o controle MPPT, assim como foi representado no diagrama da Figura 41.

Figura 42 – Modelo não linear do circuito da bateria.



Fonte: Tremblay, Dessaint e Dekkiche (2007).

Figura 43 – Diagrama de fornecimento de potência para carga e bateria.



Fonte: Autor.

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a identificação do modelo do microgerador a partir de testes em túnel de vento realizados em laboratório. O modelo apresenta três principais curvas: potência gerada, coeficiente de potência e rastreamento de máxima potência, esta último sendo fundamental para o projeto do controlador baseado na técnica de

PSF. A partir do modelo, foi projetado o controlador MPPT baseado na técnica PSF, apresentando uma variação adaptativa ao sistema, no que diz respeito ao valor de referência e ao polinômio da curva. Além disso, o Capítulo 4 apresentou o projeto do conversor *buck-boost* não inversor, sendo agregado ao sistema de controle. Por fim, foi apresentada uma lógica de gerenciamento de carga e descarga da bateria em função dos parâmetros relevantes ao circuito, como um resistor de dissipação, geração de potência por parte da microturbina, além da potência demandada pela carga (simulando os elementos presentes na unidade de voo do sistema AWE). A partir da modelagem do sistema e projeto do controlador, o próximo capítulo apresenta os resultados de simulação obtidos com auxílio do *software* PSIM.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados a partir de simulações realizadas no *software* PSIM, versão 9.1. Vale ressaltar que, a princípio, o intuito da pesquisa era de realizar a continuação dos testes em túnel de vento, agora, aplicando o controle de MPPT embarcado ao microcontrolador AtMega328 com o sistema em malha fechada. Porém, novamente devido ao avanço da pandemia que se instalou no país, optou-se por dar continuidade à pesquisa com base em simulações. O ambiente computacional, cujas simulações foram executadas, possui especificações técnicas ilustradas na Tabela 11.

Tabela 11 – Especificações técnicas do ambiente computacional.

Marca	Acer
Modelo	Aspire 3: A315-41-R1RJ
Processador	AMD Ryzen 5 2500U
Placa de vídeo	AMD Radeon Vega
Memória RAM	12 GB DDR4

Fonte: Autor.

Com os circuitos já implementados e testados, conforme apresentado no Capítulo 4, a continuação deste capítulo busca trazer os resultados de simulação, mais especificamente os gráficos gerados representando as respostas de saída de cada circuito proposto.

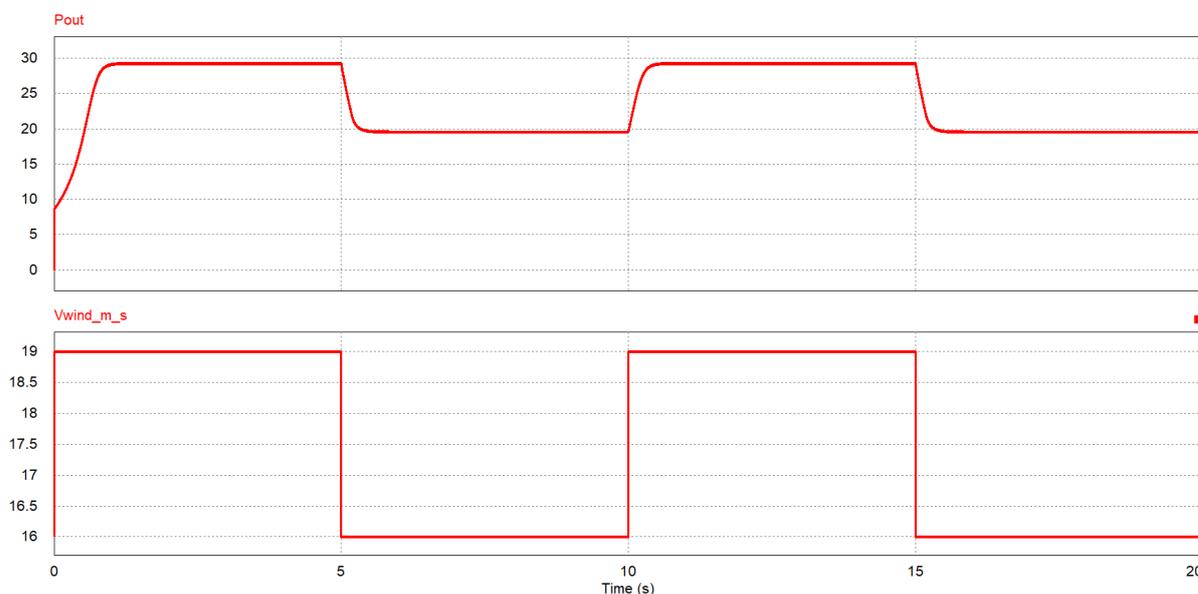
### 5.1 GERAÇÃO EM MALHA ABERTA

A partir da Figura 32, cujo circuito serviu de base para o levantando do modelo da microturbina, foi possível gerar o gráfico apresentado na Figura 44 que indica a saída de potência gerada, com variação entre cerca de 19 W e 29 W, conforme a também variação da velocidade do vento entre 16 m/s e 19 m/s. Uma carga resistiva na saída do retificador trifásico foi fixada em  $12\ \Omega$ . Pode-se observar que a potência de saída, dissipada na carga resistiva, condiz aproximadamente com a potência gerada durante os testes em túnel de vento pela microturbina, ao se comparar com o gráfico apresentado na Figura 34.

### 5.2 BATERIA

Um circuito simples de carga e descarga da bateria, para confirmação do modelo de seu funcionamento, foi montado em simulação e é apresentado pela Figura 45.

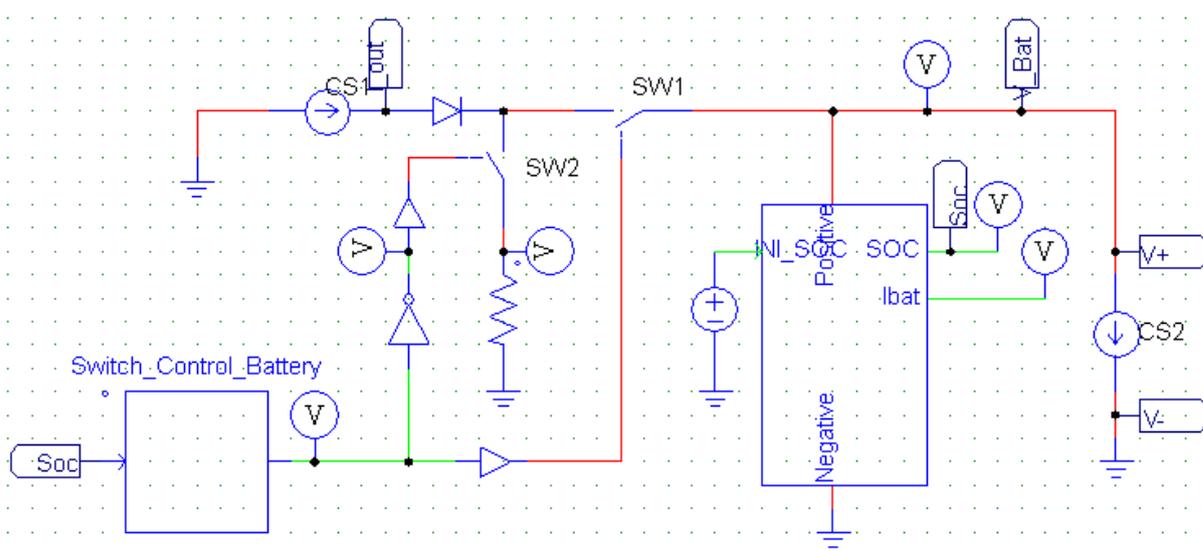
Figura 44 – Potência gerada em malha aberta.



Fonte: Autor.

- $P_{out}$ : Potência gerada na saída do retificado trifásico em W;
- $V_{wind\_m\_s}$ : Velocidade do vento imposta em m/s.

Figura 45 – Circuito simples de carga e descarga do pack de baterias.

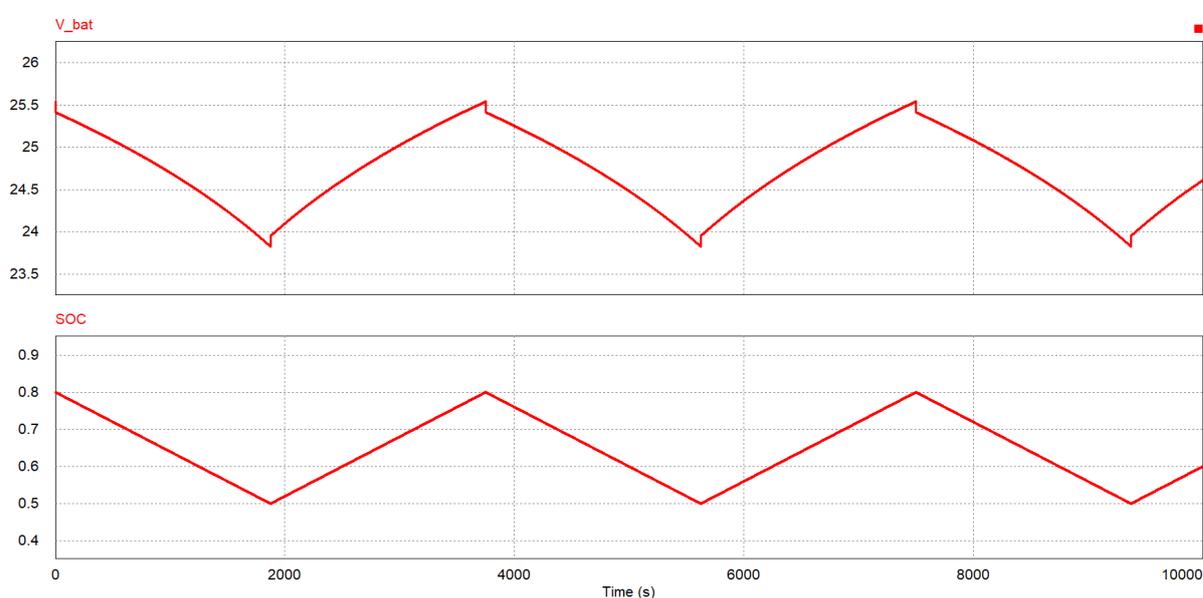


Fonte: Autor.

A partir de uma lógica condicional aplicada em *Switch\_Control\_Battery*, realiza-se o chaveamento de uma fonte de corrente contínua (simulando a geração da micro-

turbina): ao se identificar 80% de estado de carga da bateria, abre-se a chave SW1 e fecha-se a chave SW2, fazendo com que a energia gerada por CS1 seja dissipada no resistor e a bateria se descarregue através da fonte de corrente CS2. Ao se identificar 50% de estado de carga da bateria, a chave SW2 se abre e SW1 se fecha, realizando-se assim o ciclo de carga com o fornecimento de energia a partir de CS1 para a bateria. A Figura 46 ilustra os ciclos de carga e descarga descritos anteriormente. Os valores de referência para chaveamento do circuito de carga e descarga foram atribuídos apenas a nível de testes e podem ser facilmente alterados conforme necessidade da aplicação prática do sistema.

Figura 46 – Simulação de carga e descarga do *pack* de baterias.



Fonte: Autor.

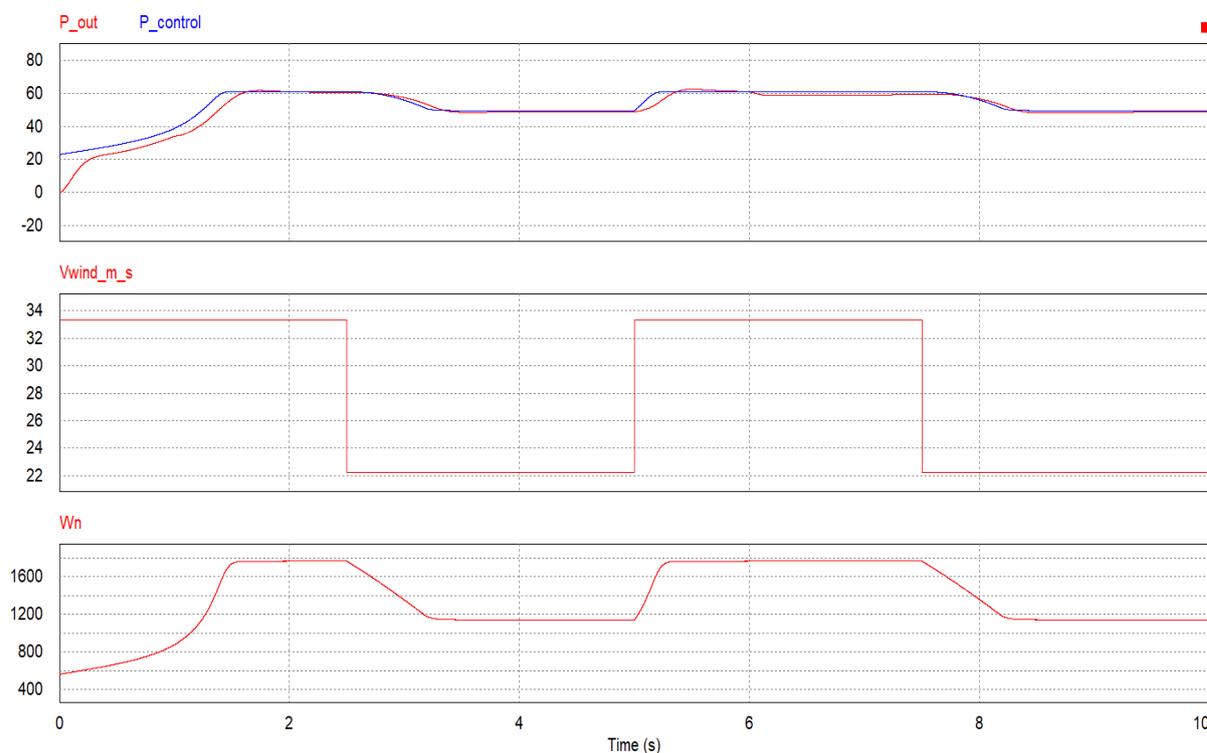
- $V_{bat}$ : Tensão nos polos da bateria em V;
- $SOC$ : Estado de carga da bateria (do inglês *state of charge*).

### 5.3 GERAÇÃO EM MALHA FECHADA

Como indicado no subtópico 4.4.2, optou-se por utilizar uma variação da técnica PSF no que diz respeito ao uso do polinômio característico completo da curva de MPPT e à utilização de um novo valor de referência para a potência gerada. O circuito completo pode ser observado no Apêndice D, cujo gráfico como resultado é ilustrado na Figura 47.

No primeiro gráfico, tem-se a curva em azul, denotada por  $P_{control}$ , que indica a potência de referência a ser seguida, ao passo que a curva em vermelho ( $P_{out}$ )

Figura 47 – Resultado de simulação para o circuito em malha fechada.



Fonte: Autor.

- $P_{out}$ : Potência gerada na saída do controlador em W;
- $P_{control}$ : Potência de referência ser controlado em W;
- $V_{wind\_m\_s}$ : Velocidade do vento imposta em m/s;
- $W_n$ : Velocidade de rotação do rotor rad/s.

é a potência de saída após a realização do controle. Apesar de um certo atraso e um pequeno *overshoot*, o sistema foi capaz de seguir uma potência que varia, para este caso, entre cerca de 49 W e 61 W. Já o segundo gráfico ilustra a variação da velocidade do vento conforme o avanço da simulação. Essa velocidade esteve entre 22 m/s e 33 m/s (valores compatíveis com a possível velocidade de vento aparente durante o ciclo de geração de energia). Para o terceiro gráfico, tem-se a variação da velocidade de rotação do rotor, possuindo pico próximo a 1800 rad/s para uma velocidade do vento de 33 m/s.

No que diz respeito à lógica de gerenciamento da energia excedente, os seguintes critérios foram levados em consideração como relações condicionais:

- Se a potência gerada pela microturbina for maior que a potência demandada pela carga eletrônica, a potência excedente é utilizada para o carregamento da

bateria até que seu valor chegue em 80% de estado de carga;

- Se a potência gerada pela microturbina for maior que a potência demanda pela carga eletrônica e a bateria estiver com estado de carga acima de 80%, uma nova referência de potência deve ser calculada para que haja o mínimo de potência excedente e a microturbina gere apenas a energia necessária para a carga eletrônica;
- Se a potência gerada pela microturbina for menor que a potência demandada pela carga eletrônica, a bateria entra no sistema como um *backup* para suprir a diferença de energia.

Dessa forma, a Figura 48 apresenta, em gráfico, a resposta das potências presentes no sistema, além do estado de carga da bateria e a variação da velocidade do vento durante o tempo de simulação.

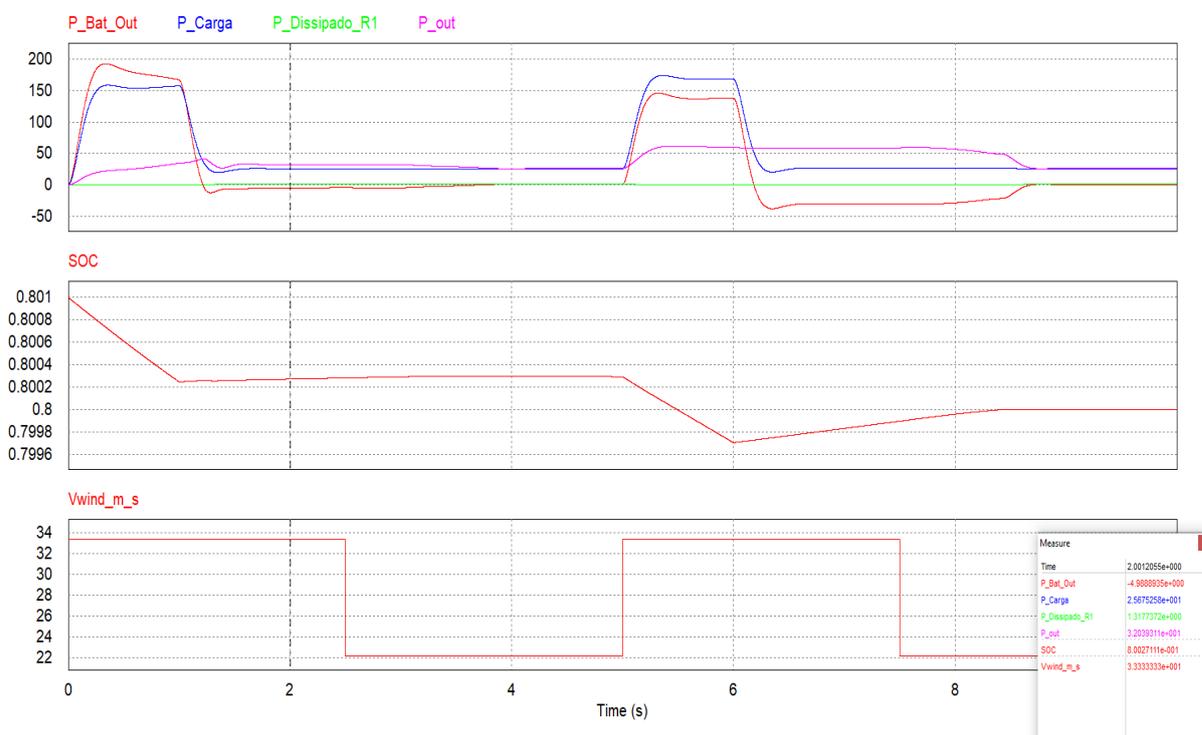
A fonte de corrente em onda quadrada possui as seguintes características: frequência de 1/5 Hz,  $D$  de 20%,  $DC$  offset de 1 A e pico a pico de 7,5 A. Por sua vez, a velocidade do vento varia entre 22 m/s e 33 m/s, com frequência de 1/5 Hz e  $D$  de 50%. Parâmetros escolhidos para simulação com base em valores que podem ser encontrados durante testes práticos.

O primeiro gráfico apresenta, em vermelho, a potência nos terminais da bateria. Observa-se que, durante o período de transitório (de 0 a 1 s de simulação) a bateria procura suprir a demanda da carga eletrônica (representada, no primeiro gráfico, pela curva em azul), pelo fato do microgerador (representado pela curva em rosa) não ser capaz de suprir toda a demanda. Como consequência, gera-se uma pequena descarga na bateria.

Após a redução da corrente, a partir de 1 s de simulação, o microgerador já se vê capaz de suprir toda a demanda do sistema, fazendo com que haja uma mínima dissipação no resistor de proteção (representado pela curva em verde), de cerca de 1,3 W, e pequeno fornecimento de energia à bateria, até que se estabilize após 2 s de simulação. Vale lembrar que, de acordo com a lógica condicional estabelecida, como o estado de carga da bateria se encontra acima de 80%, a microturbina deve gerar apenas a potência necessária para a carga eletrônica.

Com um novo pico de corrente a partir de 5 s de simulação, a bateria precisa, novamente, entrar em cena para fornecer a energia que falta para suprir a demanda da carga eletrônica. Com a nova redução da corrente exigida pela carga eletrônica, a partir de 6 s de simulação, e, observando-se que a bateria se encontra em um estado de carga abaixo de 80%, o microgerador mantém a geração máxima de potência para recarregar a bateria até seu ponto de referência (80%). Voltando a gerar, novamente, apenas a energia necessária para a carga após cerca de 8,5 s de simulação. Portanto, observou-se que o sistema de controle, do microgerador projetado, responde conforme

Figura 48 – Resultado de simulação para o gerenciamento de energia excedente.



Fonte: Autor.

- $P_{Bat\_Out}$ : Potência nos terminais da bateria em W;
- $P_{Carga}$ : Potência demandada pela carga em W;
- $P_{Dissipado\_R1}$ : Potência dissipada no resistor de proteção em W;
- $P_{out}$ : Potência gerada na saída do controlador em W;
- $SOC$ : Estado de carga da bateria (do inglês *state of charge*);
- $V_{wind\_m\_s}$ : Velocidade do vento imposta em m/s.

o esperado aos diferentes cenários que podem ser impostos durante o período de geração de energia do sistema AWE.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados de simulação realizada em ambiente computacional com uso do *software* PSIM, versão 9.1. Foram apresentados os seguintes gráficos: resposta do microgerador em malha aberta; carga e descarga do *pack* de baterias; geração em malha fechada; gerenciamento de energia excedente.

Os resultados apresentados em forma de gráfico apresentam uma característica

satisfatória ao gerar respostas que atendem às premissas da pesquisa. A partir disso, sua aplicação na prática se torna viável, inicialmente com uso de túnel de vento em ambiente controlado (laboratório) e, com a devida validação, podendo ser aplicado em testes de campo.

O controlador MPPT, com base na técnica de PSF adaptada, obteve uma resposta conforme o esperado, onde o sistema pôde realizar o rastreamento da máxima potência gerada, alternando essa perspectiva, para uma potência otimizada, de acordo com a necessidade imposta por diferentes cenários, assim como mostrado na Figura 48.

De forma geral, os resultados de simulação apontam um desempenho razoável da microturbina projetada, em conjunto ao *pack* de baterias, no que diz respeito ao fornecimento de energia para a eletrônica embarcada na unidade de voo do sistema AWE estudado neste trabalho.

## 6 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou uma arquitetura de controle para rastreamento de máxima potência, através da técnica de *power signal feedback* adaptada, em um microgerador eólico de eixo horizontal. A microturbina deve ser embarcada na unidade de voo de um sistema AWE desenvolvido no laboratório UFSCkite da Universidade Federal de Santa Catarina. O papel dessa microturbina é fornecer potência elétrica para os atuadores e toda a eletrônica embarcada na unidade de controle de voo do sistema AWE.

Foram apresentadas as curvas características da microturbina projetada: curva de potência, curva de  $C_p$  e curva de MPPT. Foi possível realizar o levantamento do modelo a partir de testes em túnel de vento, onde o sistema foi submetido a perturbações de velocidade do vento variando entre 3 m/s e 19 m/s, chegando a gerar cerca de 28 W de potência. Por falta de possibilidade de continuação dos testes, devido à pandemia do novo Coronavírus que se instalou de forma nacional e mundial, optou-se pelo prosseguimento do trabalho em ambiente de simulação, realizando-se uma extrapolação das curvas características do modelo a partir de uma tendência baseada nos dados levantados em túnel de vento para, então, projetar o controlador MPPT. Realizou-se uma extrapolação da velocidade do vento até 31 m/s, resultando em uma tendência de até cerca de 64 W de potência.

O ambiente de simulação escolhido para dar continuação ao trabalho foi o *software* PSIM, versão 9.1. O PSIM apresenta uma vasta gama de recursos para modelagem e simulação de componentes voltados a energias renováveis, com foco em energia fotovoltaica e energia eólica, e correspondeu às expectativas para ambientar o projeto que estava em desenvolvimento. Exceto pelo levantamento das curvas de potência do microgerador, que foram realizadas em laboratório com auxílio de um túnel de vento, a pesquisa teve como base o uso do PSIM para simulação de circuitos voltados à microgeração eólica. Diversos circuitos foram projetados: circuito de geração em malha aberta, gerenciamento de carga e descarga do *pack* de baterias, conversor CC-CC do tipo *buck-boost* não inversor, diagrama de controle MPPT com uso da técnica PSF convencional e adaptada, além do circuito completo do microgerador eólico em malha fechada.

Para a geração de energia otimizada, optou-se por utilizar uma variação da técnica PSF que, em seu estado convencional, caracteriza-se por identificar a máxima potência a ser gerada pela turbina em função da velocidade de rotação do rotor e, a partir disso, realiza-se uma realimentação de tensão e corrente que foram geradas na saída do retificador trifásico. A variação da técnica procura aplicar o polinômio característico completo para a curva de MPPT, onde foi possível obter, em malha fechada, cerca de 61 W de energia com velocidades do vento de até 33 m/s, apresentando

resultados similares à curva de MPPT extrapolada com base nos dados levantados experimentalmente em túnel de vento.

A técnica PSF, de forma adaptada, obteve êxito ao realizar o rastreamento da potência ótima, conforme a variação da velocidade do vento. Como o propósito da microturbina é alimentar a carga da unidade de voo, o balanço energético impõe que o excesso de energia gerada seja dissipado em um resistor de proteção. Monitorando a tensão nesse resistor, além daquela presente nos terminais da bateria, foi possível estabelecer uma política de correção da referência de potência dada pela curva de MPPT, para que a microturbina gere menos energia e, com isso, diminua o arrasto provocado por ela na dinâmica de voo da asa, permitindo a ela desenvolver maior velocidade e assim um melhor aproveitamento do vento pelo gerador da unidade de solo. A partir desses critérios, foi possível diminuir consideravelmente a potência dissipada em um resistor de proteção, ao aplicar a alteração de referência para o controle de potência. Além disso, a adaptação da técnica PSF em relação à utilização do polinômio completo da curva de MPPT, permitiu obter valores de potência máxima condizentes com o gerador eólico real, uma vez que uma curva cúbica, ao considerar apenas seu coeficiente de terceiro grau, tende ao infinito. Porém, a potência gerada por uma microturbina real possui um certo nível de saturação.

De forma geral, os objetivos de interesse deste trabalho foram alcançados, a partir de resultados que se mostraram satisfatórios para o projeto de um microgerador eólico a ser embarcado na unidade de voo de um sistema AWE, considerando a necessidade de adaptação da pesquisa provocada por interferências externas. Em nível de simulação, o sistema apresentou bom desempenho e se mostrou confiável para ser implementado na prática, a partir dos valores de velocidade do vento considerados nos testes de simulação. Porém, antes da realização de testes em campo, os testes em ambiente controlado (laboratório), com uso de túnel de vento, são necessários para validação do sistema projetado.

Esta pesquisa possui contribuição na literatura com a publicação de um artigo no Congresso Brasileiro de Automática, 2020. Intitulado Microgeração Eólica Embarcada para Aerogeradores com Aerofólios Cabeados, o artigo completo pode ser encontrado a partir do DOI: <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1350>.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando os aspectos levantados anteriormente, há alguns pontos que cabem ser listados como continuação deste trabalho. As próximas etapas a serem consideradas são:

- Finalizar os ensaios em túnel de vento para o levantamento do modelo da microturbina e estabelecer um comparativo com as curvas que sofreram extrapolação

para continuação da pesquisa;

- Confeccionar os circuitos projetados em simulador, para incorporação do sistema, como um todo, na prática;
- Realizar um comparativo entre os circuitos simulados em *software* PSIM e aqueles a serem confeccionados, através de testes de bancada;
- Avaliar a estabilidade em malha fechada da técnica PSF, proposta neste trabalho, com base em sua função de transferência;
- Assim como realizado em Demirtas e Serefoglu (2014), embarcar o algoritmo de MPPT ao microcontrolador AtMega328 para novos ensaios em túnel de vento, a fim de validar a estratégia do microgerador. Com a estratégia exaustivamente testada, o passo seguinte será implementar a solução ao sistema de *pumping kite* desenvolvido no UFSCkite;
- Realizar uma comparação entre a técnica convencional de PSF e a técnica adaptada, que foi proposta neste trabalho, aplicando-se os dois métodos de rastreamento de potência ao sistema microcontrolado para obtenção de resultados comparativos;
- Realizar novos testes experimentais com a nacele apresentada na Figura 24, cujo objetivo é diminuir de forma considerável o peso do microgerador, o que deve contribuir para a performance da unidade de voo durante a trajetória de geração em *pumping kite*.

## REFERÊNCIAS

ALMASI, O. N. *et al.* Analysis, control and design of a non-inverting buck-boost converter: A bump-less two-level T–S fuzzy PI control. **ISA Transactions**, v. 67, p. 515–527, 2017. DOI: [doi.org/10.1016/j.isatra.2016.11.009](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.11.009).

AMPYX. **Ampyx Power Airborne Wind Energy System (AWES)**. Ampyx Power. Disponível em: <http://mission-innovation.net/our-work/mission-innovation-breakthroughs/ampyx-power-airborne-wind-energy-system-awes/>. Acesso em: 27 de Abril de 2021.

ARAUJO, H. **Controle da máquina elétrica de um aerogerador com aerofólio cabeado na configuração pumping kite**. 2017. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

ARDUINO. **Arduino Nano**. 2021. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Acesso em: 17 de Maio de 2021.

BLAABJERG, F.; MA, K. Wind Energy Systems. **IEEE**, v. 105, n. 11, 2017. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2695485.

CAIXETA, D. A. *et al.* Maximização da potência de uma turbina eólica de velocidade variável considerando o efeito da inércia, 2011.

CHERUBINI, A. *et al.* Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. **Elsevier**, 2015.

COELHO, R. F. **Estudo Dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

DEMIRTAS, M.; SEREFOGLU, S. Design and implementation of a microcontroller-based wind energy conversion system. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, p. 1582–1595, 2014.

ENGINEERING, KOFORD. **1.30"(33mm) Slotless Brushless motor**. [S.l.], 2020. DataSheet.

HUSSAIN, J.; MISHRA, M. K. Adaptive Maximum Power Point Tracking Control Algorithm for Wind Energy Conversion Systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, n. 2, 2016.

IEA. **Renewables 2020**. International Energy Agency. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/renewable-electricity-2>. Acesso em: 27 de Abril de 2021.

IEC, International Electrotechnical Commission. **Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines**. Suíça, 2005. International Standard.

JOHNSON, G. L. **Wind Energy Systems**. Manhattan, KS: Electronic Edition, 2006.

KIEBOOM, B. V. D. **Design and Noise Study of a Low-Drag Wind Turbine for Airborne Power Applications**. 2017. Tese (Doutorado) – Technische Universiteit Delft.

KOT, R.; ROLAK, M.; MALINOWSKI, M. Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine. **Mathematics and Computers in Simulation**, p. 29–40, 2013.

LAHFAOUI, B. *et al.* Real Time Study of P&O MPPT Control for Small Wind PMSG Turbine Systems Using Arduino Microcontroller. **8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings**, 2016.

LINDEMANN, Todd. **World Without Power**. The Washington Post. 2015.

Disponível em:

<https://www.washingtonpost.com/graphics/world/world-without-power/>. Acesso em: 27 de Abril de 2021.

OLIVEIRA, M. L. C. **Airborne wind energy with tethered wings: modeling, analysis and control**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

PAPADOPOULOS, K. **Why Measure the Power Curve of a Wind Turbine?**, jun. 2018. Disponível em: <https://www.windengineering.gr/articles/why-measure-the-power-curve-of-a-wind-turbine>.

POWERSIM. **PSIM 2021A**. 2021. Disponível em:

<https://powersimtech.com/products/psim/capabilities-applications/>. Acesso em: 13 de Abril de 2021.

QUINTAS, B. J. *et al.* Um Modelo de Previsão da Potência Elétrica Extraída de uma Turbina Eólica. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 3, n. 2, p. 12–20, 2017.

RAGHEB, M.; RAGHEB, A. M. Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, 2011. DOI: 10.5772/21398.

ROZA, F. S. **A small wind generation system to the on-board control unit of an AWE system**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SALMA, V.; FRIEDL, F.; SCHMEHL, R. Improving reliability and safety of airborne wind energy systems. **Wiley**, 2019.

SCHMEHL, Roland. **Airborne Wind Energy - An introduction to an emerging technology**. AWESCO. 2019. Disponível em:  
<http://www.awesco.eu/awe-explained/>. Acesso em: 27 de Abril de 2021.

SEMICONDUCTORS, Vishay. **Three Phase Bridge Rectifier: VS-26MT, VS-36MT, Series**. [S./], 2019. DataSheet.

SIQUEIRA, Humberto Fauller de. **Panorama mundial da produção e consumo de energia elétrica e a participação do setor florestal brasileiro**. Sociedade de Investigações Florestais. 2020. Disponível em:  
<https://sif.org.br/2020/05/panorama-mundial-da-producao-e-consumo-de-energia-eletrica-e-a-participacao-do-setor-florestal-brasileiro/>. Acesso em: 27 de Abril de 2021.

SYSTEMS, A123. **Nanophosphate® High Power Lithium Ion Cell**. [S./], 2012. DataSheet.

SYSTEMS, Faulhaber Drive. **Brushless DC-Servomotors**. [S./], 2013. DataSheet.

TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.; DEKKICHE, A. A Generic Modelo for the Dynamic Simulation of Hybrid Eletric Vehicles. **IEEE**, 2007. DOI: 10.1109/VPPC.2007.4544139.

TRIVEDI, B. N.; PATEL, P. Simulation and Analysis of Wind-Solar Hybrid Energy Conversion System. **International Journal For Technological Research In Engineering**, 2018.

VENEGAS, M. S. J. **Path Optimization of a Pumping Kite System**. 2017. Diss. (Mestrado) – Delft University of Technology.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DE LEITURA DE SENSORES PARA LEVANTAMENTO DE MODELO DA MICROTURBINA EM TESTES DE TÚNEL DE VENTO.

```
1 #define currentSensorPin  A7
2 #define voltageSensorPin  A1
3 #define encoderPin        2
4 #define rpmToRad           0.10471975511966
5 #define pulses             4
6 #define interval           1000
7 #define currentOffset      2350
8 #define sensorResolution  125
9
10 /* Global Variables */
11 String comando;
12
13 int i;
14 int pulsesCounter = 0;
15
16 long timeCounter = 0;
17 long timePassed = 0;
18 long timeNew = 0;
19
20 float tensao = 0;
21 float rpm = 0;
22 float rad_s = 0;
23 float Voltage = 0;
24 float Amps = 0;
25 float voltageValue = 0;
26 float voltageFromSensor = 0;
27 float inputVoltage = 0;
28 float finalVoltage = 0;
29 float finalPower = 0;
30 float R1 = 32490.0;
31 float R2 = 6790.0;
32
33 unsigned long timeOld = 0;
34 unsigned long currentTimeValues = 0;
35 unsigned long oldTimeValues = 0;
36
37
38 void setup()
39 {
```

```
40 Serial.begin(9600);
41 pinMode(encoderPin, INPUT);
42 pinMode(currentSensorPin, INPUT);
43 pinMode(voltageSensorPin, INPUT);
44 attachInterrupt(0, encoderRead, HIGH);
45 }
46
47 void calcValues()
48 {
49     currentTimeValues = millis();
50     voltageValue = voltageValue + analogRead(currentSensorPin);
51     voltageFromSensor = analogRead(voltageSensorPin);
52     if(currentTimeValues - oldTimeValues > interval)
53     {
54         voltageValue = voltageValue / 7812.5; // a cada 1000 ms,
55         chama-se a funcao 7812,5 vezes
56         Voltage = (voltageValue / 1024.0) * 4700;
57         Amps = ((Voltage - currentOffset) / sensorResolution); //
58         Retorna o valor da amperagem
59         Amps = ((Amps + 8.8) / 0.56);
60         if(Amps < 0)
61             Amps = 0;
62
63         inputVoltage = (voltageFromSensor * 5.0) / 1024.0;
64         finalVoltage = ((inputVoltage / (R2 / (R1 + R2))) * 0.95) -
65             0.09; // divisor de tensao
66         finalPower = (finalVoltage * Amps);
67     }
68 }
69
70 void encoderRead()
71 {
72     pulsesCounter++;
73 }
74
75 void calcRpm()
76 {
77     if(millis() - timeOld >= interval)
78     {
79         detachInterrupt(0);
80         timeOld = millis();
81     }
82 }
```

```
79     rpm = (60 * pulsesCounter) / pulses;
80     rad_s = rpm * rpmToRad;
81     comando = String(rad_s,2) + " " + String(Amps,3) + " " +
            String(finalVoltage,3) + " " + String(finalPower,3);
82     Serial.println(comando);
83     pulsesCounter = 0;
84     attachInterrupt(0, encoderRead, HIGH);
85 }
86 }
87
88 void loop()
89 {
90     calcValues();
91     calcRpm();
92 }
```

## APÊNDICE B – PARTE DO CÓDIGO DE GERAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA E ARMAZENAMENTO DE DADOS AQUISITADOS PELO MICROCONTROLADOR EM TESTES DE TÚNEL DE VENTO.

```

1 #pragma once
2 #include <math.h>
3
4 (...)
5
6     const double DENSIDADE_AR = 1.225; // kg/m^3
7     const double RAIIO_ROTOR = 0.1; // m
8     const double PI = 3.14159265359;
9     const double areaRotor = PI * pow(RAIIO_ROTOR, 2);
10
11     int contador = 0;
12     double tensao = 0;
13     double potencia = 0;
14     double corrente = 0;
15     double velocidadeVento = 0;
16     double potenciaVento = 0;
17     double rotacao = 0;
18     double lambida = 0;
19     double Cp = 0;
20     String^ fileName;
21     StreamWriter^ sw;
22
23     private: System::Void btIniciar_Click(System::Object^
24         sender, System::EventArgs^ e) {
25         try
26         {
27             portaSerial->PortName = tbPorta->Text;
28             portaSerial->Open();
29         }
30         catch (...)
31         {
32             MessageBox::Show("Porta de comunicacao
33                 invalida", "Erro");
34             return;
35         }
36
37         timerLeituraPorta->Enabled = true;
38     }

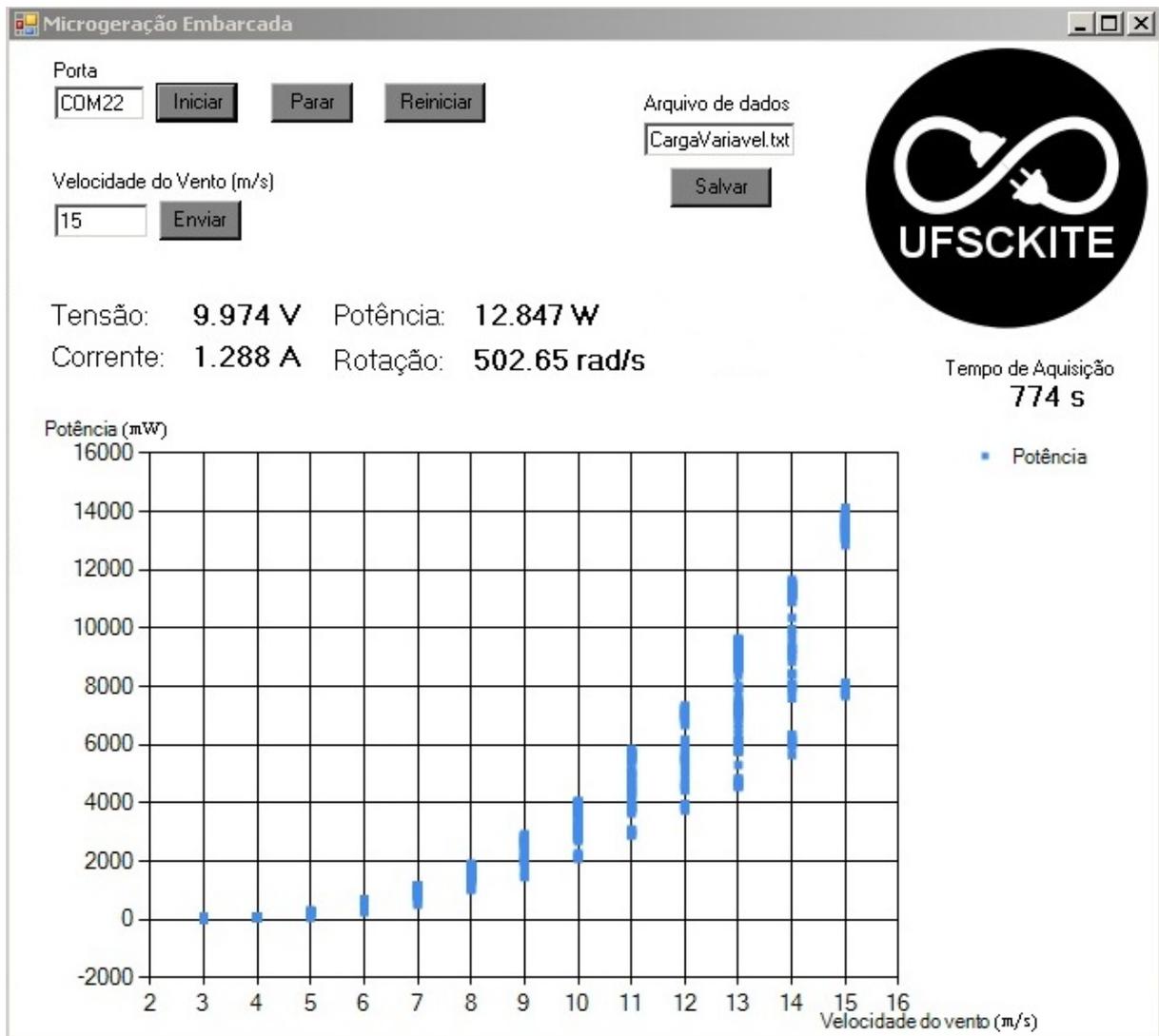
```

```
37 private: System::Void btParar_Click(System::Object^ sender,
    System::EventArgs^ e) {
38     timerLeituraPorta->Enabled = false;
39     portaSerial->Close();
40 }
41
42 private: System::Void btArquivo_Click(System::Object^ sender,
    System::EventArgs^ e) {
43     fileName = tbArquivo->Text;
44
45     try
46     {
47         sw = gcnew StreamWriter(fileName);
48     }
49
50     catch (...)
51     {
52         MessageBox::Show("Arquivo em branco", "Erro");
53         return;
54     }
55 }
56
57 private: System::Void timerLeituraPorta_Tick(System::Object^
    sender, System::EventArgs^ e) {
58     contador++;
59     String^ comando = portaSerial->ReadLine();
60     array<String^>^ substrings = comando->Split(' ');
61     try
62     {
63         lbRotacao->Text = substrings[0] + " rad/s";
64         lbCorrente->Text = substrings[1] + " A";
65         lbTensao->Text = substrings[2] + " V";
66         lbPotencia->Text = substrings[3] + " W";
67     }
68     catch (...)
69     {
70         MessageBox::Show("Falha na leitura serial", "Erro
71         ");
72         return;
73     }
74     lbTempo->Text = Convert::ToString(contador + " s");
```

```
75     rotacao = Convert::ToDouble(substrings[0]);
76     corrente = (Convert::ToDouble(substrings[1])) / 1000;
77     tensao = Convert::ToDouble(substrings[2]);
78     potencia = Convert::ToDouble(substrings[3]);
79
80     lambida = ((rotacao * RAIIO_ROTOR) / velocidadeVento) /
81             100;
82     potenciaVento = 0.5 * DENSIDADE_AR * areaRotor * pow(
83             velocidadeVento, 3);
84     Cp = potencia / potenciaVento;
85
86     graficoPotencia->Series["Potencia"]->Points->AddXY(
87             velocidadeVento, potencia);
88
89     lbLambida->Text = String::Format("{0:0.00}", lambida);
90     lbCp->Text = String::Format("{0:0.00}", Cp);
91
92     try
93     {
94         sw->WriteLine(velocidadeVento + " m/s      " +
95             lbPotencia->Text + "      " + lbCorrente->Text +
96             "      " + lbTensao->Text + "      " + lbRotacao
97             ->Text + "      " + lbCp->Text + " (Cp)      " +
98             lbLambida->Text + " (Lamb)");
99     }
100    catch (...)
101    {
102        timerLeituraPorta->Enabled = false;
103        portaSerial->Close();
104        MessageBox::Show("Erro na manipulacao do arquivo
105            de dados", "Erro");
106    }
107
108 private: System::Void btVento_Click(System::Object^ sender,
109     System::EventArgs^ e) {
110     try
111     {
112         velocidadeVento = Convert::ToDouble(tbVento->Text
113             );
114     }
115 }
```

```
107     catch (...)
108     {
109         MessageBox::Show("Valor invalido para a
110             velocidade do vento", "Erro");
111     }
112 }
113
114 private: System::Void btReiniciar_Click(System::Object^ sender,
115     System::EventArgs^ e) {
116     if (timerLeituraPorta->Enabled == false)
117     {
118         contador = 0;
119         tensao = 0;
120         corrente = 0;
121         potencia = 0;
122
123         lbTensao->Text = String::Format("{0:0.00}",
124             tensao) + " V";
125         lbCorrente->Text = String::Format("{0:0.00}",
126             corrente) + " A";
127         lbPotencia->Text = String::Format("{0:0.00}",
128             potencia) + " W";
129         lbTempo->Text = Convert::ToString(contador + " s"
130             );
131
132         graficoPotencia->Series["Potencia"]->Points->
133             Clear();
134
135         try
136         {
137             sw->Close();
138         }
139         catch (...)
140         {
141             return;
142         }
143     }
144 }
145 };
146 }
```

## APÊNDICE C – INTERFACE GRÁFICA PARA ACOMPANHAMENTO DOS ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO.



Fonte: Autor

