

INSTITUTO FEDERAL  
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Bahia

Campus  
Vitória da Conquista



# **COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - PROJETO FINAL DE CURSO - PFC**

Projeto de um Aerogerador Modelo Darrieus Tipo H  
Utilizando um Alternador Automotivo

**JORNANDO PRADO DE OLIVEIRA SANTOS**

Vitória da Conquista-BA  
21 de fevereiro de 2025

**JORNANDO PRADO DE OLIVEIRA SANTOS**

**Projeto de um Aerogerador Modelo Darrieus Tipo H  
Utilizando um Alternador Automotivo**

Pré-projeto apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, *campus* Vitória da Conquista, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. João Erivando Soares Marques

**Coorientador:** Prof. Dr. Durval de Almeida Souza

Vitória da Conquista-BA

21 de fevereiro de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS  
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

S237p Santos, Jornando Prado de Oliveira

Projeto de um aerogerador modelo darrieus tipo H utilizando um alternador automotivo / Jornando Prado de Oliveira Santos; orientador Prof. João Erivando Soares Marques; coorientador Prof. Durval Almeida Souza -- Vitória da Conquista: IFBA, 2025.

89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) -- Instituto Federal da Bahia, 2025.

1.Energia Eólica. 2.Turbinas Eólicas.  
3.Alternador. 4.Turbinas Darrieus. I.Marques, João Erivando Soares, orient. II.Souza, Durval Almeida, coorient. III. TÍTULO.

CDU:621.3



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA  
Av. Sérgio Vieira de Mello, 3150 - Bairro Zabelê - CEP 45078-900 - Vitória da Conquista - BA - www.portal.ifba.edu.br

## FOLHA DE APROVAÇÃO PFC

### PROJETO DE UM AEROGERADOR MODELO DARRIEUS TIPO H, UTILIZANDO UM ALTERNADOR AUTOMOTIVO

#### JORNANDO PRADO DE OLIVEIRA SANTOS

A presente Monografia de Projeto Final de Curso (PFC), apresentada em sessão realizada em **21 de fevereiro de 2025**, foi avaliada como adequada para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, julgada **aprovada** em sua forma final pela Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Vitória da Conquista.

#### BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Erivando Soares Marques (Orientador) - IFBA campus Vitória da Conquista

Prof. Dr. Durval de Almeida Souza (Coorientador) - IFBA campus Vitória da Conquista

Prof. Me. Luciano Ferraz dos Santos Silva - IFBA campus Vitória da Conquista

Prof. Me. Eleilson Santos Silva - IFBA campus Vitória da Conquista



Documento assinado eletronicamente por **JOAO ERIVANDO SOARES MARQUES, Membro da Unidade**, em 11/03/2025, às 10:25, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **DURVAL DE ALMEIDA SOUZA, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico - Campus Lauro de Freitas**, em 12/03/2025, às 18:11, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **ELEILSON SANTOS SILVA, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico - EBTT**, em 13/03/2025, às 16:13, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **LUCIANO FERRAZ DOS SANTOS SILVA, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico - EBTT**, em 19/03/2025, às 10:06, conforme decreto nº 8.539/2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site [http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&acao\\_origem=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **4043064** e o código CRC **56105318**.

*Dedico esta obra a Deus, o engenheiro da vida, que projetou, criou e gerencia minha existência. Expresso também minha sincera gratidão aos meus pais, irmãos, à minha namorada, às minhas tias, aos meus amigos e aos meus professores, cujo apoio e ensinamentos foram fundamentais para minha trajetória.*

*O que faz andar o barco não é a vela enfunada, mas o vento que não se vê. [Platão]*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço neste trabalho ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Bahia pelo ensino de qualidade com ótimos professores, e ao meu orientador Prof. Dr. João Erivando Soares Marques, e ao coorientador Prof. Dr. Durval de Almeida Souza pelo empenho, dedicação e parceria durante a realização desse trabalho. Agradeço à minha mãe, Ivete de Jesus Prado, pelo amor que me dedicou e pelos sacrifícios que fez para que eu pudesse estudar e estar realizando mais esta etapa da minha vida. Agradeço ao meu pai Vitorio de Oliveira Santos Neto, pelo exemplo de honestidade e integridade. Agradeço às minhas tias Nilzelene e Cila, por terem me apoiado nos meus estudos. Agradeço a minha irmã Jamile exemplo de que podemos realizar nosso sonhos através dos estudos, e ao meu irmão Joaquim pela amizade e apoio. Agradeço à minha namorada, Ranicele, pelo amor, apoio e incentivo na realização desse trabalho e na jornada acadêmica. Quero agradecer aos meus amigos: João Pedro, Ricardo e Antônio Lucas que me acompanha desde o colégio, a Breno, Tifane, Willomar, Antonio, Gabriel, Gustavo, Heitor, Edson, Edmundo, Breenda e Anderson, a esses amigos agradeço pela amizade e apoio.

# RESUMO

O crescente aumento do consumo de energia elétrica pela humanidade, associado ao limite de geração das fontes tradicionais (hidrelétrica e termelétrica) e à demanda por fontes mais sustentáveis, faz surgir a necessidade de procurar novas fontes de energia elétrica. Duas alternativas que têm se destacado são: a energia eólica e a energia solar. A energia proveniente dos ventos já faz parte da história da humanidade há milhares de anos, sendo usada para mover moinhos, embarcações e no bombeamento de água, antes mesmo do uso da eletricidade. Nesse contexto, este trabalho se insere, com o objetivo de projetar um aerogerador de pequeno porte, que possa ser reproduzido sem a necessidade de grandes recursos. O aerogerador projetado é composto por: uma turbina tipo Darrieus-H, a qual foi modelada matematicamente e projetada, porém não foi implementada na prática. Utiliza-se, como gerador elétrico, um alternador automotivo como gerador elétrico, que foi escolhido por ser de fácil acesso, podendo ser encontrado em lojas automotivas e em ferro-velhos. Além disso, foi feito um modelo no software Simulink com objetivo observar o comportamento do aerogerador e poder fazer uma análise mais detalhada. O trabalho conseguiu entregar um projeto da turbina com todas as dimensões necessárias para sua construção. Também foi possível fazer ensaios no alternador, nos quais foram determinados os parâmetros elétricos necessários. A simulação demonstrou ser muito útil para detectar problemas existentes e melhorias que podem ser feitas no projeto. O projeto de um aerogerador modelo Darrieus tipo H, utilizando um alternador, mostrou-se eficaz na geração de energia, porém melhorias podem ser feitas.

**Palavras-chave:** Turbina eólica, Darrieus, energia, alternador, modelagem.

# ABSTRACT

The increasing electricity consumption by humanity, associated with the generation limit of traditional sources (hydroelectric and thermoelectric) and the demand for more sustainable sources, creates the need to look for new sources of electrical energy. Two alternatives that have stood out are: wind energy and solar energy. Energy from winds has been part of human history for thousands of years, being used to move mills, boats and pumping water even before the use of electricity. In this scenario, this work is inserted, with the objective of designing a small wind turbine, which can be reproduced without the need for large resources. The designed wind turbine consists of: a Darrieus-H type turbine, which was mathematically modeled and designed, but was not implemented in practice. And an automotive alternator as an electrical generator, which was chosen because it is easy to access and can be found in automotive stores and junkyards. Furthermore, a model was created in the Simulink software with the aim of observing the behavior of the wind turbine and being able to carry out a more detailed analysis. The work managed to deliver a turbine project with all the dimensions necessary for its construction. It was also possible to carry out tests on the alternator, in which the necessary electrical parameters were determined. Simulation has proven to be very useful for detecting existing problems and improvements that can be made to the project. The design of a Darrieus type H wind turbine, using an alternator, proved to be effective in generating energy, but improvements can be made.

**Keywords:** Wind turbine, Darrieus, energy, alternator, modeling.

# Lista de Figuras

2.1	Etapas da energia eólica. . . . .	6
2.2	Capacidade eólica instalada acumulada em todo o mundo de 2001 a 2023. . . . .	7
2.3	Matriz Elétrica Brasileira . . . . .	7
2.4	Geração eólica por região. . . . .	8
2.5	Turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) e a turbina eólica de eixo vertical (TEEV). . . . .	10
2.6	Turbina projetada por Darrieus. . . . .	10
2.7	Configurações de turbina eólica de eixo vertical (TEEV). . . . .	11
2.8	Rotor Savonius. . . . .	12
2.9	Perfil aerodinâmico. . . . .	14
2.10	Nomenclatura da NACA de 4 dígitos. . . . .	15
2.11	Classificadas das máquinas rotativas. . . . .	18
2.12	Vista esquemática de um gerador síncrono monofásico com um único enrolamento e dois polos. . . . .	19
2.13	Vista explodida de um alternador automotivo. . . . .	20
2.14	Rotor com campo bobinado. . . . .	21
2.15	Estator . . . . .	21
2.16	Esquema de ligação trifásico . . . . .	21
2.17	Retificado trifásico do alternador. . . . .	21
2.18	Circuito elétrico do alternador. . . . .	22
2.19	Modelo elétrico do alternador. . . . .	23
2.20	Modelo elétrico por fase do alternador. . . . .	23
2.21	Geometria do rotor- estator. . . . .	25
2.22	Geometria da garra. . . . .	25
2.23	Comportamento das correntes. . . . .	26
3.1	Polos do alternador, vista frontal . . . . .	32
3.2	Polos do alternador, vista lateral . . . . .	32
3.3	As dimensões da turbina e o perfil aerodinâmico da pá . . . . .	34
3.4	Turbina projetada . . . . .	35

3.5	Bancada confeccionada para os ensaios . . . . .	35
3.6	Representação do circuito montado para o ensaio a vazio . . . . .	36
3.7	Representação do circuito montado para o ensaio em curto-circuito . . . . .	37
3.8	Representação do circuito montado para medir a resistência do estator . . . . .	38
3.9	Diagrama do modelo do aerogerador. . . . .	38
3.10	Curvas do $C_p$ em função do $\lambda$ para alguns valores de $\sigma$ . . . . .	39
3.11	Diagrama do modelo da turbina eólica. . . . .	40
3.12	Diagrama do modelo do alternador automotivo. . . . .	41
3.13	Entrada e saída do controlador fuzzy. . . . .	42
3.14	Diagrama do modelo do drive train. . . . .	43
3.15	Diagrama do modelo das perdas de potência. . . . .	45
3.16	Diagrama do modelo da bateria. . . . .	48
4.1	Tensão induzida no estator em função do rotação, para as 3 corrente de campo. . . . .	50
4.2	Coeficiente de máquina em função da velocidade angular. . . . .	50
4.3	Corrente cc em função da tensão cc no estator. . . . .	51
4.4	Corrente cc em função da tensão cc no campo. . . . .	52
4.5	Indutância do estator em função da velocidade angular . . . . .	53
4.6	Sinal representando a velocidade de vento . . . . .	53
4.7	Potência gerada pela turbina, potência gerada pelo alternador e potência perdida . . . . .	54
4.8	Velocidade angular da turbina, velocidade angular mecânica e velocidade angular do alternador . . . . .	54
4.9	Torque mecânico, torque elétrico e torque correspondente às perdas . . . . .	55
4.10	Composição da potência perdida no aerogerador . . . . .	55
4.11	Sinal da tensão no estator e de tensão retificada. . . . .	56
4.12	Sinal da corrente gerada pelo estator e a corrente fornecida ao campo. . . . .	56

# Lista de Tabelas

2.1	Classificação de aerogeradores e dimensionamento típico . . . . .	9
3.1	Dados do alternador . . . . .	32
3.2	Dados usados na simulação da turbina . . . . .	41
3.3	Dados usados na simulação do alternador . . . . .	43
3.4	Dados usados na simulação da drive train. . . . .	44
3.5	Dados usados na simulação das perdas de potência . . . . .	47
3.6	Dados usados na simulação das perdas de potência . . . . .	48
4.1	Dados da simulação para uma velocidade de vento 8 m/s . . . . .	57

# Lista de Códigos

A.1	Código para dimensionar a turbina . . . . .	65
B.1	Código MATLAB parâmetros . . . . .	68

# Glossário: Símbolos e Siglas

Notação	Descrição	Páginas
$AR$	Razão de aspecto da turbina;	13, 31
$B$	Densidade de fluxo magnético (T) ;	24
$C_P$	Coeficiente de potência;	12–14, 31, 39, 40
$E_c$	Energia cinética (J);	69
$E_s$	Tensão eficaz do gerador (V);	22, 27, 42, 43, 50
$I_f$	Corrente do campo do rotor (A);	25, 26, 36, 42, 44, 50
$I_p$	Corrente de pico do estator (A);	27
$I_s$	Corrente do estator (A);	27, 43, 44
$I_{dc}$	Corrente média retificada (A);	27, 46
$K_{enr}$	Fator de enrolamento;	24
$L_S$	Indutância do enrolamento (H);	24, 36
$MST$	Modelo de Tubos Múltiplos de Fluxo ;	14
$N_P$	Número de pás;	16
$N_{campo}$	Número de espiras do campo;	25
$N_{fase}$	Número de espiras por fase;	24
$P_w$	Potência eólica captada pela turbina (W)	17

<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Páginas</b>
$P_{ret+cu}$	Potência perdida no retificador e no cobre do estator (W);	27
$Polos$	Número de polos da máquina elétrica;	24
$R$	Raio da turbina (m);	12, 13, 16, 33
$R_s$	Resistência do estator ( $\Omega$ );	22, 27, 28
$V_d$	Queda de tensão do diodo (V);	27
$V_o$	Velocidade do vento em fluxo livre (m/s);	12
$V_{dc}$	Tensão média retificada (V);	22, 27, 28, 42, 46, 47
$X_s$	Reatância do estator ( $\Omega$ );	22, 24
$\Phi_p$	Fluxo de entreferro por polo (Wb);	24
$\alpha_p$	Relação entre a largura média do polo e o passo do polo;	25
$\hat{I}_a$	Corrente gerada (A);	23
$\hat{V}_a$	Tensão fornecida do gerador ao retificador (A);	23
$\lambda$	Taxa de velocidade da ponta;	13, 14, 16, 31, 39, 40
$\mathcal{T}$	Torque ( $N \cdot m$ );	17
$\mu_o$	Permeabilidade do entreferro;	25
$\omega_e$	Velocidade angular elétrica (rad/s);	20, 24
$\omega_g$	Velocidade angular mecânica do eixo do gerador (rad/s);	20, 22, 36, 46
$\omega_m$	Velocidade angular mecânica da turbina (rad/s);	14, 17, 26
$\phi$	Fase da onda;	27
$\rho$	Densidade do ar ( $kg/m^3$ );	12

<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Páginas</b>
$\sigma$	Solidez do rotor;	14, 16, 31
$\tau_p$	Passo de polo (mm);;	24
$\theta$	Ângulo de passo;	39
$c$	Corda da pá (m);	15, 16, 34
$h$	Tamanho da pá (m);	12, 13, 33
$i_a$	Corrente da fase a (A);	26, 27
$i_b$	Corrente da fase b (A);	26, 27
$i_c$	Corrente da fase c (A);	26, 27
$i_{dc}$	Corrente retificada (A);	26, 27
$k_M$	Parâmetro de máquina ( $V \cdot s / (rad \cdot A)$ );	26, 36, 50
$k_c$	Fator carter;	25
$k_s$	Nível de saturação;	25
$l_g$	Comprimento do entreferro (mm);	25
$l_s$	Comprimento da pilha do estator (mm);	24
$m$	Massa do ar(kg);	69
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	4, 8, 9
CA	Corrente Alternada;	20, 22
CC	Corrente contínua;	19, 20, 27, 36
GD	Geração Distribuída;	2, 8
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics;	14, 15, 31, 34, 39

<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Páginas</b>
TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal;	9, 10
TEEV	Turbina eólica de eixo vertical;	9, 10, 39

# Sumário

<b>Folha de Rosto</b> . . . . .	<b>ii</b>
<b>Ficha Catalográfica</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>Folha de Aprovação</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>Resumo</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>Lista de Códigos</b> . . . . .	<b>xii</b>
<b>Glossário: Símbolos e Siglas</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Introdução do Trabalho . . . . .	1
1.2 Objetivo Geral . . . . .	2
1.2.1 Objetivos Específicos . . . . .	3
1.3 Delimitação do Tema . . . . .	3
1.4 Justificativa . . . . .	4
1.5 Organização . . . . .	4
<b>2 Referencial Teórico</b> . . . . .	<b>6</b>
2.1 Energia Eólica . . . . .	6
2.2 Geração Distribuída – GD . . . . .	8
2.3 Turbinas eólicas de pequeno porte . . . . .	9
2.4 Dimensionamento da turbina Darrieus tipo H . . . . .	12
2.4.1 Dimensionamento do rotor da turbina . . . . .	12
2.4.2 Dimensionamento das pás . . . . .	14

2.4.3	Dimensionamento do <i>drive train</i> . . . . .	16
2.5	Emprego de Geradores em Sistemas Eólica . . . . .	18
2.5.1	Modelo matemático do alternador automotivo . . . . .	22
2.5.2	Modelo matemático do retificador . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Metodologia e Materiais</b> . . . . .	<b>29</b>
3.1	Objeto de estudo . . . . .	29
3.2	Tipo de pesquisa empregada . . . . .	30
3.3	Materiais . . . . .	30
3.3.1	Dados Gerais da turbina Darrieus tipo H . . . . .	31
3.3.2	Dados do alternador automotivo . . . . .	31
3.4	Metodologia . . . . .	32
3.4.1	Procedimentos metodológicos para o dimensionamento da tur- bina Darrieus tipo H . . . . .	33
3.4.2	Procedimentos metodológicos para ensaio do alternador Lun- dell . . . . .	35
3.4.2.1	Ensaio a vazio . . . . .	36
3.4.2.2	Ensaio em curto-circuito . . . . .	36
3.4.2.3	Ensaio para determinar as resistências . . . . .	37
3.4.3	Procedimentos metodológicos para modelagem do sistema de geração . . . . .	38
3.4.3.1	Modelagem da turbina eólica . . . . .	39
3.4.3.2	Modelagem do alternador automotivo . . . . .	41
3.4.3.3	Modelagem do <i>drive train</i> . . . . .	43
3.4.3.4	Modelagem das perdas de potência . . . . .	44
3.4.3.5	Modelagem da bateria . . . . .	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>49</b>
4.1	Análise dos resultados dos ensaios em laboratório . . . . .	49
4.1.1	Resultados dos ensaios a vazio . . . . .	49
4.1.2	Resultados dos ensaios para determinar as resistências do es- tator e do campo . . . . .	51
4.1.3	Resultados dos ensaios de curto-circuito . . . . .	52
4.2	Análise dos resultados de simulação . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b> . . . . .	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b> . . . . .	<b>61</b>

---

<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>62</b>
<b>A Código para dimensionar a turbina</b> . . . . .	<b>65</b>
<b>B Código MATLAB parâmetros</b> . . . . .	<b>68</b>
B.1 Demonstração da formula da potência na turbina . . . . .	69

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Introdução do Trabalho

O consumo de energia elétrica vem registrado um crescimento significativo nos últimos anos. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, [EPE \(2024\)](#), o Brasil, em 2023, obteve um aumento de 5,2% no consumo final de eletricidade. Esse crescimento é impulsionado por fatores como a densificação urbana, a proliferação de dispositivos eletrônicos e o aumento da automação residencial e industrial. Ainda segundo a [EPE \(2024\)](#), os setores que tiveram as maiores contribuições em termos absolutos foram o residencial, com um aumento de 14,1 TWh (+9,1%), o comercial, com um incremento de 6,9 TWh (+7,1%), o industrial, que cresceu em 5,7 TWh (+2,6%), e o setor agropecuário, que teve um aumento de 1,5 TWh (+4,6%).

Para enfrentar esses desafios, tem-se investido em fontes de energia renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica, para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e das fontes hídricas. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias, [ABEEólica \(2024\)](#), o investimento no setor eólico em 2023 foi de R\$22,17 bilhões, mostrando que a energia eólica é uma ótima forma de produção de energia elétrica. Esse comportamento também tem sido observado em por outros países como os Estados Unidos, a China e por países da Europa.

O Brasil é cortado por linhas de transmissão em todo o seu território, garantindo um fornecimento de energia elétrica a quase toda a população brasileira. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, [IBGE \(2023\)](#), em 2022, o acesso à energia elétrica é praticamente universal, com a Região Norte apresentando a maior porcentagem de domicílio sem acesso à energia elétrica, cerca de

3,3%. Mesmo essa porcentagem sendo pequena e a situação nas outras regiões sendo bem melhor como, por exemplo, a região Sudeste que apresenta 0,2% dos domicílios sem acesso à rede geral, esse número deve ser melhorado.

Nos dias atuais, a microgeração distribuída está em alta, principalmente com a geração solar. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica, [ANEEL \(2024a\)](#), a microgeração é uma geração distribuída (GD), com potência instalada de até 75 kW, podendo ser instalada pelo Grupo B ou pelo Grupo A. A GD é a produção de energia elétrica próximo ao consumidor, que pode ser gerada pelo próprio consumidor. Embora não seja um conceito novo; até os anos 1940, a energia era gerada próximo aos locais das indústrias.

A GD foi impulsionada pela crise do petróleo, que tornou o uso da termelétrica mais caro, e a reforma do setor elétrico brasileiro, que permitiu investimento privado. Com a GD, a eficiência energética obteve aumento expressivo, já que a energia gerada é consumida no local, e maior segurança energética (Instituto Nacional de Eficiência Energética, [INEE \(2024\)](#)). A microgeração foi regulamentada no Brasil em 2012 com Resolução Normativa 482/12 da ANEEL, que permitia o brasileiro gerar sua própria energia elétrica de fontes renováveis ou cogeração qualificada.

Embora a geração de energia eólica tenha crescido significativamente, grande parte dela é proveniente de grandes aerogeradores que requerem altos investimentos, tornando-os inacessíveis para muitos consumidores finais e não participando muito do cenário da microgeração distribuída.

Neste contexto, este trabalho visa projetar um aerogerador de pequeno porte, destinado a GD ou no fornecimento de energia em locais sem acesso à rede. O objetivo é que ele possa ser instalado em pequenas áreas e seja financeiramente acessível, favorecendo assim a autonomia energética e contribuindo no cenário da microgeração distribuída. Também será estudado e analisado um gerador elétrico, a princípio foi escolhido um alternador automotivo para testar a sua viabilidade como gerador no sistema eólico.

## 1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal projetar um aerogerador de pequeno porte, utilizando uma turbina Darrieus tipo H associada a um alternador

automotivo. O intuito é disponibilizar um projeto que possa ser utilizado na microgeração distribuída contribuindo, assim, para o desenvolvimento energético brasileiro.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- 1) Projetar uma turbina Darrieus do tipo H com auxílio do software Matlab;
- 2) Desenvolver o modelo matemático da turbina e do gerador elétrico para simulação computacional no Matlab/Simulink;
- 3) Fazer uma comparação de desempenho entre o modelo computacional e o alternador real;
- 4) Testar em bancada o desempenho do gerador (alternador automotivo);
- 5) Validar os resultados simulados, comparando-os com os resultados práticos.

## 1.3 Delimitação do Tema

Este trabalho é focado no desenvolvimento de um projeto de um aerogerador de pequeno porte, que possa ser usado na microgeração distribuída ou em sistemas off-grid. O presente trabalho ficará restrito ao projeto do aerogerador em si; não serão analisadas as características do vento onde o aerogerador possa ser instalado, nem tampouco sobre a conexão com a rede.

Um aerogerador pode ser dividido em duas partes: a turbina responsável por captar a energia cinética do vento e o gerador elétrico que transforma a energia transmitida pela turbina em eletricidade. Para a primeira parte, será feito o projeto de uma turbina Darrieus tipo H e um modelo matemático no software Simulink. Já para a segunda parte, será utilizado um alternador automotivo como gerador, o qual será modelado matematicamente no software Simulink e ensaiado em laboratório.

## 1.4 Justificativa

O consumo de energia elétrica tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, o que resultou no aumento do valor do kWh, aliado à crescente necessidade de uma geração mais limpa. Surge, então, a necessidade de produzir mais energia a partir de fontes renováveis. O Brasil sempre se destacou por sua geração baseada em hidrelétricas, consideradas uma fonte renovável, e tem avançado na implementação de energia eólica e solar em sua matriz energética, com grandes usinas espalhadas pelo país.

Com a Resolução Normativa 14.300/2022 da [ANEEL](#), que permitiu o consumidor gerar sua própria eletricidade através da microgeração distribuída, o número de micro usinas apresentou um aumento expressivo no Brasil. No entanto, no caso da energia eólica, não se observa esse aumento expressivo, como ocorre com a energia solar, sendo que quase toda a produção eólica está concentrada em grandes usinas, pertencentes ao governo e a grandes empresas.

Essa deficiência pode ser atribuída à indústria de geração eólica de pequeno porte, que é quase inexistente no Brasil. Isso torna os produtos disponíveis no mercado caros o que desestimula o uso dessa forma de geração de energia. Existem algumas pessoas que se aventuram a fabricar pequenos aerogeradores de forma artesanal, mas, sem o conhecimento técnico necessário, esses produtos não atingem seu potencial esperado, apresentando baixa eficiência.

Diante desse cenário, este trabalho procura desenvolver um projeto de um aerogerador de eixo vertical, modelo Darrieus-H, acoplado a um alternador automotivo, utilizando conhecimentos de engenharia para otimizar o projeto ao máximo. Assim, pretende-se entregar um projeto que seja de fácil replicabilidade e que proporcione ótimos resultados na geração de eletricidade.

## 1.5 Organização

Esse trabalho é dividido em 5 seções. A seção 1 trata de uma introdução do tema estudado, onde é exposto um breve texto sobre o tema, os objetivos deste trabalho, a delimitação do tema e a justificativa.

Na seção 2 trata da fundamentação teórica, onde é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema abordando o cenário atual da energia eólica no mundo e

no Brasil, um pouco da sua história, modelos de turbinas existentes e geradores elétricos usados em sistemas eólicos. Também será tratada o equacionamento matemático.

Na seção 3, são descritas as ferramentas, os procedimentos e as estratégias utilizadas no trabalho. Nessa seção, é descrito o dimensionamento da turbina, incluindo os cálculos e critérios usados para determinar suas características principais. Também são descritos os ensaios realizados em laboratório no alternador automotivo, como objetivo de identificar algumas características elétricas. Por último, é apresentado e descrito o modelo do aerogerador feito no software Simulink, incluindo os submodelos que o compõem.

Na seção 4 é descrito os resultados obtidos nos testes feitos no gerador em laboratório e os resultados da simulação no Simulink.

Na seção 5 é feita uma conclusão onde é discutido os resultados obtidos no trabalho. A seção é finalizada com algumas sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Referencial Teórico

A energia eólica já é usada pela humanidade há milhares de anos, para mover barcos e moinhos. Inicialmente usada no Oriente, logo se espalhou, chegando à Europa, provavelmente através das cruzadas no século XI. Na Europa, foram criadas novas aplicações, como serrarias e bombas d'água. Com o surgimento da máquina a vapor, a energia eólica foi perdendo popularidade. E voltando ao cenário energético, como uma das principais geradoras de energia elétrica atualmente, devido às crises do petróleo e a questões ambientais (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2021).

### 2.1 Energia Eólica

A energia eólica é a energia provinda dos ventos, que pode ser transformada em energia mecânica e posteriormente em elétrica. A energia cinética presente nos ventos é captada pelas pás da turbina e convertida em energia mecânica que é transmitida ao gerador elétrico que por sua vez transforma essa energia em energia elétrica, que será consumida por uma carga, conforme pode ser visto na Figura 2.1.

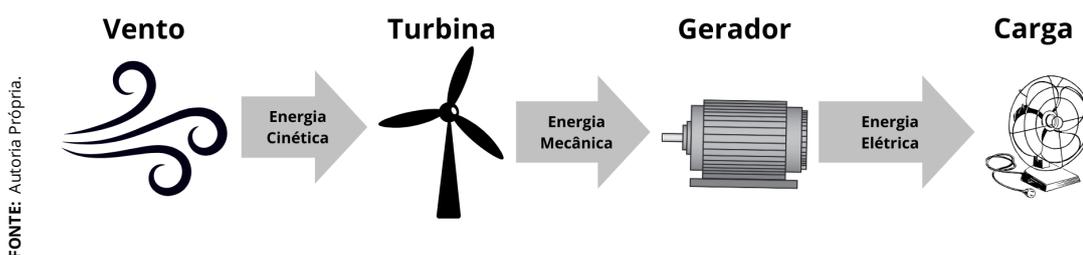
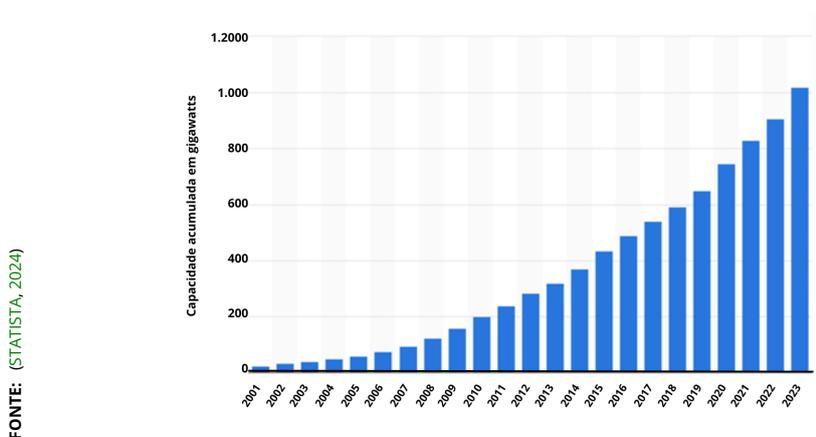


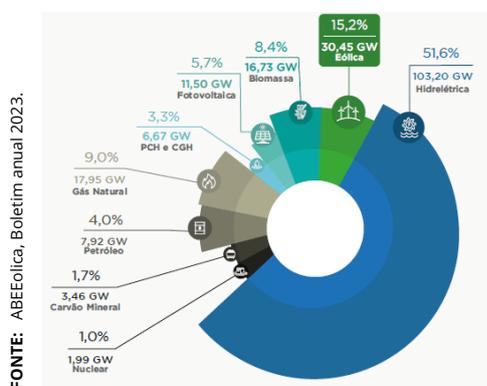
Figura 2.1 – Etapas da energia eólica.

A produção de energia eólica no cenário mundial tem apresentado significativo aumento nos últimos anos, como pode ser visto na Figura 2.2. Segundo Conselho Global de Energia Eólica, GWEC (2024), 116,6 GW produzidos pela energia eólica foram adicionados na rede elétrica no mundo todo em 2023, um aumento de 50% em relação ao ano anterior, batendo um novo recorde de 1.021 GW de capacidade acumulada. Os países que mais investiram em novas instalações, representando 85% do mercado mundial, foram China, EUA, Brasil, Alemanha e Índia.



**Figura 2.2** – Capacidade eólica instalada acumulada em todo o mundo de 2001 a 2023.

Como já foi falado anteriormente, o Brasil tem se destacado no mundo na geração de energia eólica, sendo o segundo país que mais instalou usinas eólicas no mundo em 2023, com um investimento que chega a R\$ 22,18 bilhões ABEEólica (2024), consolidando a geração eólica como fonte fundamental do país. Com isso, a energia eólica ocupa a segunda posição no ranking nacional de geradora de energia elétrica, atrás somente da geração hídrica, conforme a Figura 2.3.



**Figura 2.3** – Matriz Eléctrica Brasileira

O primeiro aerogerador instalado no Brasil foi em 1992 na ilha de Fernando

de Noronha, uma parceria entre Brasil e Dinamarca. Já no final de 1999, foi instalada a primeira usina eólica no país, no estado de Ceará com a capacidade 5 MW (GOUVÊA; SILVA, 2018). Desde então, o número de usinas tem aumentado expressivamente no Brasil. O país possuía até o fim de 2023, um total de 1.027 parques eólicos, com potência instalada de 30,45 GW (ABEEólica, 2024). Boa parte deles se encontra na região Nordeste, onde as condições de ventos são favoráveis, como pode ser visto na Figura 2.4.

FONTE: ABEEólica, Boletim anual 2023

Região	2022		2023		% de crescimento
	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	
Sudeste	0,06	0,1%	0,06	0,1%	-7%
Sul	5,95	7,6%	5,50	6,1%	-8%
Nordeste	70,48	90,3%	83,52	92,0%	19%
Norte	1,59	2,0%	1,72	1,9%	8%
Total	78,08	100%	90,80	100%	16,3%

Figura 2.4 – Geração eólica por região.

## 2.2 Geração Distribuída – GD

A geração distribuída (GD), é a geração de energia elétrica no local do consumo ou nas proximidades, utilizando fontes renováveis, como: eólica, solar e hídrica. Diferente da geração centralizada, caracterizada por grandes usinas como Itaipu, a GD apresenta usinas de pequena potência, já que ela deve gerar somente a potência que será consumida naquele local, geralmente uma fábrica ou uma residência.

A geração distribuída é dividida em duas faixas de potência, a microgeração e minigeração distribuídas, segundo a Resolução Normativa ANEEL n° 14.300/2022. Essa resolução determina que a microgeração distribuída deve possuir potência instalada de até 75 kW. Já a minigeração distribuída deve estar entre 75 kW a 3 MW, podendo ser até 5 MW em certos casos (ANEEL, 2024a).

O Brasil em 2023 possuía mais de 2,3 milhões de sistemas de geração distribuída, totalizando 25,8 GW de potência instalada (Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL (2024b)). Esses números representam um novo comportamento no cenário energético brasileiro. Comportamento criado devido ao aumento do valor do kWh e à acessibilidade a sistemas fotovoltaicos, que incentivou vários consumidores a instalarem cada vez mais usinas de geração distribuída. Porém, essas usi-

nas podem gerar alguns problemas nas redes de distribuição como: sobrecarga de equipamentos, harmônicas e desequilíbrio de tensão. Diante desses problemas, a ANEEL tem criado novas resoluções para controlar a liberação de novas instalações, onde permite à concessionária delimitar a potência instalada de novas usinas nas redes onde já possui outras em operação.

## 2.3 Turbinas eólicas de pequeno porte

Aerogeradores são equipamentos compostos por várias partes (como turbina e gerador elétrico), que transformam energia cinética provinda do vento em energia elétrica, podendo ser de vários tamanhos, a depender principalmente da potência desejada. Na Tabela 2.1 é feita uma classificação dos aerogeradores segundo o porte.

**Tabela 2.1** – Classificação de aerogeradores e dimensionamento típico

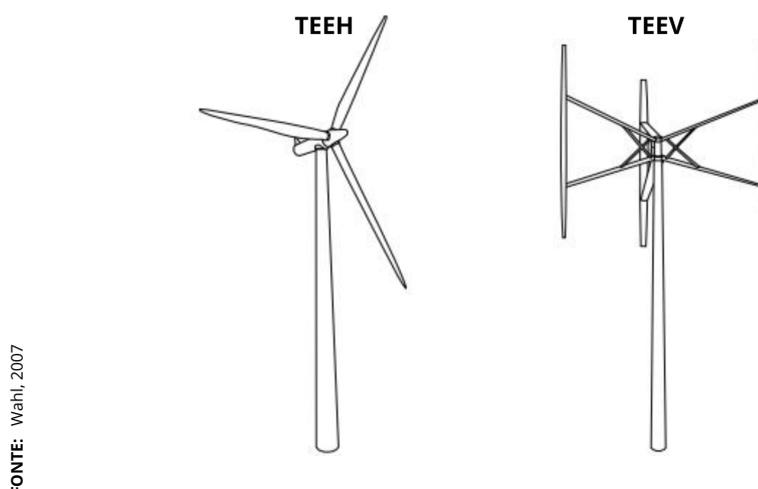
Classe	Potência (kW)	Massa (kg)	Diâmetro (m)	Altura (m)
Aerogerador Industrial	>500	>40000	>45	>50
Aerogerador pequeno	<500	<40000	<45	<50
Aerogerador médio	<100	<9000	<20	< 35
Mini-aerogerador	<30	<1000	<15	< 25
Micro-aerogerador	<1	<50	<3	<10

FONTE: Lütz (2006) baseado em LEHMANN, KOENEMANN 2005.

Basicamente, um aerogerador é composto por: pás que são responsáveis por capturar a energia cinética do vento, eixo de transmissão que transmite o movimento das pás para o gerador; este que por sua vez converte a energia mecânica em elétrica, e por fim a torre, que serve de base e é responsável por elevar as pás.

Ao longo dos anos, as turbinas eólicas foram sofrendo alterações, o que fez surgir diferentes configurações, como a turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) e a turbina eólica de eixo vertical (TEEV), Figura 2.5.

Nas turbinas de eixo horizontal, as pás giram perpendiculares à direção do vento. Podendo ser de uma, duas, três (essa sendo a mais comum) ou múltiplas, elas são mais eficientes que as de TEEV, sendo uma melhor opção para grandes turbinas. Porém, uma desvantagem é que as pás devem estar na direção do vento, necessitando de um sistema de orientação, o que acrescenta custos financeiros e



FONTE: Wahi, 2007

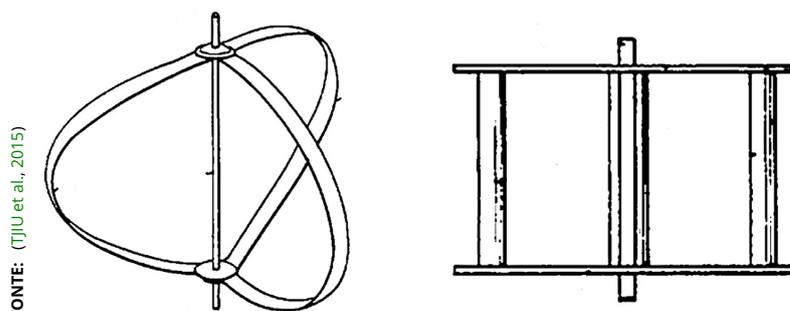
**Figura 2.5** – Turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) e a turbina eólica de eixo vertical (TEEV).

complexidade a uma TEEH, (JUNIOR, 2022).

Já nas turbinas de eixo vertical, as pás giram no mesmo plano que o vento, também podem ter várias configurações de números de pás. A principal vantagem é não necessitar de um sistema de orientação, já que suas pás giram na mesma direção do vento, independente do sentido dele. Isso torna as TEEV muito mais simples e baratas, sendo vantajoso em aplicações de turbinas de pequeno porte. Outra vantagem é que as TEEV geram menos ruídos, o que é um grande problema gerado pelas TEEH, (AMARAL, 2011);(JUNIOR, 2022).

Muitas variações de turbinas de eixo vertical foram desenvolvidas ao longo do tempo. As mais conhecidas são a Darrieus (e suas variações) e a Savonius.

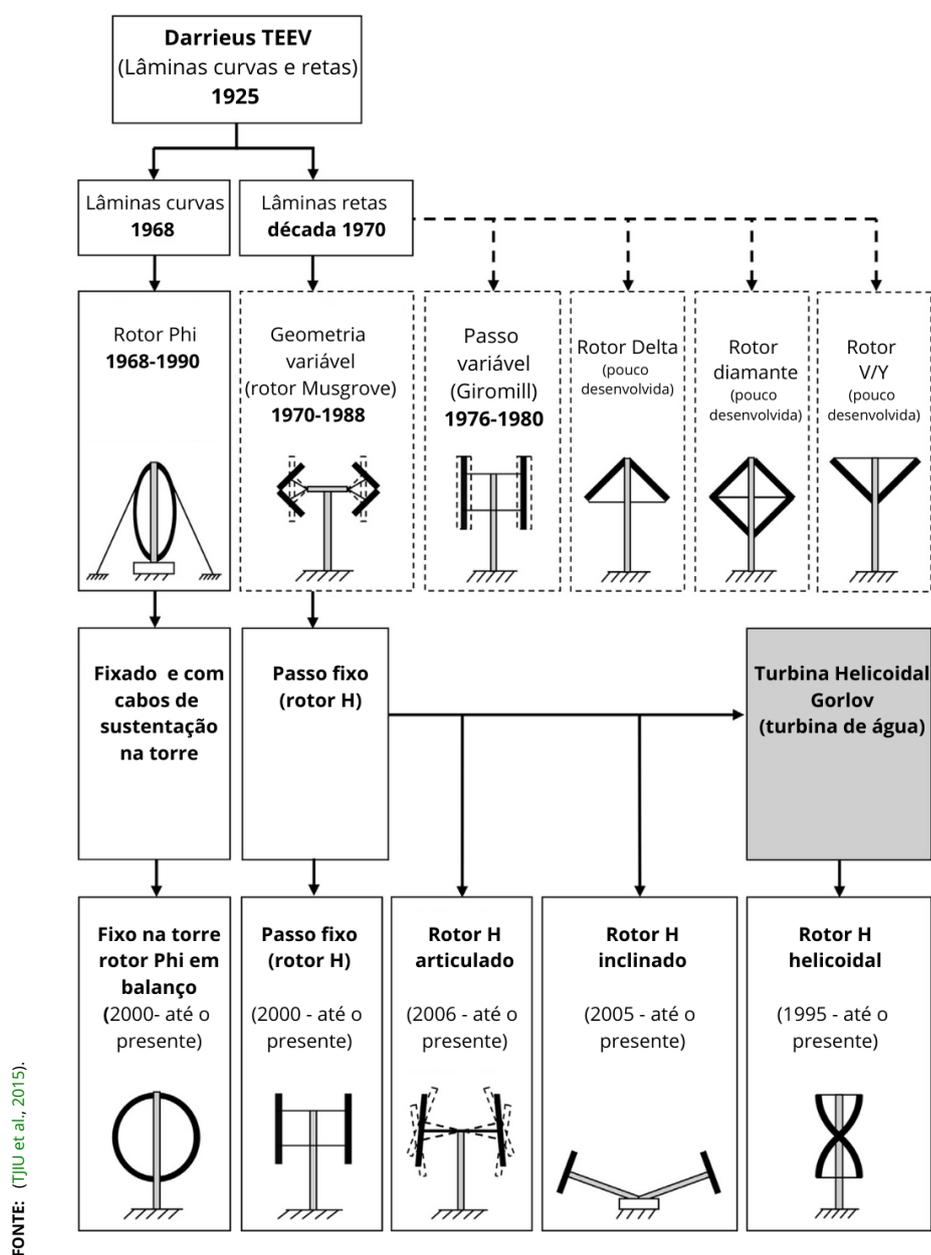
Georges Jean Marie Darrieus foi um engenheiro aeronáutico francês, que desenvolveu o rotor Darrieus em 1925. Esse rotor apresentava dois modelos, um com as pás curvas e outro com as pás retas, como pode ser visto na Figura 2.6 (TJIU et al., 2015).



FONTE: (TJIU et al., 2015)

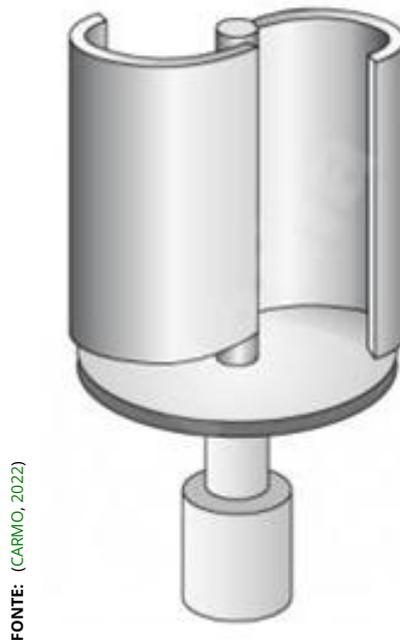
**Figura 2.6** – Turbina projetada por Darrieus.

A partir desses dois modelos, outros foram surgindo, como mostrado na Figura 2.7. Os modelos que se destacaram foram o rotor Phi, Musgovre, Giromill, rotor - H e o rotor - H helicoidal. Algumas empresas criaram protótipos de grande porte desses modelos, porém, devido a problemas estruturais, não alcançaram êxito comercial, limitando as turbinas Darrieus a pequeno porte, (TJIU et al., 2015).



**Figura 2.7** – Configurações de turbina eólica de eixo vertical (TEEV).

O rotor Savonius foi criado pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius no ano de 1922. Seu formato é de duas calhas ligadas a um eixo vertical, visto de cima tem um formato de "S", Figura 2.8. Esse formato faz com que seja a força de arrasto a força motriz (CARMO, 2022).



**Figura 2.8** – Rotor Savonius.

## 2.4 Dimensionamento da turbina Darrieus tipo H

O dimensionamento é fundamental no desenvolvimento de um projeto, é nele que são determinadas as dimensões e os materiais necessários para aquele projeto. Um bom dimensionamento deve utilizar conhecimentos técnicos e científicos, a fim de tornar a realização do projeto possível e com maior eficiência possível.

### 2.4.1 Dimensionamento do rotor da turbina

Como já foi visto anteriormente, existem diversas configurações de turbinas, turbinas verticais e horizontais, com 1, 2, 3 ou mais pás e inúmeros formatos de pás. Algo de extrema importância no projeto de um aerogerador é determinar as condições do vento às quais será submetido e a finalidade. Além disso, o mais importante é determinar a potência desejada.

Para determinar a potência de uma turbina de eixo vertical Brusca, Lanzafame e Messina (2014) utiliza-se a Equação 2.1. Essa equação consiste no produto: da velocidade do vento em fluxo livre ( $V_o$ ), da densidade do ar ( $\rho$ ), do coeficiente de potência ( $C_p$ ) e da área varrida pela turbina. Essa área, por sua vez, é dada por  $2 \cdot R \cdot h$ , onde  $R$  é o raio da turbina e  $h$  é o comprimento das pás.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_o^3 \cdot 2 \cdot R \cdot h \cdot C_P \quad (2.1)$$

Ainda segundo Brusca, Lanzafame e Messina (2014), a relação entre  $h$  e  $R$ , conhecida como a razão de aspecto ( $AR$ ), que é dada pela Equação 2.2, influência no valor  $C_P$ . No trabalho do autor, é feito uma comparação entre uma turbina com  $AR$  de 2 e outra com  $AR$  de 0,4, esta última apresentou um valor de  $C_P$  superior em relação à primeira.

$$AR = \frac{h}{R} \quad (2.2)$$

Isolando o  $h$  na Equação 2.2, substituindo ele na Equação 2.1 e reestruturando, tem-se a Equação 2.3.

$$P_w = \rho \cdot V_o^3 \cdot R^2 \cdot AR \cdot C_P \quad (2.3)$$

O  $C_P$  é a razão entre a potência extraída pela turbina e a potência disponível no vento. Segundo JUNIOR (2022) o valor máximo que essa razão pode atingir é de 0,59, conhecido como limite de Betz que seria o limite teórico de aproveitamento da energia eólica por uma turbina. Porém, até hoje, nenhuma turbina conseguiu atingir esse valor. O  $C_P$  é um valor em função do ângulo de passo ( $\theta$ ) e a razão de velocidade da ponta ( $\lambda$ ), como pode ser visto na Equação 2.4.

$$C_P(\lambda, \theta) = C_1 \left( C_2 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot e^{C_5 \cdot \frac{1}{\lambda_i}} \quad (2.4)$$

Onde:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,008 \cdot \theta} - \frac{0,035}{1 + \theta^3} \Rightarrow \lambda_i = \left[ \frac{1}{\lambda + 0,008 \cdot \theta} - \frac{0,035}{1 + \theta^3} \right]^{-1} \quad (2.5)$$

Segundo Martinello (2013), os parâmetros  $C_1, C_2, C_3, C_4$  e  $C_5$  dependem das características aerodinâmicas da turbina e podem ser obtidos empiricamente. Porém, também pode ser adquiridos através de testes em túneis de vento ou por meio de uma análise matemático como feita por (STRICKLAND, 1975).

Strickland (1975) desenvolveu um modelo intitulado *Multiple Streamtube Mo-*

del (em português *Múltiplos Tubos de Fluxos - MST*) utilizado para analisar e projetar uma turbina Darrieus-H. Esse modelo possibilitou prever características importantes de uma turbina como: coeficiente de potência ( $C_p$ ), distribuição de forças, solidez ( $\sigma$ ) e taxa de variação de ponta ( $\lambda$ ). O modelo demonstrou uma boa aproximação com os dados práticos.

A potência mecânica pode ser relacionada com o torque mecânico ( $\mathcal{T}_M$ ) através da Equação 2.6, onde  $\omega_m$  é a velocidade angular mecânica.

$$\mathcal{T}_M = \frac{P_W}{\omega_m} \quad (2.6)$$

Já velocidade angular é dada pela Equação 2.7

$$\omega_m = \frac{\lambda \cdot V_o}{R} \quad (2.7)$$

## 2.4.2 Dimensionamento das pás

Segundo NOGUEIRA (2017), o perfil aerodinâmico é definido como a geometria projetada, que gera uma ocorrência aerodinâmica a partir do escoamento do fluido ao redor, como pode ser visto na Figura 2.9. Até os anos 1920 não existiam estudos que objetivavam desenvolver perfis mais eficientes. Com a criação do avião e o seu uso em guerras, os Estados Unidos através da NACA (National Advisory Committee for Aeronautics; em português, Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica), começou a investir em pesquisas que desenvolvesse perfis mais aerodinâmicos.

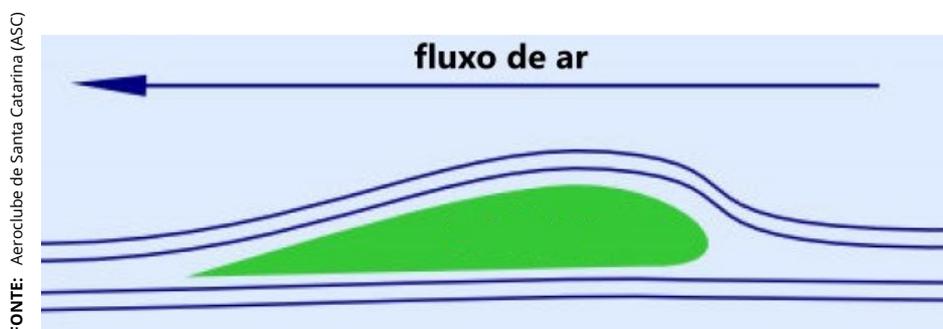


Figura 2.9 – Perfil aerodinâmico.

A agência NACA desenvolveu e testou diversos formatos de perfis, um dos mais conhecidos são os da família NACA de 4 dígitos, muito utilizados na aviação

e em turbinas.

Por convenção, os perfis são representados com o seu valor de corda igual a 1, e as outras dimensões como razão da corda, sendo a corda, a distância da ponta do perfil, conhecida como bordo de ataque, à calda, conhecida como bordo de fuga. A Figura 2.10 explica como funciona a nomenclatura do perfil NACA de 4 dígitos, onde contem informações das dimensões.

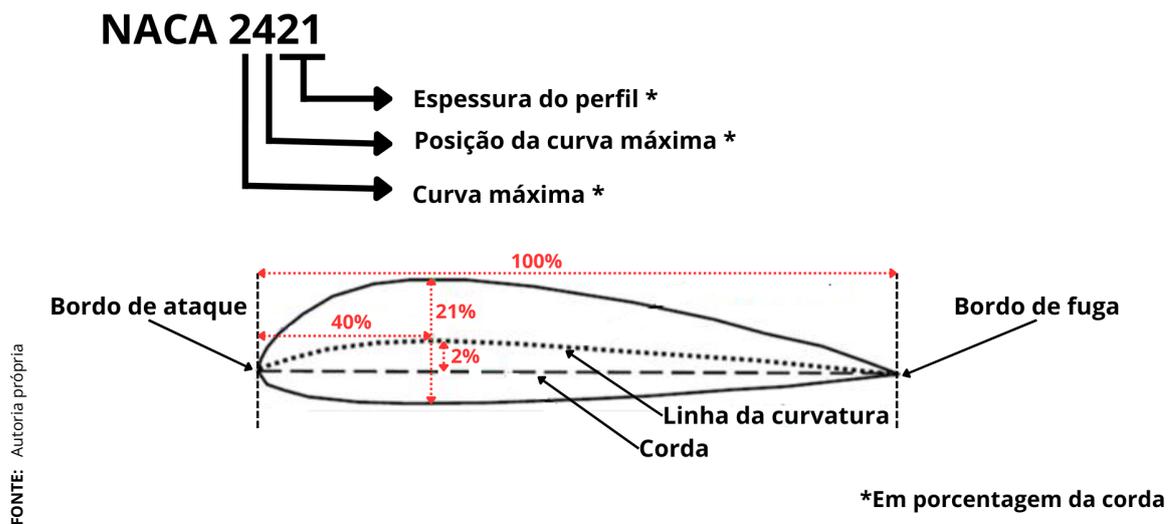


Figura 2.10 – Nomenclatura da NACA de 4 dígitos.

Segundo NOGUEIRA (2017), os perfis NACA apresentam um excelente desempenho aerodinâmico, gerando uma alta sustentação e minimizando o arrasto, sendo isto um dos motivos do seu extensivo uso em estudos e projetos de turbinas eólicas. Com isso o banco de dados da família NACA de 4 dígitos é bastante amplo. Destacam-se os perfis NACA 0012, NACA 0015, NACA 0018 e NACA 0021 com vários trabalhos acadêmicos, tendo eles como objeto de estudo e aplicações em turbinas.

De acordo com Diaz (2012), as coordenadas da superfície do perfil simétrico NACA de 4 dígitos são dada pela Equação 2.8, onde  $c$  é a corda e  $a$  é a espessura do perfil.

$$y(x) = \frac{a}{0,2} \left[ 0,2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0,1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0,3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0,2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad (2.8)$$

No trabalho de Diaz (2012) é feita uma análise dos perfis NACA 0012, NACA

0015, NACA 0018 e NACA 0021, no uso em turbinas Darrieus-H. O que apresentou melhor eficiência foi o NACA 0012, porém somente para valores de  $\lambda$  acima de 3. O NACA 0015 apresentou desafios práticos, com valores de coeficiente de potência e torque negativos para as razões de velocidade entre 1 e 1,8, o que compromete o arranque da turbina. O perfil que mais se destacou foi o NACA 0018, apresentando uma eficiência um pouco menor para valores de  $\lambda$  maior ou igual a 3, e a maior eficiência dos 4 perfis para valores de  $\lambda$  menor que 3. Para o autor esse perfil é o ideal para aplicações urbanas ou áreas com ventos menos intensos. Já o perfil NACA 0021 apresenta eficiência semelhante à dos outros, porém menor.

De acordo com Brusca, Lanzafame e Messina (2014), o valor real da corda é definido pela Equação 2.9. A partir do valor de  $c$  e com a Equação 2.8 é determinado a dimensão real do perfil.

$$c = \frac{\sigma}{N_p} \cdot R \quad (2.9)$$

Sendo que:

- $c$   $\Rightarrow$  Corda da pá (m);
- $\sigma$   $\Rightarrow$  Solidez do rotor;
- $N_p$   $\Rightarrow$  Número de pás;
- $R$   $\Rightarrow$  Raio da turbina (m);

### 2.4.3 Dimensionamento do *drive train*

Um ponto negativo no uso de turbinas eólicas na geração de energia é que elas operam em baixa rotação. Já os geradores necessitam, geralmente, de uma alta rotação.

Uma solução para esse problema é aumentar o número de polos do gerador. Com mais polos, consegue-se frequências maiores com pouca velocidade. Contudo, isso tem suas desvantagens: o gerador se torna maior e mais caro, o que pode impactar o custo-benefício do sistema. Segundo Rubio, Llopis-Albert e Pedrosa (2023), outra alternativa é o uso de um sistema de multiplicação de velocidade. Esse sistema ajusta a rotação baixa da turbina para um nível adequado ao gerador, aumentando a velocidade angular transmitida. Entretanto, esses sistemas seguem a lei da conservação de energia, onde a potência que entra é a que sai, como mostrado pela Equação 2.10, se desconsiderar as perdas. Isso significa

que, ao ganhar em velocidade, há uma redução proporcional no torque, e o inverso também ocorre. Essa relação pode ser expressa matematicamente pela Equação 2.12.

$$P_1 = P_2 \quad (2.10)$$

Utilizando a Equação 2.11, isolando o  $P_w$  e substituindo na Equação 2.10, tem-se a Equação 2.12. Essa equação relaciona o  $\omega_m$  e  $\mathcal{T}$  que entra no sistema de transmissão com o  $\omega_m$  e  $\mathcal{T}$  que sai.

$$\mathcal{T} = \frac{P}{\omega} \quad (2.11)$$

$$\omega_1 \cdot \mathcal{T}_1 = \omega_2 \cdot \mathcal{T}_2 \quad (2.12)$$

Existem alguns tipos de mecanismos que possibilitam esse ajuste de velocidade, como: sistemas de engrenagem, sistemas de corrente e sistemas de correia.

As caixas de engrenagens são fundamentais em projetos de grandes aerogeradores, transformando a baixa rotação da turbina em uma velocidade adequada para o gerador. Elas apresentam alta confiabilidade, eficiência e alta densidade de potência. Contudo, esse sistema está associado a altos custos de fabricação e manutenção dos aerogeradores, podendo representar até 10% do custo total de construção e instalação de uma turbina (RUBIO; LLOPIS-ALBERT; PEDROSA, 2023).

Segundo Nunez (2022), as correias são elementos flexíveis, geralmente de borracha sintética, usados para transmitir energia mecânica entre eixos. Elas são bastantes usadas nas máquinas industriais e em automóveis. Por serem feitas de material flexível apresentam uma suavidade no acoplamento, reduzindo ruídos e impactos mecânicos. Além disso, não necessitam de lubrificação, o que é necessário em engrenagens e correntes. No entanto, são menos resistentes que as outras duas e necessitam estar tensionadas, e mesmo assim apresentam deslizamento.

A transmissão por corrente é um método altamente eficaz de acoplamento mecânico. Sendo amplamente usado em equipamentos industriais de alta potência, onde estão submetidos a cargas elevadas, e em dispositivos de alta precisão. Seu funcionamento é baseado em corrente e rodas dentadas. Não apresentam escorregamento como as correias, por isso são altamente precisas. Além disso, são resistentes a esforços mecânicos por serem feitas de aço e a temperaturas

elevadas. Porém, são fonte de ruídos e vibração, apresentam um custo elevado acima das correias e requerem uma manutenção regular para evitar o desgaste prematuro e o perfeito funcionamento (PEREIRA et al., 2006).

## 2.5 Emprego de Geradores em Sistemas Eólica

O gerador elétrico é um dos componentes mais importantes do aerogerador, sendo responsável por transformar a energia mecânica em energia elétrica. As máquinas elétricas são divididas em dois grupos: máquinas rotativas (motores e geradores) e máquinas estacionárias (transformadores).

Geradores e motores são bem semelhantes, porém, enquanto o primeiro transforma energia mecânica em elétrica, o segundo faz o processo inverso (UMANS, 2014). As máquinas rotativas também podem ser classificadas quanto às outras características, como: quanto ao tipo de corrente ou se são de ímã permanente ou campo bobinado, Figura 2.11.

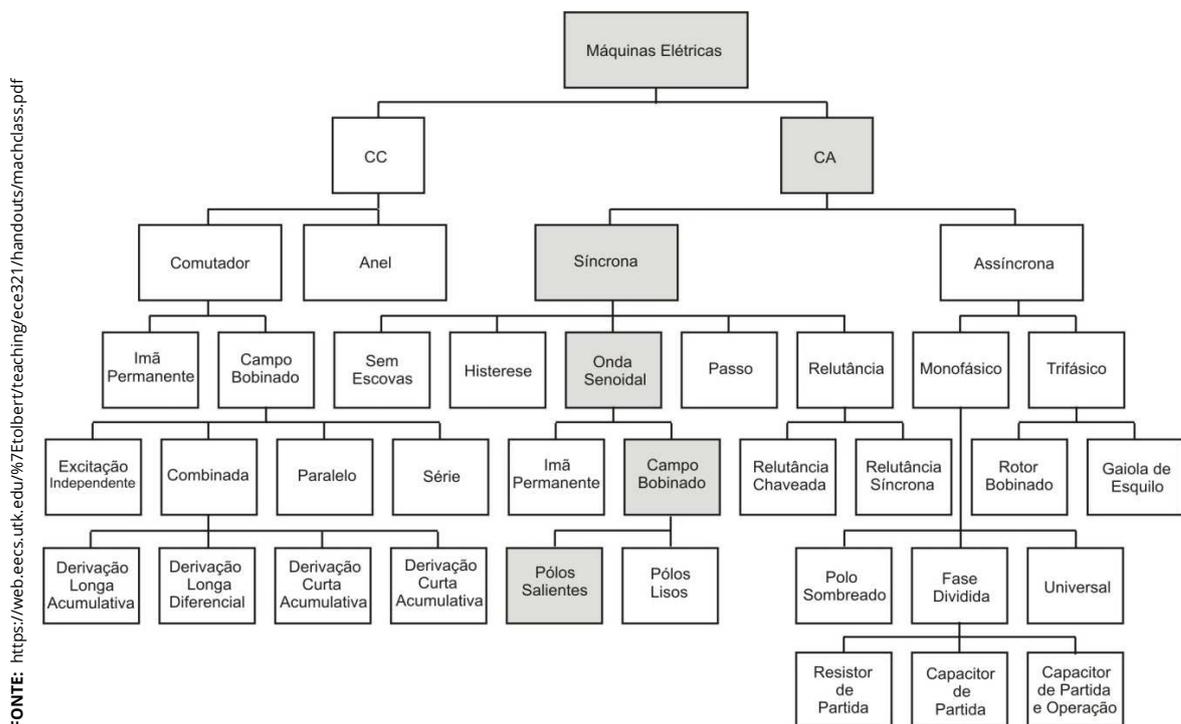
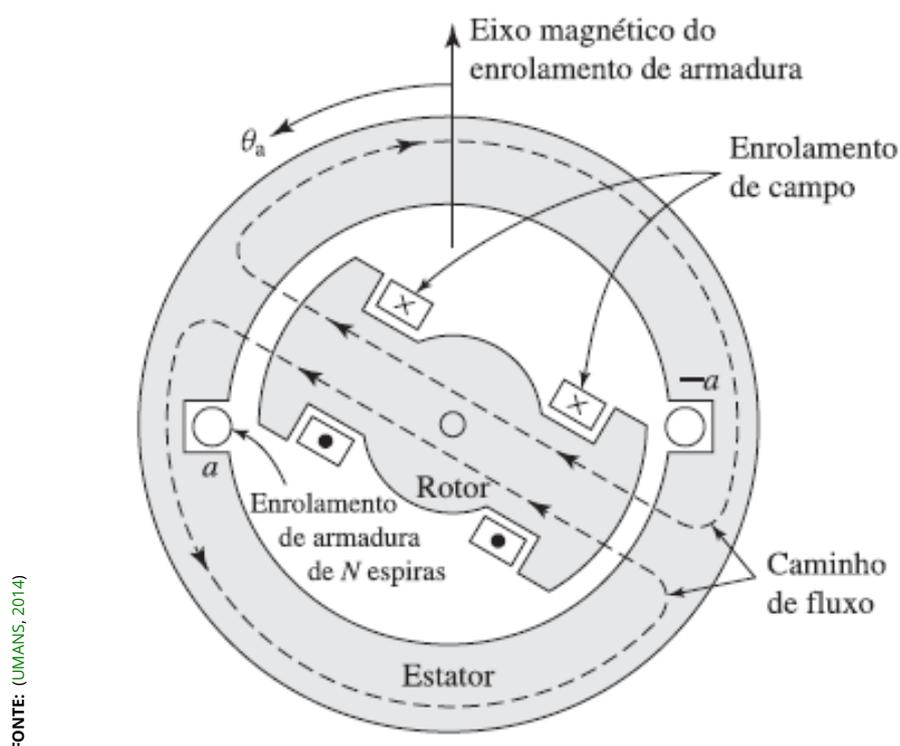


Figura 2.11 – Classificadas das máquinas rotativas.

Os geradores mais utilizados nos aerogeradores são: gerador de indução gaiola de esquilo ou SCIG (do inglês *Squirrel Cage Induction Generator*), gerador de indução de rotor bobinado ou WRIG (do inglês *Wound Rotor Induction Generator*), gerador de indução duplamente alimentado ou DFIG (do inglês *Doubly Fed Induction Generator*) e o gerador síncrono que pode utilizar um rotor bobinado ou um ímã permanente (VILAVERDE, 2019).

As máquinas síncronas são as mais utilizadas como geradores devido ao desempenho superior em relação às outras máquinas. Nesse tipo de máquina, o campo magnético do rotor criando por uma corrente contínua (CC) ou ímãs, gira sincronizadamente ao campo magnético do estator, por essa razão que são chamadas de máquinas síncronas. Na Figura 2.12, é representado uma máquina síncrona monofásica de dois polos (UMANS, 2014).



FONTE: (UMANS, 2014)

**Figura 2.12** – Vista esquemática de um gerador síncrono monofásico com um único enrolamento e dois polos.

A quantidade de polos pode variar, sempre em números pares. O número de polos determina a velocidade nominal da máquina, conforme a Equação 2.13, sendo uma relação inversa (UMANS, 2014).

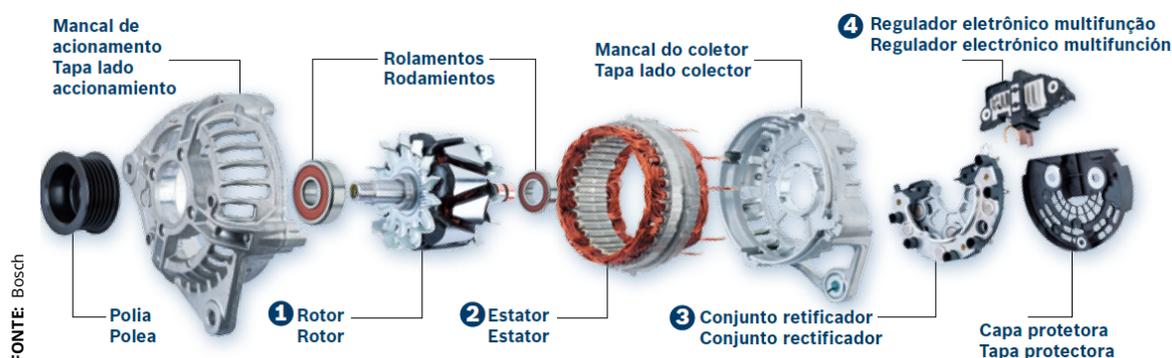
$$\omega_e = \frac{\text{polos}}{2} \cdot \omega_g \quad (2.13)$$

Sendo que:

$\omega_g \Rightarrow$  Velocidade angular mecânica no eixo do gerador (rad/s);

$\omega_e \Rightarrow$  Velocidade angular elétrica (rad/s);

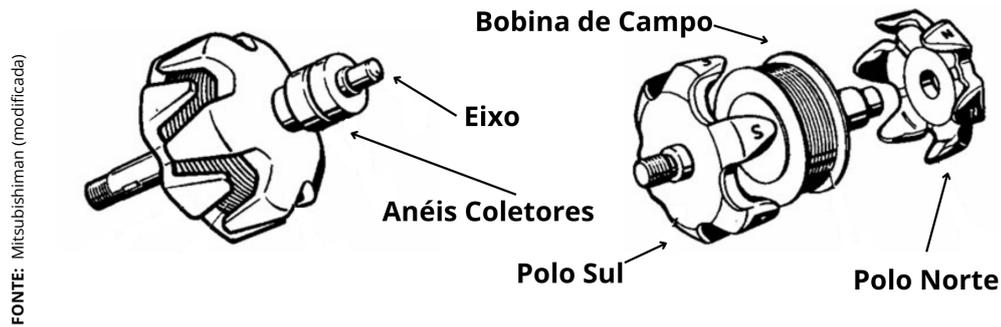
Um gerador bastante usado na geração de energia elétrica no dia a dia é o alternador automotivo. Segundo Russo (2012), ele é uma máquina rotativa síncrona de polos salientes, como destacado na Figura 2.11. Os alternadores automotivos são projetados para trabalhar com uma alta rotação, já que são ligados ao motor de combustão do veículo. Ele apresenta características vantajosas como: a alta eficiência na geração, projetado para fornecer energia para todo automóvel e uma alta robustez, para trabalhar várias horas por dia em um local que apresenta temperaturas elevadas. Além disso, o alternador automotivo possui integrado à sua carcaça um retificador que transforma corrente alternada (CA) em CC, que é inserido em uma bateria. Na Figura 2.13, mostra uma vista explodida de um alternador automotivo, é possível ver todos seus elementos.



**Figura 2.13** – Vista explodida de um alternador automotivo.

Como pode ser visto na Figura 2.13, o alternador possui diversas partes, como: rotor e estator, onde ocorre a conversão eletromecânica. No caso do alternador, trata-se de um gerador trifásico de corrente alternada, com campo bobinado. Também conta com um retificador que retifica a corrente CA, e um regulador, que controla a corrente que é fornecida à bobina do rotor.

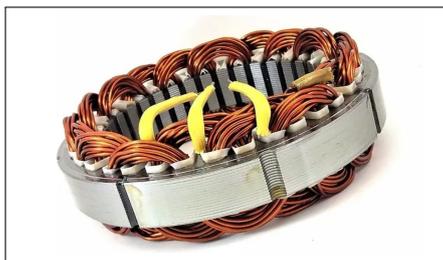
O rotor é um eixo feito de aço que fica preso em dois enrolamentos que permitem o movimento rotacional. É composto também por dois núcleos polares em formato de garra que se encaixam alternadamente, criando polo norte e sul, como pode ser observado na Figura 2.14. Esses núcleos envolvem uma bobina indutora, ou campo, as duas pontas da bobina encontram-se conectadas a dois anéis coletores que se encontram em uma das pontas do eixo.



FONTE: Mitsubishi (modificada)

Figura 2.14 – Rotor com campo bobinado.

O estator é composto por 3 enrolamentos (o que geram as 3 fases), que geralmente são ligados em estrela, Figura 2.15, mas também podem ser em delta. Esses enrolamentos estão afastado entre si de 120 graus, estando fixos em um conjunto de chapas de aços laminadas, Figura 2.16, que exerce uma função estrutural e tem a finalidade concentrar o campo magnético.



FONTE: Bosch

Figura 2.15 – Estator

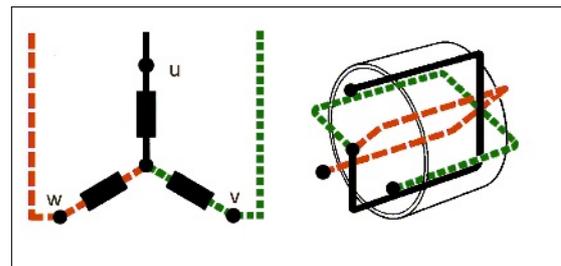
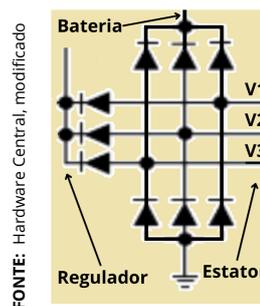


Figura 2.16 – Esquema de ligação trifásico

FONTE: Alves e Lourenço, modificado

O retificador do alternador é composto por 9 diodos, como pode ser visto na Figura 2.17, que são organizados em trios para cada fase. Com três diodos conectados ao terminal positivo da bateria, três no positivo do regulador e três ao terminal terra. Dessa forma, em qualquer momento, três diodos estão em condução, permitindo que o circuito retifique a corrente, de modo para obter uma saída contínua.



FONTE: Hardware Central, modificado

Figura 2.17 – Retificação trifásico do alternador.

O regulador é uma peça compacta que é integrada ao alternador, sendo um circuito eletrônico encapsulado que conta com: transistores, resistores e diodos Zener (que ajudam a estabilizar a tensão).

A Figura 2.18 representa o circuito elétrico de um alternador. O eixo do rotor é acoplado ao motor do carro e que fornece  $\omega_g$  à bobina do campo, que é energizada pela corrente inicialmente vinda da bateria. Quando a bobina é energizada, os núcleos em formato de garras são magnetizados e, em conjunto com a rotação do eixo, induzem um campo magnético alternado no estator, resultando na geração de corrente alternada. A corrente CA é então retificada, e uma parte vai para a bateria e outra passa pelo regulador, que vai controlar a quantidade de corrente que será injetada no campo do rotor.

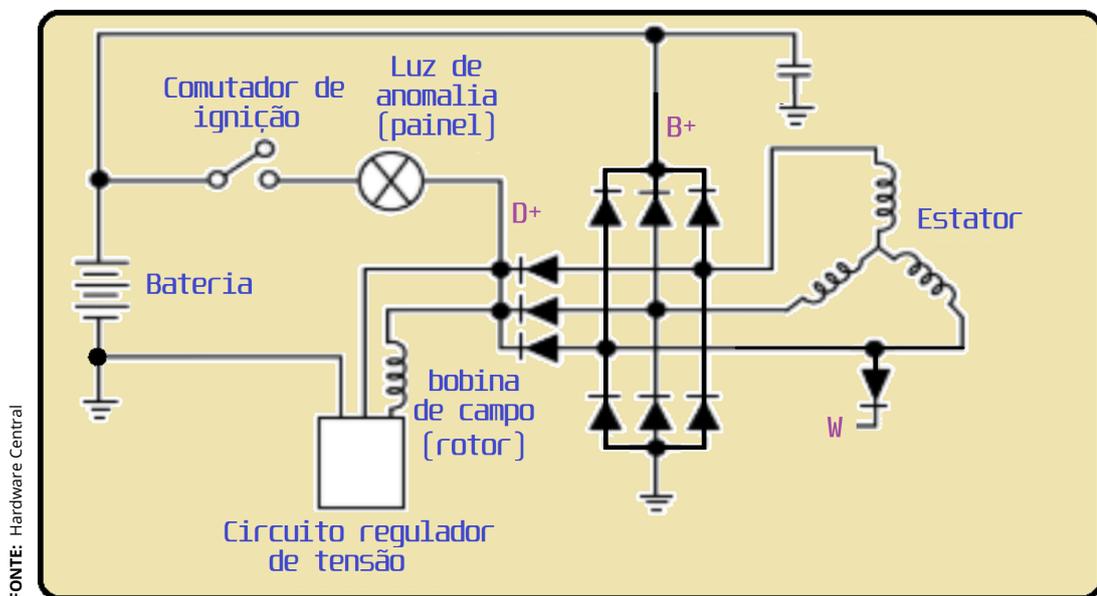


Figura 2.18 – Circuito elétrico do alternador.

### 2.5.1 Modelo matemático do alternador automotivo

Segundo Russo (2012), os alternadores automotivos podem ser modelados como um gerador síncrono genérico. A Figura 2.19, representa o circuito elétrico de um alternador, onde o gerador síncrono é composto pelo campo magnético do rotor, pela tensão gerada  $E_s$ , pela resistência do estator  $R_s$  e pela reatância do estator  $X_s$ . Além da parte do gerador, também é representado na figura o retificador trifásico e a tensão retificada  $V_{dc}$ .

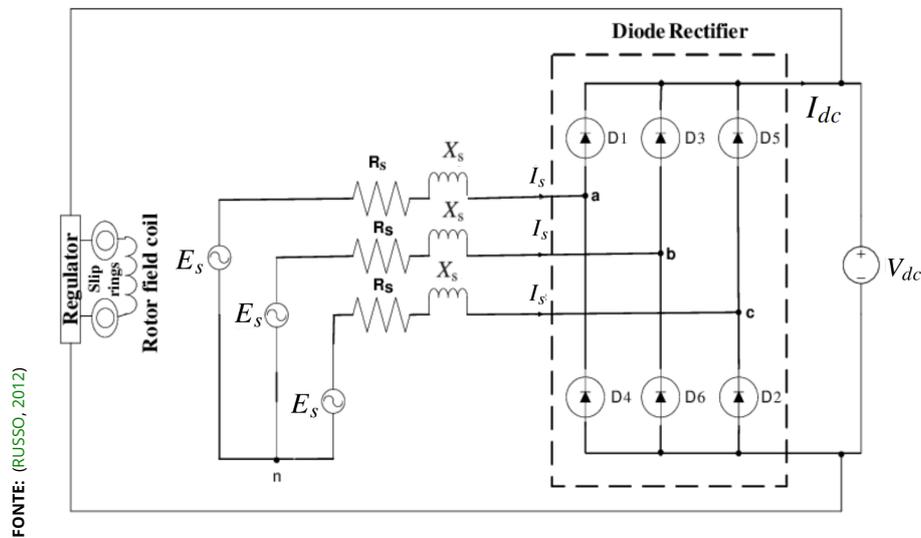


Figura 2.19 – Modelo elétrico do alternador.

O circuito da Figura 2.19, como se trata de um sistema balanceado, pode ser simplificado e estudado como um sistema monofásico e sem o retificador. Esse circuito monofásico é representado na Figura 2.20.

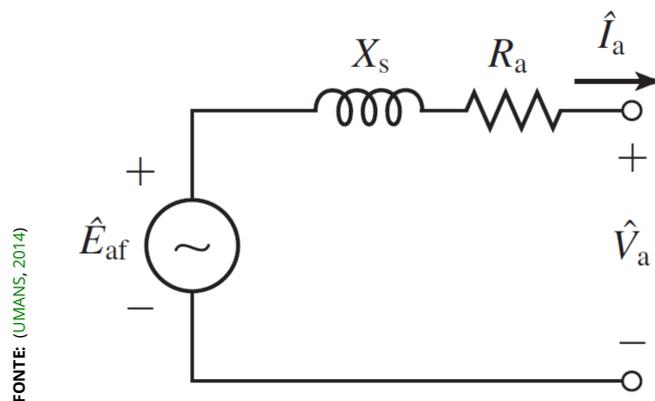


Figura 2.20 – Modelo elétrico por fase do alternador.

Por se tratar de uma máquina síncrona, todas as grandezas de armadura irão variar no tempo de forma senoidal nessa frequência, logo a equação matemática que descreve o circuito pode ser expressa em termos de amplitudes complexas eficazes (UMANS, 2014). Utilizando a lei de Kirchhoff das Tensões tem se a Equação 2.14, onde  $\hat{V}_a$  é a tensão fornecida do gerador ao retificador, e  $\hat{I}_a$  é a corrente gerada.

$$\hat{V}_a = R_a \cdot \hat{I}_a + j \cdot X_s \cdot \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad (2.14)$$

A reatância síncrona  $X_s$  pode ser expressa por  $\omega_e \cdot L_s$ , onde  $\omega_e$  é a velocidade angular elétrica e  $L_s$  a indutância do enrolamento.

Se o circuito da Figura 2.20 for considerado aberto, não haverá uma corrente fluindo, ou seja,  $\hat{I}_a = 0$ , logo  $\hat{V}_a = \hat{E}_{af}$ . Essa é uma forma de determinar o valor da tensão induzida no estator. Outra forma segundo Umans (2014), de calcular a tensão eficaz induzida é utilizando a Equação 2.15. Onde  $K_{enr}$  é fator de enrolamento,  $N_{fase}$  é o número de espiras por fase e  $\Phi_p$  é o fluxo de entreferro por polo.

$$E_s = \frac{\omega_e \cdot k_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \Phi_p}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_e \cdot k_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \Phi_p \quad (2.15)$$

A frequência é dada pela Equação 2.16,

$$f_e = \frac{n \cdot polos}{120} = \frac{\omega_e}{2 \cdot \pi} = \frac{polos \cdot \omega_G}{4 \cdot \pi} \quad (2.16)$$

Sendo que:

- $\Rightarrow$  Rotações por minuto;
- $Polos \Rightarrow$  Número de polos da máquina elétrica;

Substituindo 2.16 em 2.15 tem se a Equação 2.17.

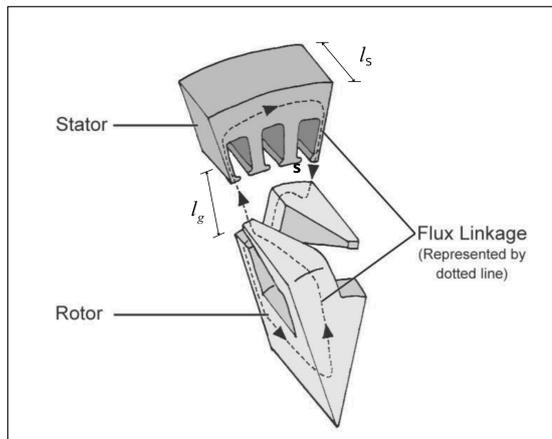
$$E_s = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot k_w \cdot N_{fase} \cdot \frac{polos \cdot \omega_G}{4 \cdot \pi} \Phi_p = k_w \cdot N_{fase} \frac{polos \cdot \omega_G}{2 \cdot \sqrt{2}} \Phi_p \quad (2.17)$$

O fluxo por polo é dado pela 2.18 (AJAYI, 2012)

$$\Phi_p = B \frac{2}{\pi} \tau_p \cdot l_s \quad (2.18)$$

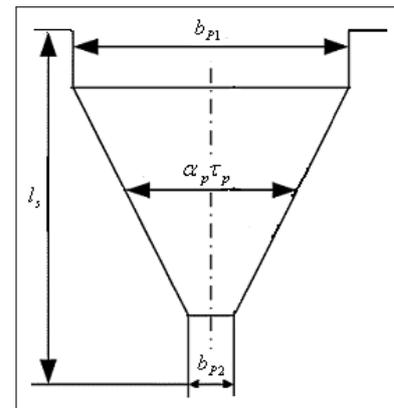
Sendo que:

- $B \Rightarrow$  Densidade de fluxo do entreferro (T);
- $\tau_p \Rightarrow$  Passo de polo (mm), Figura 2.22 ;
- $l_s \Rightarrow$  Comprimento da pilha do estator (mm), Figura 2.21 ;



FONTE: (AJAYI, 2012)

**Figura 2.21** – Geometria do rotor- estator.



FONTE: (AJAYI, 2012)

**Figura 2.22** – Geometria da garra.

A Figura 2.21 mostra o estator e o rotor com algumas dimensões que têm influência direta no fluxo magnético. Já a geometria do rotor pode ser visto na Figura 2.22, e suas dimensões pode representado pela Equação 2.19.

$$\frac{b_{p1} + b_{p2}}{2} = \alpha_p \cdot \tau_p \quad (2.19)$$

A densidade de fluxo do entreferro é dada pela Equação 2.20.

$$B = \frac{4 N_{campo} \cdot I_f}{\pi} \frac{\mu_o}{l_g \cdot k_s \cdot k_c} \sin\left(\alpha_p \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.20)$$

Sendo que:

- $N_{campo}$  ⇒ Número de espiras do campo;
- $I_f$  ⇒ Corrente de campo (A);
- $\mu_o$  ⇒ Permeabilidade do entreferro;
- $\alpha_p$  ⇒ Relação entre a largura média do polo e o passo do polo, Figura 2.22;
- $l_g$  ⇒ Comprimento do entreferro (mm), Figura 2.21;
- $k_s$  ⇒ Nível de saturação;
- $k_c$  ⇒ Fator carter;

Substituindo as Eq. 2.20 e 2.18 na Eq. 2.17, o valor da tensão RMS a vazio, em cada fase poder determinado pela a Equação 2.21

$$E_s = \left( \frac{\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot polos \cdot N_{fase} \cdot k_{enr} \cdot \tau_p \cdot l_s \cdot \sin \left( \alpha_p \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{N_{campo} \cdot \mu_o}{l_g \cdot k_s \cdot k_c} \right) \cdot I_f \cdot \omega_G \quad (2.21)$$

Na Eq. 2.22 os parâmetros que estão entre parênteses são valores constantes, que dependem somente das dimensões da máquina, logo podem ser considerados parâmetros de máquina e ser substituído por um único parâmetro,  $k_M$  (AJAYI, 2012). Assim a Equação 2.22 representa a tensão eficaz em função das variáveis  $I_f$  e  $\omega_m$ . O  $k_M$  pode ser obtido experimentalmente em laboratório.

$$E_s = K_M \cdot I_f \cdot \omega_G \quad (2.22)$$

## 2.5.2 Modelo matemático do retificador

Como pode ser visto na Figura 2.19, o alternador conta com um retificador trifásico de onda completa. Esse retificador tem a função de transformar as correntes alternadas ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ), vindas de cada fase do estator, em uma única corrente contínua,  $i_{dc}$ .

Na Figura 2.23, é representado o comportamento das correntes. Cada cor representa uma fase e as linhas pontilhadas representam a parte da onda que foi refletida para o lado de cima, devido à configuração dos diodos. A  $i_{dc}$  pode ser observada na Fig. 2.23, sendo representada pela linha preta pulsante.

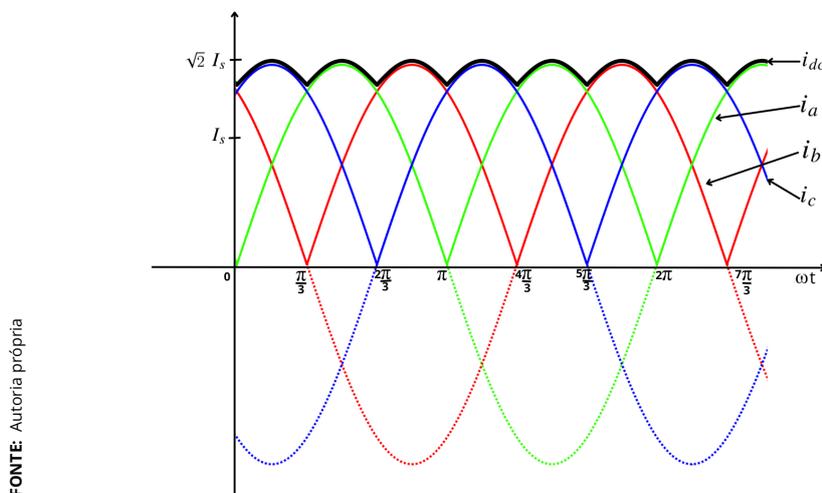


Figura 2.23 – Comportamento das correntes.

As Equações 2.23, 2.24 e 2.25, expressam as correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ . Onde  $I_p$  é o valor de pico da onda e  $\phi$  é a fase.

$$i_a = I_p \cdot \sin(\omega_e \cdot t - \phi) \quad (2.23)$$

$$i_b = I_p \cdot \sin(\omega_e \cdot t - \phi - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) \quad (2.24)$$

$$i_c = I_p \cdot \sin(\omega_e \cdot t - \phi - 4 \cdot \frac{\pi}{3}) \quad (2.25)$$

Segundo Ajayi (2012), a tensão eficaz ( $E_s$ ) e a corrente eficaz ( $I_s$ ) são expressas pela Equações 2.26 e 2.27, respectivamente.

$$E_s = \frac{E_p}{\sqrt{2}} \quad (2.26)$$

$$I_s = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (2.27)$$

Para obter o valor médio da corrente CC,  $I_{dc}$ , segundo Ajayi (2012), deve-se integrar a curva  $i_{dc}$  de 0 a  $\pi/3$ , e dividir por  $\pi/3$ . Assim, se obtêm a Equação 2.28.

$$I_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot I_s}{\pi} \quad (2.28)$$

Considerando o conceito de potência, a potência entregue pelo retificador será o produto de  $I_{dc}$  e  $V_{dc}$ . Essa potência seria igual a potência do gerador, porém, no sistema real, existem perdas de potência no retificador e no cobre do estator,  $P_{ret+cu}$ , que devem ser consideradas. A Equação 2.29 expressa a conservação de potência no retificador.

$$[V_{dc} \cdot I_{dc}] = [3 \cdot I_s \cdot E_s \cdot \cos\phi] - [P_{ret+cu,S}] \quad (2.29)$$

Segundo Ajayi (2012),  $P_{ret+cu}$  pode ser dada pela Equação 2.30. A perda de potência é dada pelo produto de  $V_d$  e  $I_s$ , que seria a perda no retificador, mais a perda no cobre do estator que dada pelo produto de  $I_s$  e  $R_s$ , tudo isso multiplicado por 3, por se tratar de um sistema trifásico. O  $V_d$  representa a queda de tensão do

diodo, e o  $R_s$  é a resistência do estator.

$$P_{rect+cu,S} = 3 \cdot (V_d \cdot I_s + R_s \cdot I_s^2) \quad (2.30)$$

Por fim, substituindo as Eq. 2.30 e 2.28 na Eq. 2.29 e isolando  $V_{dc}$  no lado esquerdo da equação, tem-se a Equação 2.31.

$$V_{dc} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot (E_s \cdot \cos\phi - V_d - I_s \cdot R_s) \quad (2.31)$$

# Capítulo 3

## Metodologia e Materiais

### 3.1 Objeto de estudo

Este trabalho tem como objeto de estudo o projeto de um aerogerador de pequeno porte, que possa ser usado na geração de energia elétrica em pequena escala, com a finalidade de suprir consumidores que não têm acesso à rede elétrica ou de ser implementada na geração distribuída.

Foi escolhida a turbina Darrieus tipo H devido à sua simplicidade construtiva e operativa, além de sua capacidade de operar com ventos que apresentam características irregulares. Para esse trabalho, foi feito um estudo bibliográfico a fim de embasar cientificamente o desenvolvimento do projeto, compreender os conceitos fundamentais relacionados ao tema e identificar as principais metodologias e técnicas utilizadas em estudos semelhantes. Após isso, foram feitos o dimensionamento da turbina e a modelagem no Simulink.

Para o gerador elétrico, foi escolhido o alternador automotivo, devido à disponibilidade no mercado, robustez e custo reduzido, além de sua capacidade de gerar energia elétrica de forma eficiente. Foi realizado um estudo bibliográfico na literatura acadêmica e em manuais de fabricantes, com intuito de caracterizar eletricamente o alternador. Além disso, foram feitos ensaios em laboratórios para descobrir informações não disponibilizadas pelo fabricante. A partir disso, foi feita a modelagem do alternador no Simulink.

## 3.2 Tipo de pesquisa empregada

Este trabalho realizou uma pesquisa quantitativa, já que buscou mensurar e analisar as informações de maneira objetiva, através de procedimentos matemáticos e científicos para obter e tratar os resultados desejados. A natureza do trabalho é aplicada, já que desenvolve conhecimento voltado para solucionar um problema prático da sociedade.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é descritiva, pois descreve as características e o comportamento do objeto alvo do trabalho e de suas partes. Para alcançar os objetivos propostos, foram adotados dois procedimentos. O primeiro procedimento foi uma revisão bibliográfica em livros, artigos científicos e manuais, a fim de criar um embasamento teórico para a pesquisa, identificando conceitos, modelos e estudos já publicados que contribuem para o desenvolvimento do trabalho. O segundo procedimento foi a pesquisa experimental, na qual foram realizados ensaios em laboratório e simulação em software, com o objetivo analisar o comportamento do aerogerador, determinando sua eficiência e possíveis problemas que podem ser solucionados.

## 3.3 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento desse trabalho foram compostos por:

- ▶ Material bibliográfico, a fim conceder suporte técnico e científico ao projeto de pesquisa;
- ▶ Emprego do software Matlab, que foi utilizado para o cálculo de dimensionamento da turbina;
- ▶ Utilização do Matlab/Simulink, empregado para fazer a modelagem e a simulação computacional do sistema eólico (turbina, gerador, conversor e sistema de controle);
- ▶ Alternador automotivo;
- ▶ Uma bancada com motor de indução acionado por um inversor de frequência para emular a turbina eólica;
- ▶ Instrumentos de medidores de grandezas elétricas e mecânicas.

### 3.3.1 Dados Gerais da turbina Darrieus tipo H

Para o projeto do aerogerador, foi considerada a turbina eólica de eixo vertical Darrieus tipo H, devido às suas características vantajosas para projetos de pequenas turbinas. Entre essas vantagens estão: a simplicidade de construção, a capacidade de operar em ventos turbulentos e estabilidade ao ser submetida à variação da velocidade do vento.

A turbina foi projetada com três pás, por apresentar estabilidade mecânica e melhor distribuição de cargas aerodinâmicas no eixo. O perfil aerodinâmico selecionado foi o [NACA 0012](#), amplamente conhecido por apresentar valores altos de  $C_p$  e  $\lambda$ .

Para o valor de  $AR$  foi escolhido 0,8, o mesmo usado por [Brusca, Lanzafame e Messina \(2014\)](#). Já os valores de  $\lambda$ ,  $\sigma$  e  $C_p$ , foram definidos como 4, 0,3 e 0,475, respectivamente, como base no trabalho de [Strickland \(1975\)](#).

A turbina foi projetada para atuar com velocidade de ventos no intervalo de 6 m/s a 12 m/s. Segundo [AMARANTE, ZACK e SÁ \(2021\)](#), essas velocidades ventos são comuns na região do litoral nordestino brasileiro e em algumas regiões do interior. Então foi definida a velocidade nominal de vento para a turbina como 8 m/s, sendo esse valor usado também na literatura.

A potência nominal da turbina é de 802 W, valor calculado considerando a potência do alternador escolhido e as perdas de potência que ocorrem no sistema.

### 3.3.2 Dados do alternador automotivo

O alternador escolhido como gerador para o aerogerador é da marca Bosch, modelo 9 120 080 185. Esse modelo pode ser encontrado em veículos como o Gol I 1.0 e o Gol II 1.0i, o que facilita sua obtenção em ferros-velhos ou em lojas de autopeças, tornando-o uma opção acessível e econômica.

Este alternador apresenta a tensão de saída de 14 V e uma corrente máxima de 45 A, resultando numa potência de 630 W, o que é um valor considerável para pequenos sistemas de geração.

Como o alternador foi projetado para trabalhar recebendo rotação do motor de combustão do veículo, sua velocidade rotação nominal é de 1080 a 8000

RPM. Essa característica possibilita uma ampla faixa de velocidade de ventos para o aerogerador.

A configuração interna do alternador é formada por um campo bobinado que magnetiza 12 polos em formato de garras, como pode ser visto nas Figuras 3.1 e 3.2. E um estator trifásico ligado em estrela, com o neutro inacessível.



FONTE: Autoria própria.

**Figura 3.1** – Polos do alternador, vista frontal



FONTE: Autoria própria.

**Figura 3.2** – Polos do alternador, vista lateral

O sistema do conversor de potência é composto por um retificador trifásico de onda completa, localizado no interior da carcaça do alternador.

Os dados coletados na placa do alternador e em catálogo do fabricante estão apresentados na 3.1.

**Tabela 3.1** – Dados do alternador

Marca	Bosch
Modelo	9 120 080 185
Tensão de saída	14 V (CC)
Corrente de saída	45 A (CC)
Polos	12
Velocidade nominal	1080-8000 RPM

FONTE: Autoria própria

## 3.4 Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho, seguiu as seguintes etapas:

- ▶ Revisão do estado da arte sobre aerogeradores de pequeno porte empregados na geração distribuída;
- ▶ Planejamento e execução de cálculo de projeto da turbina eólica Darrieus tipo H.
- ▶ Construção do modelo computacional do sistema eólico de pequeno porte (turbina, gerador, conversor e sistema de controle);
- ▶ Simulação do modelo computacional para comparar com os resultados de medição real das variáveis do sistema;
- ▶ Ensaio em bancada didática do sistema de geração com o alternador automotivo.

Para o planejamento e execução de cada tarefa, foi utilizado as dependências dos laboratórios do IFBA, campus Vitória da Conquista.

#### 3.4.1 Procedimentos metodológicos para o dimensionamento da turbina Darrieus tipo H

O dimensionamento é fundamental no desenvolvimento de um projeto. É nessa fase que são determinado as dimensões e os materiais necessários para aquele projeto. Um bom dimensionamento deve utilizar conhecimentos técnicos e científicos, a fim de tornar a realização do projeto viável e obter a máxima eficiência.

A primeira dimensão a ser calculada é o raio da turbina. Para isso, é utilizada a Eq. 2.1, e, isolando o  $R$  no lado esquerdo, tem-se a Equação 3.1.

$$R = \sqrt{\frac{P_W}{\rho \cdot V_o^3 \cdot AR \cdot C_P}} \quad (3.1)$$

Com o valor de  $R$  calculado, a próxima dimensão a ser determinada é o comprimento da pá. Para isso, é utilizada a Eq. 2.2, e, isolando o  $h$  no lado esquerdo, tem-se a Equação 3.2, que pode ser usada para obter o  $h$ .

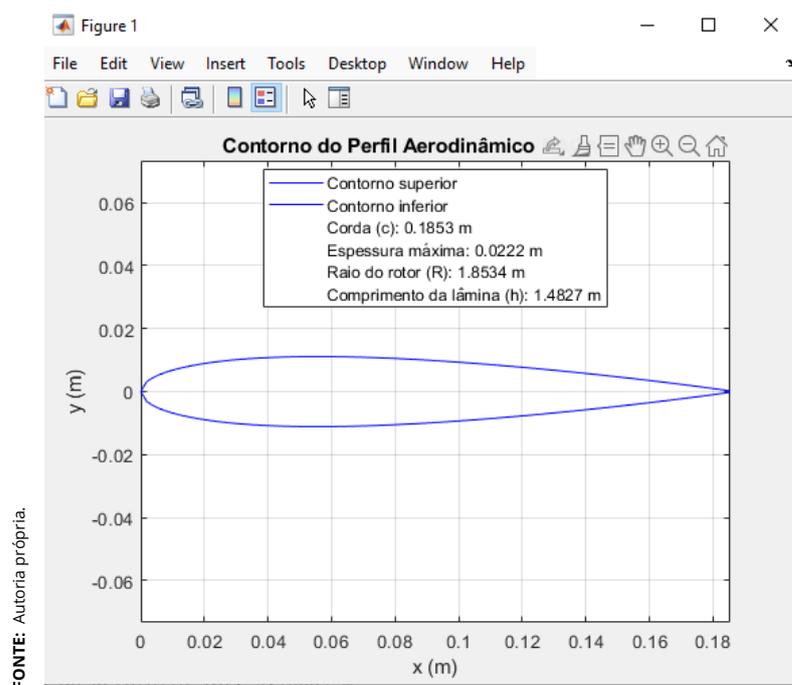
$$h = \frac{R}{AR} \quad (3.2)$$

Uma dimensão muito importante que deve ser calculado é a corda do perfil aerodinâmico. Para isso, foi utilizado a Eq. 2.9. Com o valor de  $c$  determinado e considerando que é utilizado o perfil NACA 0012, a espessura do perfil é 12% de  $c$ . Com esses dois parâmetros e a Eq. 2.8, pôde-se determinar o contorno do perfil.

Além das dimensões físicas, alguns outros parâmetros foram calculados como: a velocidade angular nominal da turbina e o torque mecânico nominal.

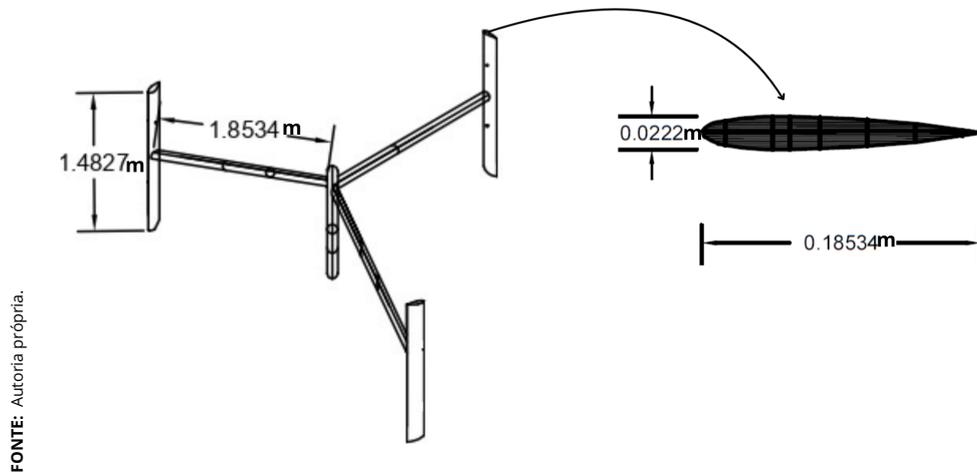
Para calcular velocidade angular nominal da turbina, foi utilizada a Eq. 2.7. Já para determinar o torque da turbina, foi utilizada a Eq. 2.6.

Para auxiliar o dimensionamento da turbina, foi desenvolvido um código no MATLAB, disponível nos anexos, que realiza todos os cálculos descritos, e fornece os resultados e o perfil da pá, conforme as Figura 3.3.



**Figura 3.3** – As dimensões da turbina e o perfil aerodinâmico da pá

Nesse trabalho, não foi realizada a construção da turbina; limitou-se somente ao projeto e à simulação da turbina. Foi feito um desenho da turbina no programa AutoCAD, que pode ser visto na Figura 3.4. Assim, se futuramente alguém desejar implementar a turbina, já estará disponível o desenho técnico com todas as dimensões.



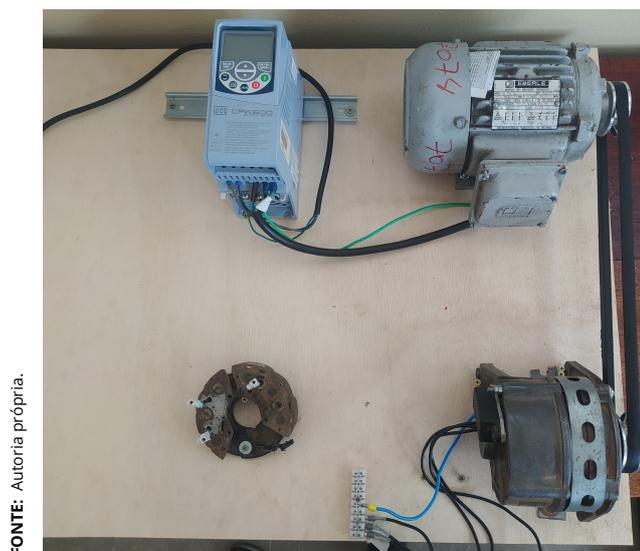
FONTE: Autoria própria.

Figura 3.4 – Turbina projetada

### 3.4.2 Procedimentos metodológicos para ensaio do alternador Lundell

O alternador foi submetido a alguns testes a fim de caracterizá-lo, já que não foram encontradas todas as informações necessárias para fazer a simulação.

Para os ensaios, foi montada uma bancada de teste, Figura 3.5, onde o alternador foi acoplado a um motor de indução que é controlado por um inversor de frequência. Assim, foi possível variar a velocidade angular do rotor do gerador.



FONTE: Autoria própria.

Figura 3.5 – Bancada confeccionada para os ensaios

### 3.4.2.1 Ensaio a vazio

O objetivo desse ensaio é determinar o coeficiente  $k_M$  e a curva de tensão em função da velocidade angular mecânica.

Para o ensaio, os terminais do alternador foram deixados a vazio, de forma que não houvesse correntes. Somente um multímetro, na função de voltímetro foi conectado a duas das fases. Algo a ser observado é que essa tensão medida corresponde à tensão de linha; logo, esse valor deve ser dividido por  $\sqrt{3}$  para obter a tensão de fase.

Para excitar o campo magnético do rotor, é necessário alimentá-lo com uma corrente CC,  $I_f$ . Para testar o efeito da corrente de campo no alternador foi realizado o teste a vazio com 3 valores de  $I_f$  diferentes.

O teste foi realizado variando a  $\omega_g$  no alternador, de 278,48 até 3341,8 RPM, o limite do motor de indução, e medindo a tensão nas saídas dos terminais. Esse procedimento foi feito 3 vezes, mudando o valor da corrente de campo. A Figura 3.6 mostra como foi montado o circuito para o ensaio.

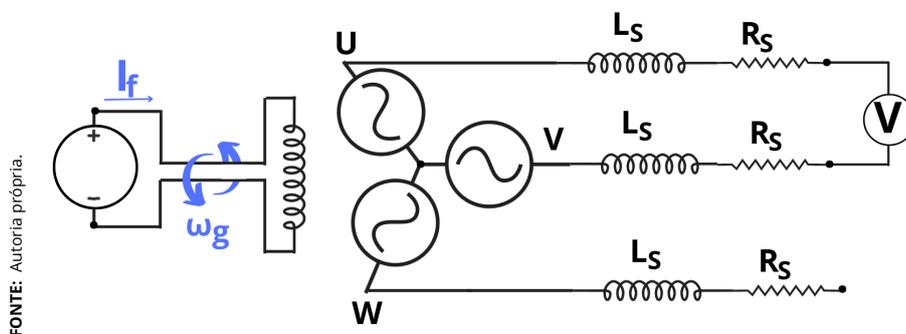


Figura 3.6 – Representação do circuito montado para o ensaio a vazio

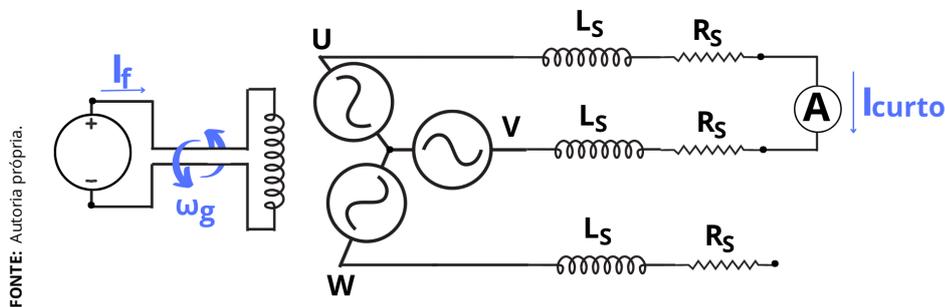
### 3.4.2.2 Ensaio em curto-circuito

Esse ensaio tem o objetivo de determinar o valor da indutância do estator,  $L_s$ .

Esse ensaio é realizado com os terminais do estator curto-circuitados, ligados somente a um multímetro na função de amperímetro para medir a corrente de curto-circuito,  $I_{curto}$ .

O procedimento foi variar a  $\omega_g$  e medir a  $I_{curto}$ . Foi realizado somente uma vez, utilizando uma corrente de 1,3 A para alimentar o campo. A Figura 3.7 mostra

como foi montado o circuito para o ensaio.



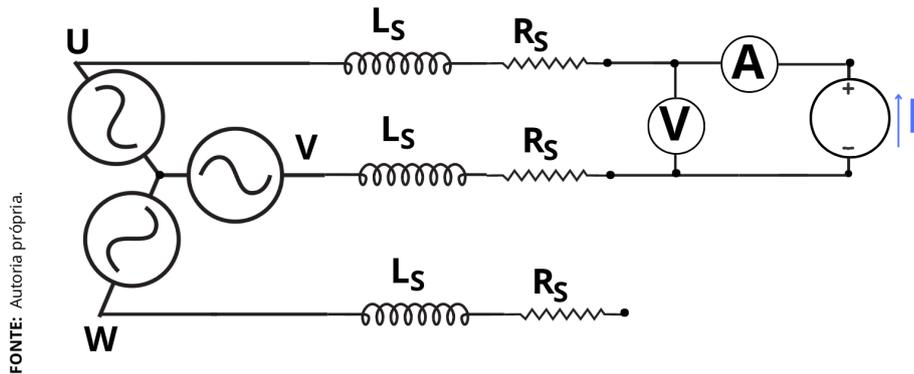
**Figura 3.7** – Representação do circuito montado para o ensaio em curto-circuito

### 3.4.2.3 Ensaio para determinar as resistências

O objetivo desse ensaio é determinar a resistência dos enrolamentos do estator e do rotor.

Primeiro foi medida, com o multímetro na função ohmímetro, a resistência do rotor. Porém, um fator que deve ser levado em conta é o aquecimento nos fios devido à passagem da corrente durante o funcionamento do gerador. Então, foi realizado um segundo teste, no qual foi aplicado uma série de tensões contínuas na bobina do rotor e medido o valor da corrente para cada valor de tensão. Com esses valores e utilizando a Lei de Ohm, pode-se chegar a um valor de resistência de campo mais preciso.

Para medir a resistência no estator, foi conectado um multímetro na função ohmímetro entre duas fases (U e V) do estator, e depois desconectado de uma das fases e conectado na outra, fase W. Os dois valores obtidos foram divididos por 2, já que cada medição foi feita sobre duas bobinas. Além disso, os valores foram iguais, comprovando que as fases estão balanceadas. Foi realizado o segundo teste, no qual foi aplicada uma série de tensões contínuas nos terminais do estator e medida a corrente para cada valor de tensão. Com isso, foi determinada uma resistência para as bobinas do estator mais próxima da real. A Figura 3.8 mostra como foi montado o circuito para o ensaio.



FONTE: Autoria própria.

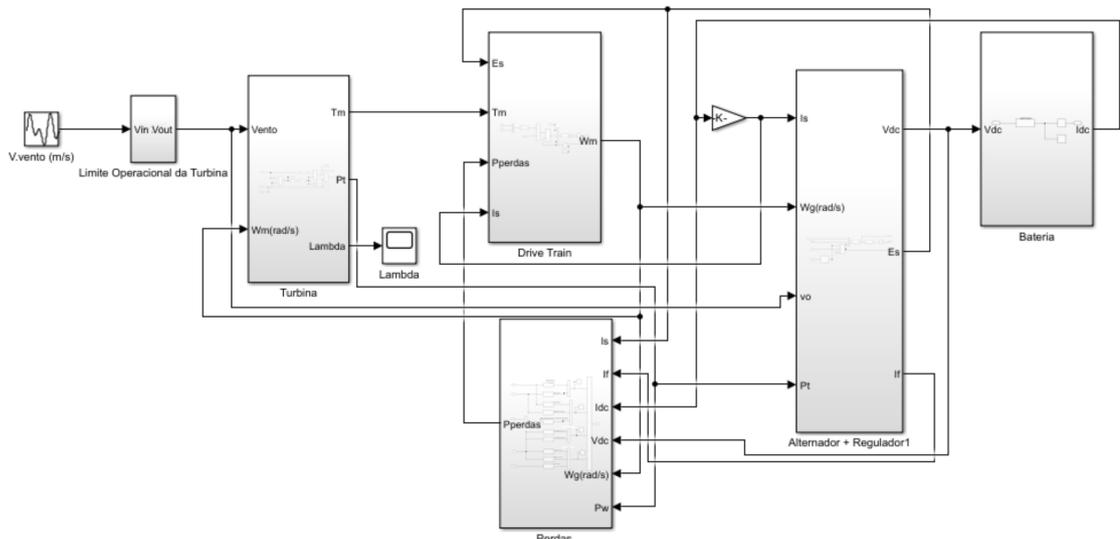
**Figura 3.8** – Representação do circuito montado para medir a resistência do estator

### 3.4.3 Procedimentos metodológicos para modelagem do sistema de geração

Para a modelagem do aerogerador, foi escolhido o Simulink, uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos que utiliza programação em blocos, facilitando o processo.

A modelagem foi dividida em cinco submodelos: Turbina Eólica, Drive Train, Perdas de Potência, Alternador e Bateria.

A Figura 3.9 mostra o diagrama da modelagem do aerogerador, no qual é possível ver os submodelos e as interações entre eles.



FONTE: Autoria própria.

**Figura 3.9** – Diagrama do modelo do aerogerador.

Na Fig. 3.9, existe um bloco chamado Vento. Este bloco gera um sinal em degraus que simula a variação de velocidade de 3 a 12 m/s.

### 3.4.3.1 Modelagem da turbina eólica

A modelagem da turbina tem como base a Equação 2.3. Porém, para o modelo, foi considerado um comportamento dinâmico. Com isso, a equação sofre uma alteração. O  $C_p$  passa a ser em função de  $\lambda$  e  $\theta$ , podendo ser modelado pela Equação 3.3.

$$P_W = \rho \cdot V_o^3 \cdot R^2 \cdot AR \cdot C_p(\lambda, \theta) \quad (3.3)$$

A variável  $\theta$  corresponde ao ângulo entre a trajetória da pá e a corda do perfil. Geralmente, para TEEV, é considerado o valor 0. Como já descrito,  $\lambda$  é a razão entre a velocidade da turbina e a velocidade do vento.

O valor de  $C_p$  foi calculado pela Eq. 2.4. Para determinar os parâmetros  $C_1, C_2, C_3, C_4$  e  $C_5$ , que são valores intrínsecos de cada tipo de turbina, foi usada a curva da Figura 3.10. Essa curva descreve o  $C_p$  de uma turbina Darrieus tipo H de 3 pás, usando o perfil NACA 0012. A partir dessa curva, foi desenvolvido um código no MATLAB, disponível no anexo B, que calculou os valores dos  $C's$ . Assim, obtém-se a Eq. 3.4, usada na simulação.

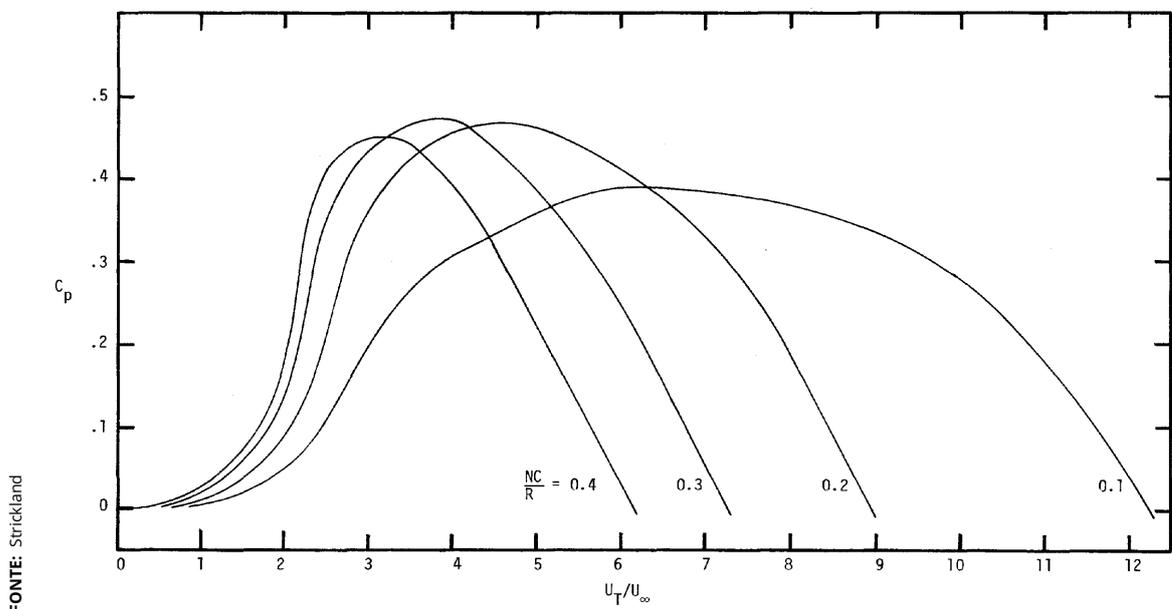


Figura 3.10 – Curvas do  $C_p$  em função do  $\lambda$  para alguns valores de  $\sigma$ .

$$C_p(\lambda) = 0,24034 \cdot (99,6532 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - 10,0088) \cdot e^{8,1378 \cdot \frac{1}{\lambda_i}} \quad (3.4)$$



Tabela 3.2 – Dados usados na simulação da turbina

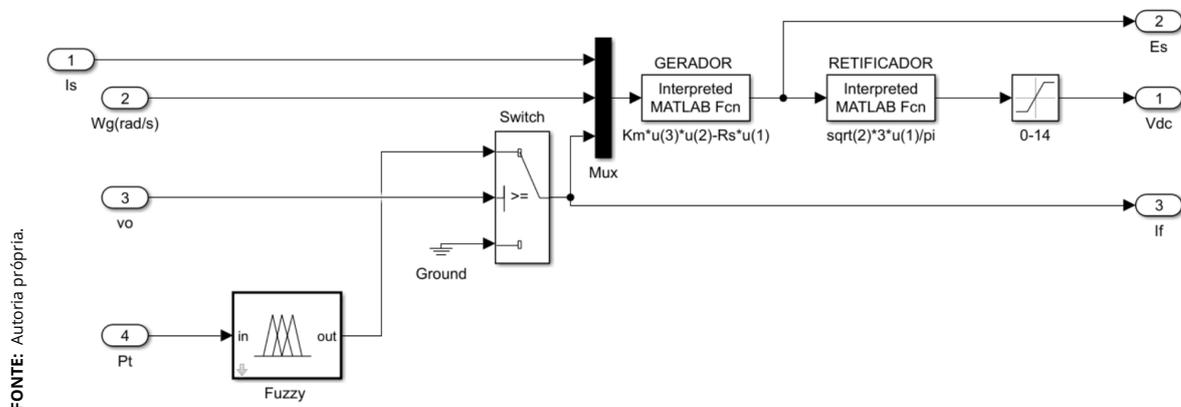
Parâmetros	Valor	Descrição
R	1,85	Raio da turbina (m)
h	1,48	Comprimento da lâmina da pá (m)
Ro	1,225	Densidade do ar
G	10	Relação de transmissão

FONTE: Autoria própria

### 3.4.3.2 Modelagem do alternador automotivo

O submodelo do alternador automotivo foi desenvolvido com base na Eq. 2.22, que representa o gerador elétrico síncrono trifásico. Além do gerador, o alternador é composto por um retificador, que será modelado conforme a Eq. 2.29.

O submodelo do alternador automotivo montado no Simulink está ilustrado na Figura 3.12. Todo sistema foi desenvolvido de acordo com a literatura apresentada nesse trabalho. Os dados inseridos na simulação foram obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório e na literatura.



FONTE: Autoria própria.

Figura 3.12 – Diagrama do modelo do alternador automotivo.

As entradas do modelo são:  $I_s$ ,  $W_g(\text{rad/s})$ ,  $V_o$  e  $P_t$ , e as saídas são:  $E_s$ ,  $V_{dc}$ , e  $I_f$ .

As duas entradas de sinal são inseridas no bloco *Gerador*, juntamente com o sinal que corresponde à corrente de campo. Esse bloco foi programado com base na Eq. 2.22, porém, foi acrescentada a queda de tensão no estator. A Equação 3.6 é a equação final que foi inserida no bloco *Gerador*.

$$E_s = K_M \cdot I_f \cdot \omega_G - R_s \cdot I_s \quad (3.6)$$

O sinal de saída do bloco *Gerador*,  $E_s$ , é a entrada do bloco *Retificador*. Este bloco foi programado baseado na Eq. 2.31, e seu sinal de saída é o valor da tensão retificada. Para garantir uma tensão adequada de 14 V, o sinal passa por um bloco que limita a tensão retificada, a  $V_{dc}$ .

O bloco *Switch* consiste em uma chave centrífuga, que tem a função de desligar a corrente vinda da bateria em baixas rotações ou quando a rotação é zero, evitando o descarregamento da bateria. A chave centrífuga não existe no alternador, é uma peça que deve ser implementado. A saída desse bloco é a  $I_f$ .

Foi necessário também implementar um controlador fuzzy para fazer o controle da corrente de campo. Esse controlador recebe o sinal de potência da turbina e, a partir dessa informação, determina a corrente que deve ser injetada na bobina do campo, passando pelo bloco *Switch*. Foi feita uma análise do comportamento da potência da turbina e das correntes permitidas para atingir a eficiência máxima do gerador. A entrada e a saída do controlador podem ser vistas na Figura 3.13.

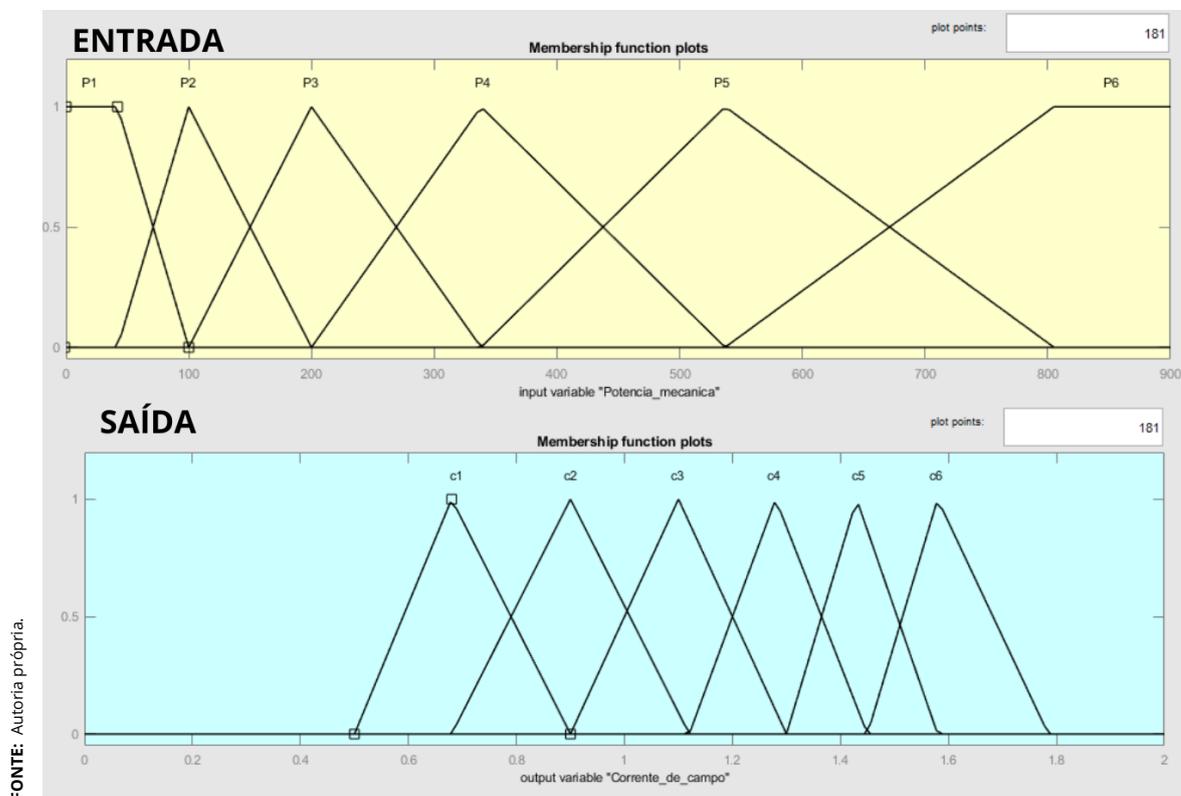


Figura 3.13 – Entrada e saída do controlador fuzzy.

Os parâmetros usados no submodelo do alternador podem ser consultados na Tabela 3.3

**Tabela 3.3** – Dados usados na simulação do alternador

Parâmetros	Valor	Descrição
$K_M$	$5,34 \cdot 10^{-2}$	Constante da máquina (V-s/rad-A)
$R_S$	1,82	Resistência do estator ( $\Omega$ )
$R_f$	$2,04 \cdot 10^{-1}$	Resistência do campo ( $\Omega$ )

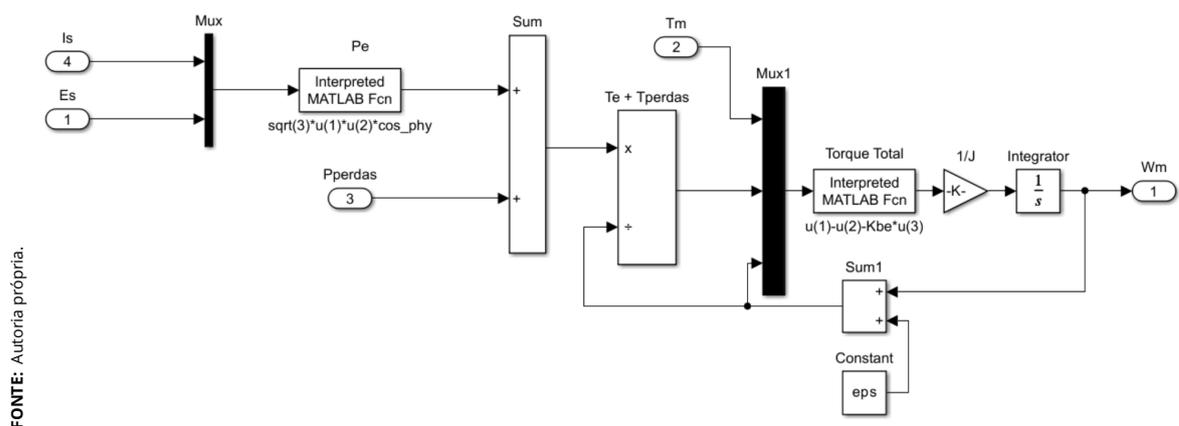
FONTE: Autoria própria

### 3.4.3.3 Modelagem do *drive train*

O submodelo do *drive train* foi baseado na Equação 3.7. Tem como objetivo adequar a baixa rotação da turbina para uma alta rotação, que é transmitida ao eixo do alternador. No modelo, são calculados o torque elétrico do gerador e o torque correspondente às perdas de potência, que, junto com torque mecânico, são utilizados para calcular a velocidade angular mecânica.

$$\omega_G = \frac{1}{J} \cdot \int (\mathcal{T}_w - \mathcal{T}_e - \mathcal{T}_{perdas}) dt \quad (3.7)$$

O modelo da *drive train* desenvolvido no Simulink pode ser visto na Figura 3.14.



**Figura 3.14** – Diagrama do modelo do *drive train*.

O modelo tem 4 entradas, das quais 2,  $I_s$  e  $E_s$ , são utilizadas no bloco  $Pe$  para calcular a potência elétrica do gerador. O sinal da potência elétrica é somado à perda de potência no bloco  $Sum$ . Em seguida, o resultado é dividido por  $Wm$ ,

obtendo-se o torque, que corresponde à soma do torque elétrico com o torque associado às perdas de potência.

O bloco *Torque Total* recebe 3 sinais: o torque resultante do bloco  $T_e + T_{perdas}$ , o torque de entrada  $T_m$ , e o sinal de realimentação  $W_m$ . No bloco,  $W_m$  é multiplicado com  $K_{be}$ , para calcular as perdas por fricção. O sinal que sai do bloco é dividido por  $J$ , onde  $J$  representa o momento de inércia, e integrado no bloco *Integrator*. O resultado desse processo é o valor de  $W_m$ , que será a saída final do submodelo.

Os parâmetros usados no submodelo do alternador pode ser consultados na Tabela 3.4, baseados nos valores usados por (AJAYI, 2012).

**Tabela 3.4** – Dados usados na simulação da drive train.

Parâmetros	Valor	Descrição
$K_{be}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	Constante de perdas por fricção (W/rpm)
$J$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	Inércia da turbina ( $kg \cdot m^2$ )

FONTE: Valores baseados em (AJAYI, 2012)

### 3.4.3.4 Modelagem das perdas de potência

Esse submodelo Perdas de Potência tem o objetivo de consolidar a potência perdida em todos os subsistemas do aerogerador em um único lugar, assim, facilitando o processo de modelagem e de análise das perdas. A Figura 3.15 apresenta o submodelo das perdas de potência. Esse submodelo possui 6 entradas e uma saída.

As duas primeiras entradas,  $I_s$  e  $I_f$ , e usadas para calcular as perdas elétricas. O bloco *Estator* calcula a perda de potência no estator devido à resistência  $R_s$ , utilizando a Equação 3.8. Já no bloco *Campo*, é calculado a perda de potência na bobina do campo causadas pela resistência  $R_f$ , Equação 3.9.

$$P_E = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad (3.8)$$

$$P_C = R_f \cdot I_f^2 \quad (3.9)$$

As perdas no conversor são determinadas pela potência calculada nos blocos *Diodo*, *Escova* e *Duty Cycle*. O bloco *Diodo* calcula a perda que ocorre nos diodos do retificador trifásico, utilizando o sinal  $I_s$ , conforme a Equação 3.10. Já o bloco *Escova* calcula, a partir do sinal  $I_f$ , a perda de potência que ocorre nas escovas,

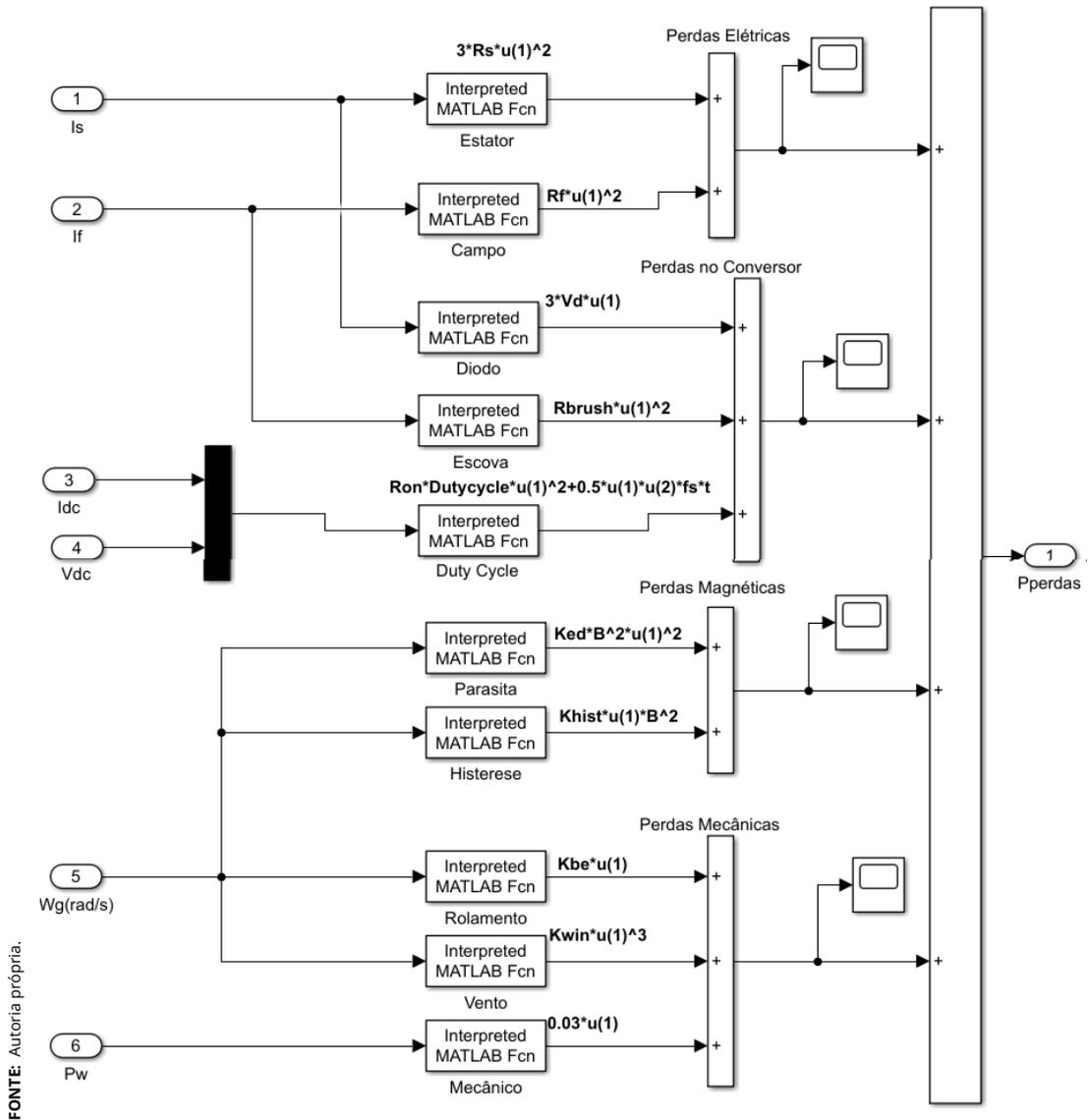


Figura 3.15 – Diagrama do modelo das perdas de potência.

conforme a Equação 3.11. Embora as escovas não façam parte do conversor do alternador, elas integram o sistema de realimentação. Por fim, o bloco *Duty Cycle* calcula a perda de potência decorrente do ciclo de trabalho do regulador de tensão, conforme a Equação 3.12. As entradas desse bloco são  $I_{dc}$  e  $V_{dc}$ .

$$P_d = 3 \cdot V_d \cdot I_s \quad (3.10)$$

$$P_{es} = R_{brush} \cdot I_f^2 \quad (3.11)$$

$$P_{d.c.} = R_{on} \cdot DutyCycle \cdot I_{DC}^2 + 0,5 \cdot I_{DC} \cdot V_{DC} \cdot fs \cdot tsw \quad (3.12)$$

As perdas causadas por efeitos magnéticos que ocorrem no gerador são calculadas nos blocos *Parasita* e *Histerese*. O bloco *Parasita* calcula a potência perdida devido às correntes parasitas que surgem no núcleo de aço, principalmente no núcleo do rotor, que não é laminado. Essa perda é determinada pela Equação 3.13, que esta em função da entrada  $\omega_g$  (rad/s). Já o bloco *Histerese* calcula a perda de potência associada ao efeito de histerese no núcleo. Essa perda é dada pela Equação 3.14, que esta em função da entrada  $\omega_g$  (rad/s).

$$P_p = K_{ed} \cdot B^2 \cdot \omega_G^2 \quad (3.13)$$

$$P_{hist} = K_{hist} \cdot \omega_G \cdot B^2 \quad (3.14)$$

As perdas mecânicas são determinadas pela soma das saídas dos blocos *Rolamento*, *Vento* e *Mecânica*. O bloco *Rolamento* está programado com a Equação 3.15, que recebe o sinal da entrada  $\omega_g$  (rad/s) e calcula a perda de potência nos rolamentos do gerador elétrico. Já o bloco *Vento* calcula a perda de potência devido à velocidade do vento na estrutura da turbina, pode ser calculada pela Equação 3.16. Por último, o bloco *Mecânico* calcula outras perdas mecânicas existentes, de acordo com a Equação 3.17.

$$P_r = K_{be} \cdot \omega_G \quad (3.15)$$

$$P_{Vo} = K_{win} \cdot \omega_G^3 \quad (3.16)$$

$$P_{mo} = 0,03 \cdot P_w \quad (3.17)$$

Os parâmetros usados no submodelo das perdas de potência pode ser con-

sultados na Tabela 3.5

**Tabela 3.5** – Dados usados na simulação das perdas de potência

Parâmetros	Valor	Descrição
$R_s$	1.81	Resistência do estator ( $\Omega$ )
$R_f$	$2,04 \cdot 10^{-1}$	Resistência do campo ( $\Omega$ )
$V_d$	$8 \cdot 10^{-1}$	Queda de tensão no diodo (V)
$R_{brush}$	3,8	Resistência das escovas ( $\Omega$ )
$R_{on}$	$2 \cdot 10^{-2}$	Resistência do transistor em estado ON ( $\Omega$ )
$Dutycycle$	$4 \cdot 10^{-1}$	Porcentagem de ciclo de trabalho
$f_s$	$100 \cdot 10^3$	Frequência de chaveamento (Hz)
$t_{sw}$	$50 \cdot 10^{-9}$	Tempo de chaveamento ON e OFF (s)
$K_{ed}$	$6,565 \cdot 10^{-6}$	Constante de perdas por correntes parasitas (W/rpm)
$K_{hist}$	$1,463 \cdot 10^{-2}$	Constante de perdas por histerese magnética (W/rpm)
$K_{be}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	Constante de perdas por fricção (W/rpm)
$K_{win}$	$7,002 \cdot 10^{-10}$	Constante de perdas por ventilação (W/rpm <sup>3</sup> )

FONTE: Valores obtidos em ensaios e na literatura.

### 3.4.3.5 Modelagem da bateria

O submodelo da bateria é bem simples, consiste na entrada  $V_{dc}$ , que é a entrada do bloco Bateria, o qual está programado com a Equação 3.18. Como saída, o bloco fornece o valor da corrente fornecida pela bateria, que é limitada pelo bloco de saturação.

$$I_b = \frac{V_{dc} - V_{b\_int}}{R_{int}} \quad (3.18)$$

O diagrama do modelo da bateria pode visto na Figura 3.16.

Os parâmetros usados no submodelo da bateria pode ser consultados na Tabela 3.6

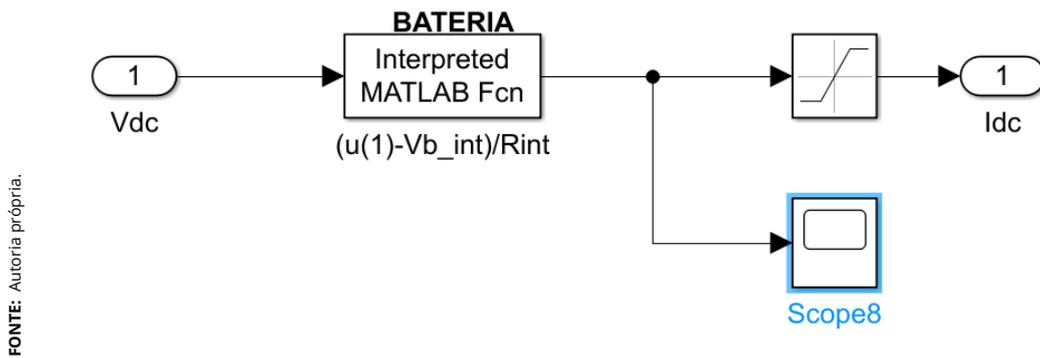


Figura 3.16 – Diagrama do modelo da bateria.

Tabela 3.6 – Dados usados na simulação das perdas de potência

Parâmetros	Valor	Descrição
$V_b$	12	Tensão interna da bateria (V)
$R_{int}$	$5 \cdot 10^{-2}$	Resistência interna da bateria ( $\Omega$ )

FONTE: Autoria própria

# Capítulo 4

## RESULTADOS

### 4.1 Análise dos resultados dos ensaios em laboratório

Os ensaios para determinar algumas características elétricas do alternador automotivo foram realizados no laboratório do Instituto Federal da Bahia - campus Vitória da Conquista. Eles foram realizados conforme descrito na seção "**Procedimentos metodológicos para ensaio do alternador Lundell**".

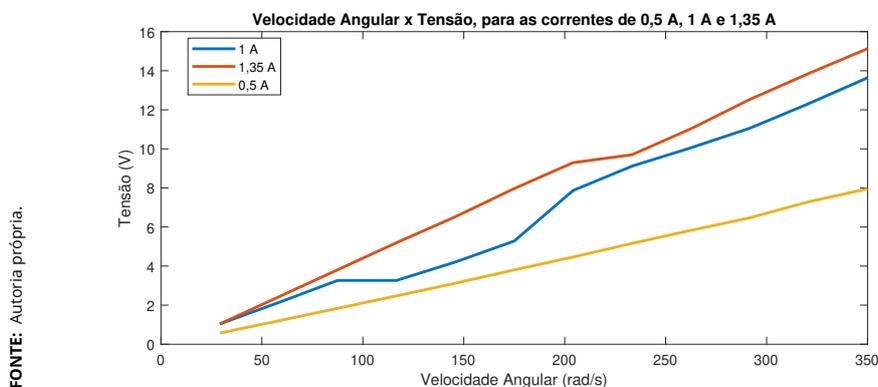
#### 4.1.1 Resultados dos ensaios a vazio

O primeiro ensaio realizado foi o ensaio a vazio. O inversor foi configurado para fornecer uma frequência de 60 Hz, permitindo que o motor operasse em sua velocidade nominal. No alternador, foi fornecida uma corrente à bobina do campo, e conectado um multímetro na função voltímetro para medir a tensão nas bobinas do estator. Além disso, foi utilizado um tacômetro para medir a velocidade no eixo do alternador.

Em seguida, a frequência do inversor foi reduzida em decrementos de 5 Hz até atingir 5 Hz, registrando os valores de tensão no estator e a velocidade no eixo do alternador. Esse ensaio foi repetido três vezes para diferentes valores de corrente de campo, 0,5 A, 1 A e 1,35 A.

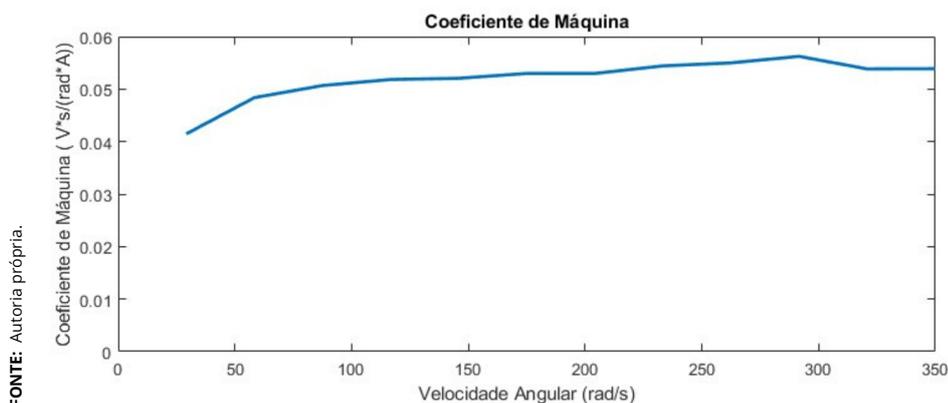
A tensão medida no estator refere-se à tensão de linha, então foi dividida por  $\sqrt{3}$  para obter o valor da tensão de fase do estator.

A partir dos resultados do ensaio a vazio, foram elaborados dois gráficos que podem ser visto nas Figuras 4.1 e 4.2.



**Figura 4.1** – Tensão induzida no estator em função do rotação, para as 3 corrente de campo.

A Figura 4.1 mostra a tensão de fase do estator em função da velocidade do eixo do alternador para as correntes de campo nos valores de 0,51 A, 1 A e 1,35 A. Pode-se observar que o gráfico correspondente a corrente de campo de 1,35 A apresenta uma inclinação maior do que as outras duas. Isso já era esperado, uma vez que, na Eq. 2.22, a  $E_s$  é diretamente proporcional  $I_f$ . Também pode ser notado que as linhas estão próximas de uma reta, o que indica um comportamento linear do alternador na conversão de energia.



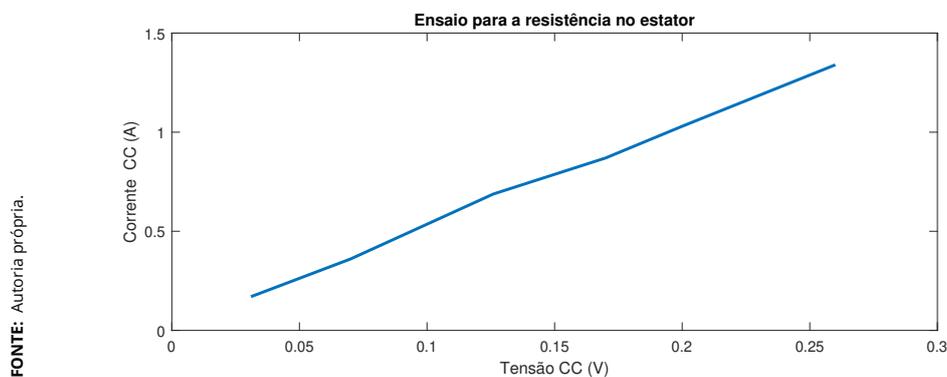
**Figura 4.2** – Coeficiente de máquina em função da velocidade angular.

Com os valores de rotação do alternador, de tensão de fase do estator e de corrente de campo, foi calculado o valor do coeficiente de máquina através da Eq. 2.22. O valor de corrente utilizado foi de 1,35 A. Foi montado um gráfico, Figura 4.2, com cada valor de  $k_M$  em relação à rotação do alternador. O valor médio de  $k_M$  foi igual  $0,053 \text{ V} \cdot \text{s}/(\text{rad} \cdot \text{A})$ .

### 4.1.2 Resultados dos ensaios para determinar as resistências do estator e do campo

Para determinar a resistência do estator, foram realizados dois ensaios. O primeiro consistiu em medir a resistência com o auxílio de um multímetro, que foi conectado aos terminais das fases do alternador. Logo, o valor medido teve que ser dividido por 2 para obter o valor da resistência de uma bobina. Foi realizada a medição entre as fases U e V, e depois entre as fases U e W. Ambos os valores foram semelhantes, o que indica que as fases estão balanceadas. O valor obtido foi de  $1,55 \Omega$ .

O segundo ensaio consistiu em fornecer alguns valores de tensão ao estator e medir a corrente. Com esses valores, foi montado o gráfico da Figura 4.3, a inclinação da linha corresponde ao valor da resistência, que foi calculada no valor de  $1,81 \Omega$ . Esse valor é 12% superior ao da primeira medida. Isso ocorre devido à passagem da corrente, que gera aquecimento no cobre, aumentando a resistência do metal. Esse valor é mais próximo da realidade. Esse ensaio foi realizado somente entre as fases U e V, não sendo necessário repetir entre as fases U e W, já que foi confirmado que as bobinas estão balanceadas. Também foi feito o mesmo tratamento de dividir o valor da resistência por 2.



**Figura 4.3** – Corrente cc em função da tensão cc no estator.

Ensaio semelhante foram realizados na bobina do campo a fim de determinar a resistência do campo, conforme mostrado no gráfico da Figura 4.4. Contudo, os valores de resistência obtidos não são divididos por 2, já que se trata somente de uma bobina. O valor de resistência medido pelo multímetro foi de  $0,16 \Omega$ , enquanto o valor calculado pelo segundo ensaio foi de  $0,204 \Omega$ , o que representa um aumento de 27,5 %.

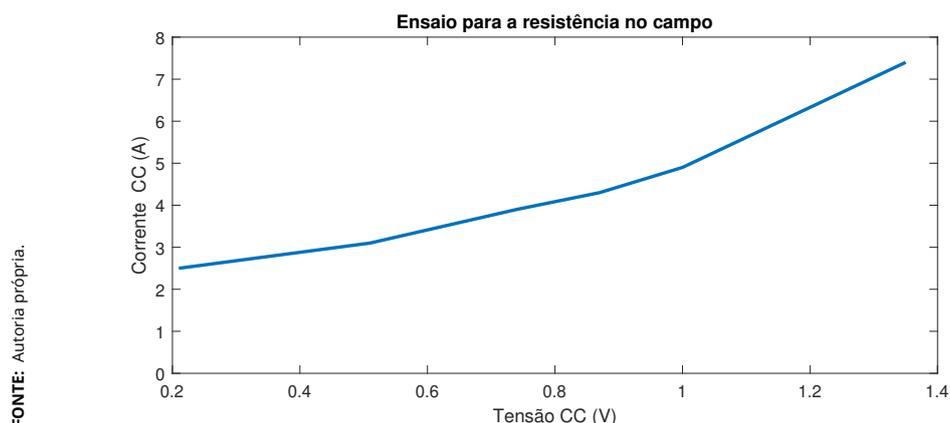


Figura 4.4 – Corrente cc em função da tensão cc no campo.

### 4.1.3 Resultados dos ensaios de curto-circuito

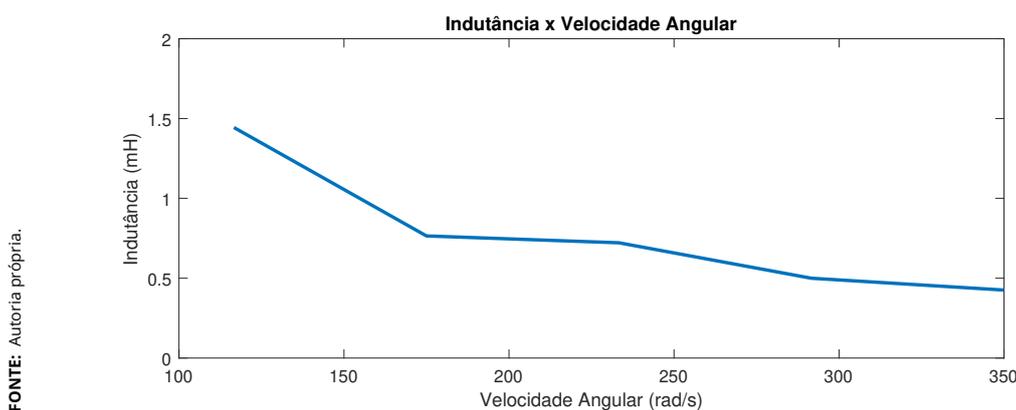
O ensaio de curto-circuito foi realizado de maneira semelhante ao ensaio a vazio. A única alteração foi que os terminais das bobinas do estator foram conectados entre si, fechando um curto-circuito. Foi usado um amperímetro para medir a corrente de curto-circuito. A indutância foi calculada utilizando a Equação 4.1, onde a frequência elétrica e impedância são determinadas pelas Equações 4.2 e 4.3, respectivamente.

$$L_S = \frac{\sqrt{Z_S^2 - R_S^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.1)$$

$$f = \frac{\text{polos} \cdot \omega_{(rad/s)}}{4 \cdot \pi} \quad (4.2)$$

$$Z_S = \frac{E_s}{I_{curto}} \quad (4.3)$$

Os valores calculados para cada velocidade do alternador podem ser observado no gráfico da Figura 4.5. Nota-se que o valor da indutância diminui drasticamente a partir de 100  $rad/s$ , que corresponde à velocidade nominal do alternador. Assim, foi considerado o valor da indutância de 0,74  $mH$ , que é a média do gráfico a partir de 100  $rad/s$ .

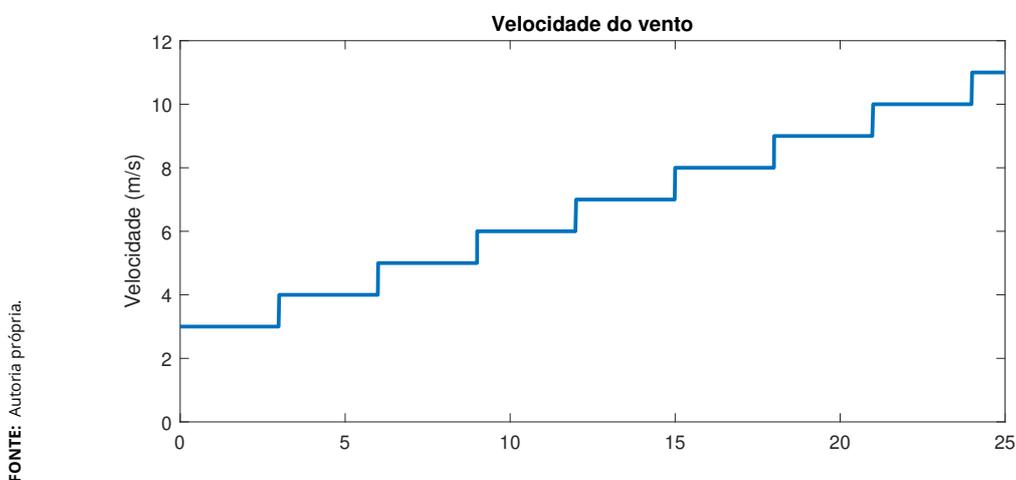


FONTE: Autoria própria.

Figura 4.5 – Indutância do estator em função da velocidade angular

## 4.2 Análise dos resultados de simulação

Para a simulação, foi programado um sinal em formato de degraus, que representa a velocidade do vento. O sinal teve a duração de 25 segundos, começando com o valor de 3 m/s e sendo incrementado em 1 m/s a cada 3 segundos, até atingir 11 m/s aos 24 s, como pode ser visto na Figura 4.6.

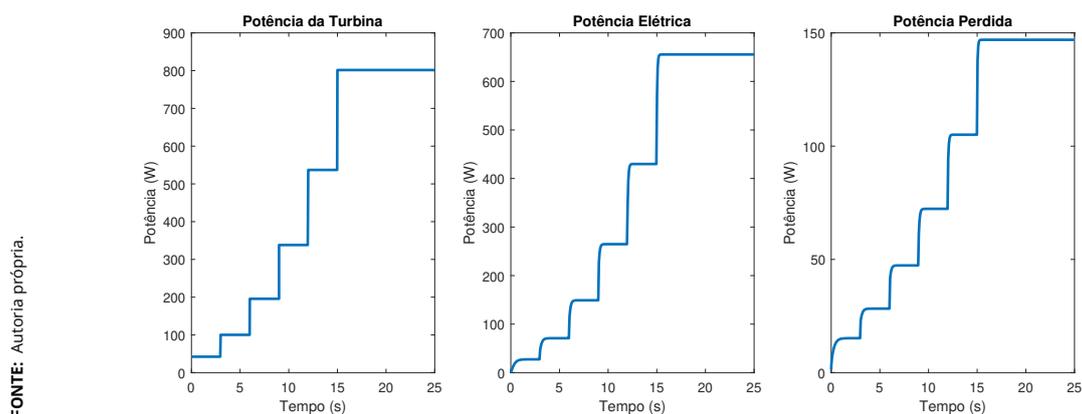


FONTE: Autoria própria.

Figura 4.6 – Sinal representando a velocidade de vento

Na Figura 4.7, são representados três potências: a gerada pela turbina, a gerada pelo alternador e a gerada pelas perdas. Todas elas seguem a variação da velocidade do vento, porém, pode-se observar um comportamento exponencial. Esse comportamento já era esperado, pois a potência da turbina é calculada pela Equação 2.3, na qual a velocidade do vento é elevada ao cubo. Conseqüentemente, as outras duas potências seguem a mesma tendência. Isso ocorre porque a potência da turbina é a soma das outras duas, respeitando assim a lei de conservação da potência.

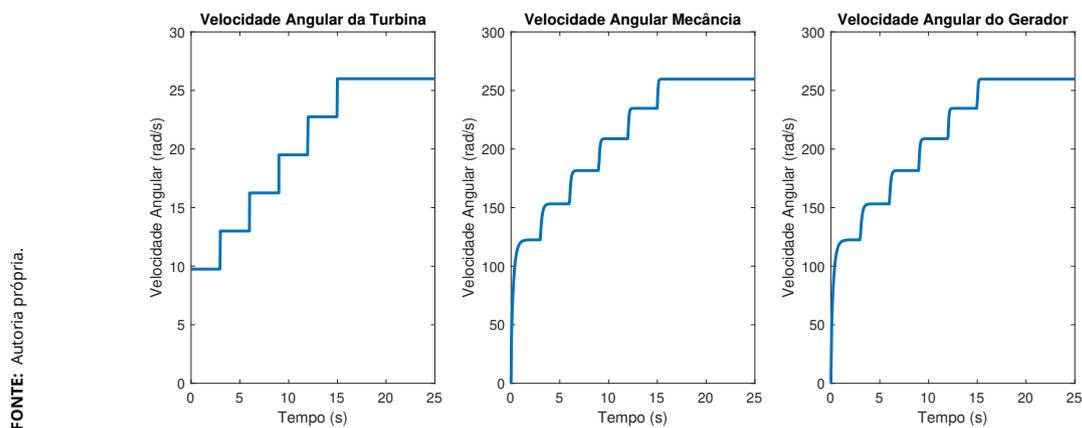
## 4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO



**Figura 4.7** – Potência gerada pela turbina, potência gerada pelo alternador e potência perdida

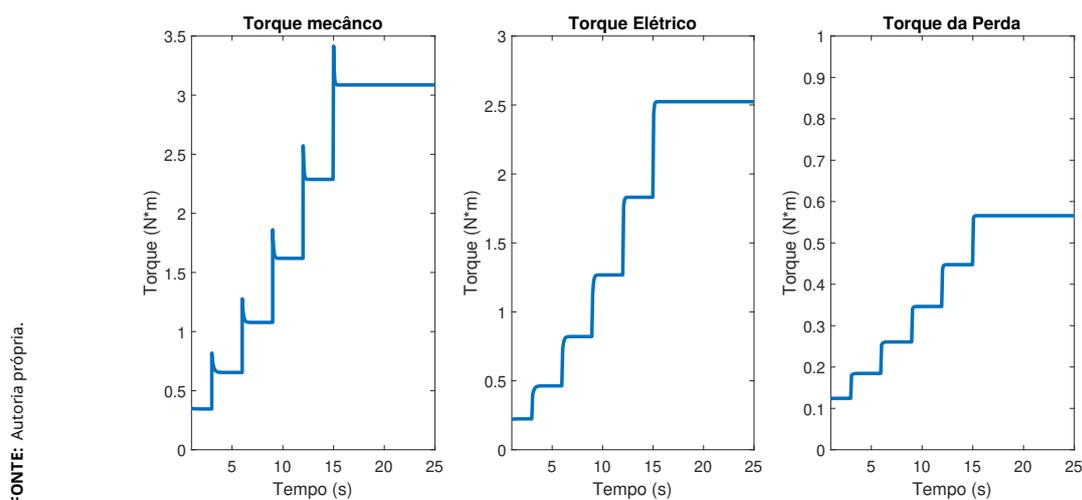
A Figura 4.8 ilustra os sinais da velocidade angular da turbina, da velocidade mecânica e da velocidade do gerador. Pode-se observar que as velocidades mecânicas e do gerador são iguais e aproximadamente 10 vezes maiores que a velocidade do vento, devido da relação de transmissão da *drive train* que é 10.

Além disso, nota-se um corte no sinal das velocidades, causado pelo limite operacional da turbina, que não permite que sua velocidade aumente para ventos superiores a 8 m/s. O objetivo dessa restrição é proteger os componentes do aerogerador.



**Figura 4.8** – Velocidade angular da turbina, velocidade angular mecânica e velocidade angular do alternador

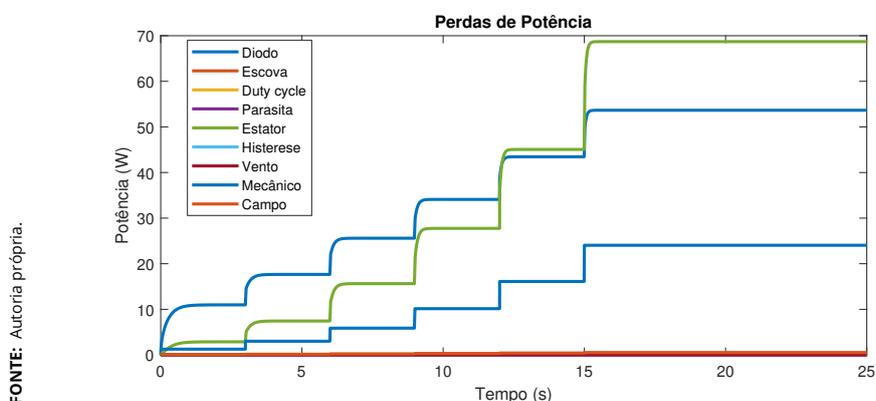
A Figura 4.9, apresenta os gráficos com sinal do torque mecânico, com sinal do torque elétrico e com sinal do torque provocado pelas perdas de potência. Pode ser observado que a soma dos elétricos e das perdas é igual o torque mecânico. No gráfico da torque mecânico foi apresentado uma pequena instabilidade quando ocorria um degrau.



FONTE: Autoria própria.

Figura 4.9 – Torque mecânico, torque elétrico e torque correspondente às perdas

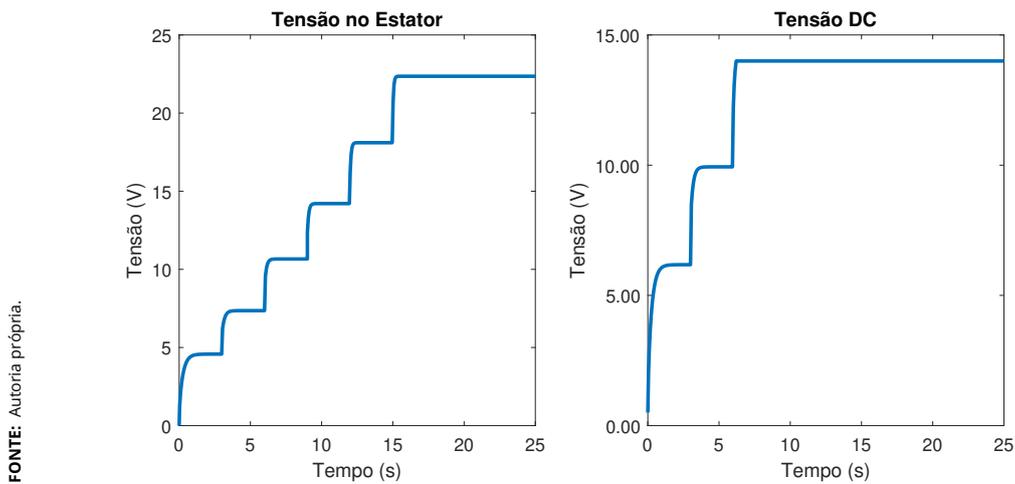
O sinal que representa a perda de potência na Figura 4.7 é, na realidade, a composição de vários sinais que representa perdas distintas. Para uma análise mais detalhada sobre as perdas, foi elaborado o gráfico da Figura 4.10. Com esse gráfico, pode-se observar que as perdas no estator, no diodo e na mecânica representam quase 100% do total, enquanto as demais perdas são praticamente desprezíveis.



FONTE: Autoria própria.

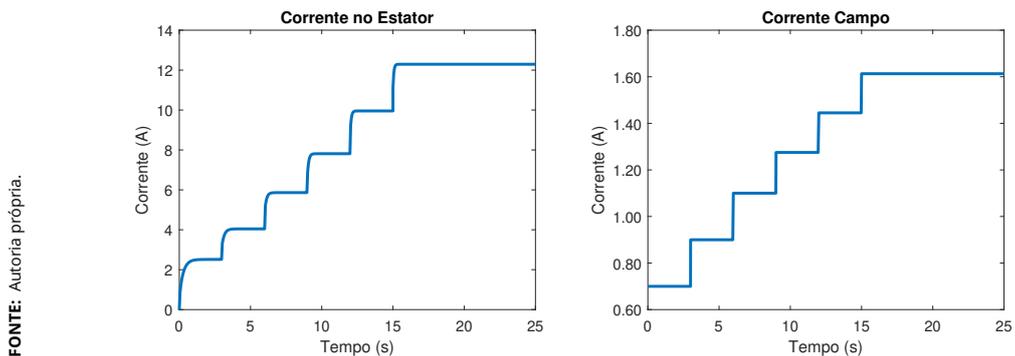
Figura 4.10 – Composição da potência perdida no aerogerador

Os gráficos da Figura 4.11 representam a tensão no estator do alternador e a tensão retificada na saída do retificador. O sinal de tensão no estator assume um formato em degraus, semelhante ao sinal do vento, até ser limitado pelo limite operacional da turbina. Já o sinal na saída do retificador é limitado muito antes de a turbina atingir seu limite operacional. Essa limitação é imposta pelo regulador de tensão presente no alternador, cuja função é proteger a bateria e outros componentes do automóvel.



**Figura 4.11** – Sinal da tensão no estator e de tensão retificada.

A Figura 4.12 ilustra dois gráficos o primeiro com sinal de corrente gerada no estator, e o segundo gráfico o sinal da corrente injetada no campo, que é controlada pelo controlador fuzzy.



**Figura 4.12** – Sinal da corrente gerada pelo estator e a corrente fornecida ao campo.

Foi montado a Tabela 4.1, com valores dos parâmetros para a velocidade do vento de 8 m/s. A turbina apresentou uma potência inferior a do projeto, o que foi atribuído à perda de potência. Já a potência elétrica apresentou um valor superior ao esperado. A potência perdida representa 18,8% da potência da turbina.

**Tabela 4.1** – Dados da simulação para uma velocidade de vento 8 m/s

Parâmetros	Valor	Unidade de medida
$V_o$	8	Velocidade do vento (m/s)
$P_w$	801,5	Potência da Turbina (W)
$P_e$	650	Potência elétrica (W)
$P_p$	151,1	Potência perdida (W)
$\mathcal{T}_m$	3,08	Torque mecânico( $N \cdot m$ )
$\mathcal{T}_e$	2,52	Torque elétrico( $N \cdot m$ )
$\mathcal{T}_p$	0,57	Torque das perdas( $N \cdot m$ )
$E_S$	22,35	Tensão no estator(V)
$V_{dc}$	14	Tensão na saída do retificador (V)
$I_f$	1,61	Corrente no campo (A)
$I_S$	12,29	Corrente no Estator (A)
$\omega_g$	260	Rotação no gerador (rad/s)
$\omega_t$	26	Rotação da turbina (rad/s)
$C_{P.T.}$	0,43	Coefficiente de potência da turbina
$n_{P.A.}$	0,349	Rendimento do aerogerador

FONTE: Autoria própria

## Capítulo 5

### Considerações Finais

Diante do aumento do consumo de energia elétrica atrelado às questões ambientais, que exigem formas mais sustentáveis de produção de energia, fica claro que as usinas eólicas são uma ótima alternativa na geração de energia. Uma questão que ainda deve ser solucionada é a pouca popularidade das usinas eólica de pequeno porte. Isso ocorre, principalmente, devido à escassez de fabricantes de aerogeradores de pequeno porte, o que encarece os custos e dificulta a adoção dessa tecnologia.

O Brasil apresenta um ambiente propício a esse tipo de fonte elétrica, principalmente na região nordeste. Isso pode ser notado devido ao grande número de parques eólicos implantados nas últimas décadas na região, o que tornou a energia eólica uma das principais fontes de geração elétrica do país. No entanto, essa produção se restringe basicamente a aerogeradores de grande porte, que pertencem a grandes empresas do setor energético. Diante desse cenário, o Projeto de um Aerogerador Modelo Darrieus Tipo H Utilizando um Alternador Automotivo, teve como objetivo desenvolver um protótipo utilizável na geração distribuída ou em sistemas off-grid.

Os meios empregados para desenvolvimento do projeto buscaram a criação de um sistema eficiente aliado à simplicidade. Todavia, é importante destacar os desafios encontrados durante o processo. O primeiro desafio foi a necessidade de alimentar o campo do alternador, o que exige uma bateria, implicando em um custo adicional na implementação do projeto. Além disso, é necessário implementar um dispositivo que desligue a bateria quando a velocidade do vento não for suficiente para gerar energia, evitando assim o descarregamento da mesma.

---

O segundo desafio é a necessidade de utilizar a *drive train*, o que torna a implementação mais cara e complexa. Além disso, seu uso exige manutenção mais frequente, uma vez que as engrenagens precisam de lubrificação para garantir maior eficiência. Além disso, com o tempo, a lubrificação deve ser substituída, e os componentes podem precisar de troca devido ao desgaste

A dimensão da turbina projetada pode ser um desafio. Ela possui um raio de 1,85 metros, resultando em uma área de  $10,75 \text{ m}^2$ , o que é considerável e pode dificultar sua instalação em zonas urbanas. No entanto, em zona rural isso não é um problema, pois a turbina pode ser instalada em pastagens, a uma altura que permita o aproveitamento do espaço abaixo para criação de animais ou atividades agrícolas.

Os resultados da simulação evidenciaram alguns fatores que devem ser levados em consideração. Um desses fatores é perda de potência em alguns componentes. Essa perda indica que o alternador não é tão eficiente, podendo ser um componente a ser revisado e, eventualmente, substituído por outro tipo de gerador.

Foi notado a necessidade de um controlador de corrente de campo para atingir a potência máxima. Isso torna o projeto um pouco mais caro e complexo, mas por outro lado abre a possibilidade de aumento da eficiência.

É importante destacar algumas das qualidades do alternador, como sua ampla disponibilidade no mercado e seu custo acessível. Além disso, o alternador apresenta robustez, podendo operar em ambientes de alta temperatura e estar exposto a chuva e poeira. Outra vantagem é que ele já possui um retificador e um regulador embutidos, permitindo a entrega de uma tensão retificada e regulada.

A simulação foi crucial no processo de análise. Por se tratar de um sistema com múltiplas partes que interagem entre si, a análise sem o auxílio de um software seria extremamente complexa. A simulação permitiu identificar erros e contribuiu para sua resolução.

O projeto do aerogerador não pode ser considerado completo, uma vez que o protótipo não foi construído e testado para validar as projeções deste trabalho. Contudo, esse trabalho teve sucesso nos seus objetivos. Ele conseguiu projetar uma turbina, com todas as dimensões e características necessária para sua construção, baseado em referências bibliográficas consolidadas. Além disso, um alternador foi testado e caracterizado em laboratório. Por fim, o modelo foi simulado,

---

e os resultados demonstraram que o aerogerador é capaz de gerar energia, podendo ser utilizado para alimentar pequenas cargas.

# Capítulo 6

## Sugestões para Trabalhos Futuros

Aqui serão listados algumas sugestões para trabalhos futuros.

- ▶ Construir e testar o protótipo da turbina para validar, na prática, o projeto e o modelo.
- ▶ Fazer uma análise com outros tipos de geradores elétricos e compará-los com o alternador. Além disso, pode ser feito uma análise com diferentes modelos e marcas de alternadores.
- ▶ Utilizar outra fonte de energia mecânica para fornecer velocidade angular ao gerador, como, por exemplo, a energia hídrica.
- ▶ Realizar um estudo de viabilidade econômica para validar o custo-benefício

# REFERÊNCIAS

ABEEólica. Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. BOLETIM ANUAL 2023. <[https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424\\_ABEEOLICA\\_BOLETIM-ANUAL-2024\\_DIGITAL\\_PT\\_V3.pdf](https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf)> [Acessado em 13 de agosto de 2024]. 2024. ( Citado 3 vezes nas páginas 1, 7, and 8. )

AJAYI, O. *APPLICATION OF AUTOMOTIVE ALTERNATORS IN SMALL WIND TURBINES*. Dissertação (Mestrado) — Delft University of Technology, 2012. ( Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 26, 27, and 44. )

AMARAL, B. M. *MODELOS VARX PARA GERAÇÃO DE CENÁRIOS DE VENTO E VAZÃO APLICADOS À COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011. ( Citado na página 10. )

AMARANTE, O. A. C. D.; ZACK, M. B. J.; SÁ, A. L. D. ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO. 2021. <[https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)> [Acessado em 14 de agosto de 2024]. ( Citado 2 vezes nas páginas 6 and 31. )

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/micro-e-minigeracao-distribuida>> [Acessado em 19 de agosto de 2024]. 2024. ( Citado 2 vezes nas páginas 2 and 8. )

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. MICRO E MINI-GERAÇÃO DISTRIBUÍDA APRESENTA ACRÉSCIMO DE 7,4 GW EM 2023. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/micro-e-minigeracao-distribuida-apresenta-acrescimo-de-7-4-gw-em-2023#:~:text=Pot%C3%Aancia%20instalada%20total%20ultrapassa%20os,conectados%20%C3%A0%20rede%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o>> [Acessado em 23 de agosto de 2024]. 2024. ( Citado na página 8. )

BRUSCA, S.; LANZAFAME, R.; MESSINA, M. Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, v. 5, p. 1–8, 08 2014. ( Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 16, and 31. )

CARMO, D. M. F. G. M. *Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2022. ( Citado 2 vezes nas páginas 11 and 12. )

DIAZ, D. A. G. *ESTUDO DE TURBINA EÓLICA VERTICAL COM ÂNGULO DE PÁ VARIÁVEL*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. (Citado na página 15.)

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. RELATÓRIO SÍNTESE 2024 - ANO BASE 2023. <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2024\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf)> [Acessado em 13 de agosto de 2024]. 2024. (Citado na página 1.)

GOUVÊA, R. L. P. de; SILVA, P. A. da. Desenvolvimento do setor eólico no Brasil. *BNDES*, 2018. (Citado na página 8.)

GWEC. Conselho Global de Energia Eólica. GLOBAL WIND REPORT 2024. <<https://gwec.net/global-wind-report-2024/>> [Acessado em 20 de agosto de 2024]. 2024. (Citado na página 7.)

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. CARACTERÍSTICAS DOS DOMICÍLIOS E DOS MORADORES 2022. <[https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com\\_mediaibge/arquivos/1cd893a10b3cabf31fc31e994531632f.pdf](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/1cd893a10b3cabf31fc31e994531632f.pdf)> [Acessado em 13 de agosto de 2024]. 2023. (Citado na página 1.)

INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. O QUE É GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. <[https://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](https://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)> [Acessado em 19 de agosto de 2024]. 2024. (Citado na página 2.)

JUNIOR, J. G. D. O. *PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL TIPO H PARA TESTE EM TÚNEL DE VENTO*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, 2022. (Citado 2 vezes nas páginas 10 and 13.)

MARTINELLO, D. *ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO EM AMBIENTE SIMULINK/MATLAB PARA SIMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do do Paraná, 2013. (Citado na página 13.)

NOGUEIRA, J. L. F. *ANÁLISE AERODINÂMICA DO PERFIL NACA 4412, PARA UTILIZAÇÃO EM UMA AERONAVE NÃO TRIPULADA, COM EMPREGO DE DIFERENTES MÉTODOS NUMÉRICOS*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO, 2017. (Citado 2 vezes nas páginas 14 and 15.)

NUNEZ, D. L. Transmissão de energia mecânica por meio de correias flexíveis. 07 2022. (Citado na página 17.)

PEREIRA, C. et al. Comportamento dinâmico de transmissões por corrente: estudo numérico e experimental. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, v. 10, 05 2006. (Citado na página 18.)

RUBIO, F.; LLOPIS-ALBERT, C.; PEDROSA, A. Analysis of the influence of calculation parameters on the design of the gearbox of a high-power wind turbine. *Mathematics*, v. 11, p. 4137, 09 2023. (Citado 2 vezes nas páginas 16 and 17.)

RUSSO, E. *Sistema de geração de energia elétrica para acionamento de cargas embarcadas em máquinas agrícolas*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2012. (Citado 3 vezes nas páginas 20, 22, and 23.)

STATISTA. Capacidade eólica instalada acumulada em todo o mundo de 2001 a 2023(em gigawatts). <<https://www.statista.com/statistics/268363/installed-wind-power-capacity-worldwide/#:~:text=The%20cumulative%20capacity%20of%20installed,about%20946%20gigawatts%20that%20year>> [Acessado em 21 de agosto de 2024]. 2024. (Citado na página 7.)

STRICKLAND, J. H. Darrieus turbine: a performance prediction model using multiple streamtubes. *Albuquerque: Sandia Laboratories*, 1975. (Citado 2 vezes nas páginas 13 and 31.)

TJIU, W. et al. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation i: Assessment of darrieus vawt configurations. *Renewable Energy*, v. 75, 2015. (Citado 2 vezes nas páginas 10 and 11.)

UMANS, S. D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-85-8055-374-1. (Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 23, and 24.)

VILAVERDE, J. D. S. *Modelagem e Controle de um Sistema de Conversão de Energia Eólica com Gerador Síncrono de Ímã Permanente*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pampa, 2019. (Citado na página 19.)

# APÊNDICE A

## Código para dimensionar a turbina

**Código A.1** – Código para dimensionar a turbina

```
1 clear all;
2 clc;
3
4 %---Cálculo de Parâmetros de um Aerogerador de
5 %Eixo Vertical (VAWT)-----
6 % Perfil NACA0012 para uma potência especificada.
7
8 % -----Dados de Entrada-----
9 P = 802;           % Potência (W).
10 Vo = 8;           % Velocidade do vento em fluxo livre (m/s).
11 N = 3;            % Número de lâminas.
12 AR = 0.8;         % Proporção do rotor (h/R).
13
14 %-----Constantes (NACA0012)-----
15 rho = 1.2;        % Densidade do ar em kg/m^3.
16 cp = 0.475;      % Coeficiente de potência (Strickland).
17 sigma = 0.3;     % Solidez do rotor (Strickland).
18 lambda = 4;      % Taxa de velocidade da ponta (Strickland).
19 v = 1.46E-5;     % Viscosidade cinemática do ar.
20
21 %-----CÁLCULOS-----
22 R = sqrt(P / (rho * Vo^3 * AR * cp)); % Raio do rotor (m).
23 h = R * AR;      % Comprimento da lâmina (m).
```

```

24 c = (sigma * R) / N;      % Corda do aerofólio (m).
25 w = (lambda * Vo) / R;   % Velocidade angular (rad/s).
26 T = P / w;               % Torque (N*m).
27
28 % Largura máxima do perfil (12% da corda)
29 largura_maxima = 0.12 * c;
30
31 % Exibir os resultados finais
32 disp('RESULTADOS FINAIS:');
33 disp([' Raio do rotor (R): ', num2str(R), ' m']);
34 disp([' Comprimento da lâmina (h): ', num2str(h), ' m']);
35 disp([' Corda do aerofólio (c): ', num2str(c), ' m']);
36 disp([' Largura máxima do perfil: ', num2str(largura_maxima)
37 , ' m']);
38 disp([' Velocidade angular (w): ', num2str(w), ' rad/s']);
39 disp([' Torque (T): ', num2str(T), ' N*m']);
40
41 %-----PLOTANDO A EQUAÇÃO-----
42 x = linspace(0, c, 100); % Valores de x variando de 0 a c
43 y_upper = ((0.12 * c) / 0.2) * (0.2969 * sqrt(x ./ c)
44 - 0.1260 * (x ./ c) - 0.3516 * (x ./ c).^2 + 0.2843
45 * (x ./ c).^3 - 0.1015 * (x ./ c).^4);
46 y_lower = -((0.12 * c) / 0.2) * (0.2969 * sqrt(x ./ c)
47 - 0.1260 * (x ./ c) - 0.3516 * (x ./ c).^2
48 + 0.2843 * (x ./ c).^3 - 0.1015 * (x ./ c).^4);
49
50 % Plotando o contorno superior e inferior do perfil
51 figure;
52 plot(x, y_upper, 'b', 'DisplayName', 'Contorno superior');
53 % Contorno superior
54 hold on;
55 plot(x, y_lower, 'b', 'DisplayName', 'Contorno inferior');
56 % Contorno inferior
57
58 % Criando elementos invisíveis para a legenda
59 plot(NaN, NaN, 'w', 'DisplayName',
60 ['Corda (c): ', num2str(c, '%.4f'), ' m']);

```

```
61 plot(NaN, NaN, 'w', 'DisplayName',
62 ['Espessura máxima: ', num2str(largura_maxima, '%.4f'), ' m']);
63 plot(NaN, NaN, 'w', 'DisplayName',
64 ['Raio do rotor (R): ', num2str(R, '%.4f'), ' m']);
65 plot(NaN, NaN, 'w', 'DisplayName',
66 ['Comprimento da lâmina (h): ', num2str(h, '%.4f'), ' m']);
67
68 xlabel('x (m)');
69 ylabel('y (m)');
70 title('Contorno do Perfil Aerodinâmico NACA 0012');
71 grid on;
72 legend('Location', 'best');
73 axis equal;
74 hold off;
```

# APÊNDICE B

## Código MATLAB parâmetros

**Código B.1** – Código MATLAB parâmetros

```
1
2 clc;
3 clear all;
4 % pontos
5 lambda_data = [1 1.5 2 2.3 2.5 3 3.5 3.8 4 5 6 7];
6 Cp_data = [0.03 0.06 0.15 0.3 0.35 0.43 0.465 0.47 0.47
7 0.4 0.26 0.075];
8 % valor de beta
9 beta = 0.0;
10 % Função lambda_i
11 lambda_i = @(lambda, beta) (1 ./ (lambda + 0.008 * beta)
12 - 0.035 ./ (1 + beta.^3)).^(-1);
13 % Função a ser ajustada
14 model = @(params, lambda) params(1) * ((params(2)
15 ./ lambda_i(lambda, beta) - params(3) * beta - params(4))
16 .* exp(-params(5) ./ lambda_i(lambda, beta)));
17 % Parâmetros iniciais
18 initial_params = [0.5, 100, 0.1, 5, 10];
19 % Ajustar os parâmetros usando lsqcurvefit
20 options = optimset('Display', 'off');
21 params = lsqcurvefit(model, initial_params, lambda_data,
22 Cp_data, [], [], options);
23 % Valores ajustados
```

```
24 a = params(1);
25 b = params(2);
26 c = params(3);
27 d = params(4);
28 e = params(5);
29 % Exibir os valores ajustados
30 disp(['a = ', num2str(a)]);
31 disp(['b = ', num2str(b)]);
32 disp(['c = ', num2str(c)]);
33 disp(['d = ', num2str(d)]);
34 disp(['e = ', num2str(e)]);
35 % Parâmetros da simulação
36 lambda = linspace(0.1, 8, 100); % Razão de velocidade
37 % Função Cp(lambda) com os parâmetros ajustados
38 Cp_fit = a * ((b ./ lambda_i(lambda, beta) - c * beta - d)
39 .* exp(-e ./ lambda_i(lambda, beta)));
40 % Plotar Cp versus lambda
41 figure;
42 plot(lambda, Cp_fit, 'LineWidth', 2, 'DisplayName',
43 'Modelo Ajustado');
44 hold on;
45 plot(lambda_data, Cp_data, 'ro', 'MarkerSize', 8,
46 'DisplayName', 'Dados Originais');
47 xlabel('\lambda (Tip Speed Ratio)');
48 ylabel('C_p (Power Coefficient)');
49 title('Curva de Performance da Turbina Eólica Ajustada');
50 legend;
51 grid on;
52 hold off;
```

## B.1 Demonstração da formula da potência na turbina

A energia cinética  $E_c$  contida no vento é devido a deslocamento de uma massa de ar  $m$  que pode ser expressa pela Equação B.1.

$$E_c = \frac{m \cdot V_o^2}{2} \quad (\text{B.1})$$

A potência é dada pela Equação B.2.

$$P_w = \frac{dE_c}{dt} = \frac{\dot{m} \cdot V_o^2}{2} \quad (\text{B.2})$$

A taxa de variação da massa é dada pela Equação B.3.

$$\dot{m} = \rho \cdot A \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot V_o \quad (\text{B.3})$$

Substituindo a Equação B.3 na Eq. B.2, obtém-se a Eq. B.4.

$$P_w = \frac{dE_c}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot V_o^3}{2} \quad (\text{B.4})$$

A área da turbina é igual  $2 \cdot \pi \cdot R$ , logo a Eq. B.4 pode ser reescrita, Equação B.5.

$$P_w = \rho \cdot \pi \cdot R \cdot V_o^3 \quad (\text{B.5})$$