

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

EDUARDO ANTONIO ROVANI

**SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA
APLICAÇÕES OFF-GRID**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2025**

EDUARDO ANTONIO ROVANI

**SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA
APLICAÇÕES OFF-GRID**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Fernando Luis Tartari Peres


EDUARDO ANTONIO ROVANI

**SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA
APLICAÇÕES OFF-GRID**


**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 04 de dezembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO LUIS TARTARI PERES**
Data: 12/12/2025 19:04:57-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Esp. Fernando Luis Tartari Peres (Orientador)
URI Erechim

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO BORDIGNON**
Data: 12/12/2025 17:56:30-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Me. Sérgio Bordignon (Examinador)
URI Erechim

Cássio Luciano Baratieri

Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)
URI Erechim

À minha esposa, Sandra, pelo amor e compreensão diante das minhas ausências. Aos meus pais, Claice e Moacir, e ao meu irmão, Leonardo, meus exemplos ao longo de toda a vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder o dom da vida, pela força, inspiração e proteção ao longo desta caminhada acadêmica. Sem a Sua presença e auxílio, não seria possível alcançar esta etapa tão significativa da minha trajetória.

Ao Departamento de Engenharias e Ciências da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões por colocar à minha disposição todo material necessário para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Me. Arthur Beskow e ao Prof. Me. Oséias Matias de Oliveira Esmelindro, pelo imprescindível apoio, orientação e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pelas oportunidades de aprendizado e pelas valiosas horas compartilhadas nos laboratórios, que contribuíram diretamente para a realização deste projeto

Ao Prof. Me. Sérgio Bordignon e ao Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri componentes da banca, por sua disposição em contribuir com o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Fernando Luis Tartari Peres, pelos ensinamentos e por estar sempre pronto para me atender, sanando minhas dúvidas e contribuindo para o meu crescimento acadêmico e profissional.

A Engie Brasil Energia S. A. pela oportunidade dada para que pudesse realizar esta graduação.

Por fim, agradeço a meus pais Claice e Moacir e meu irmão Leonardo, e principalmente a minha esposa Sandra pelo amor, compreensão e motivação para prosseguir.

*Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de
você, menos o seu conhecimento.*

(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, implementação e validação experimental de um sistema de microgeração eólica, baseado em uma turbina *Savonius* helicoidal acoplada a um gerador de ímã permanente, projetado para aplicações em ambientes *off-grid*. O sistema é indicado para regiões nas quais a incidência média de vento supera 9 km/h, faixa que viabiliza sua operação eficiente e o aproveitamento energético local.

O estudo abrangeu o projeto, construção e ensaios laboratoriais do protótipo, incluindo a análise do desempenho aerodinâmico, características elétricas, comportamento sob diferentes regimes de carga, além das estratégias de retificação e armazenamento de energia. Os experimentos demonstraram que o sistema é capaz de operar com boa eficiência em condições reais, fornecendo energia a pequenas cargas e realizando recarga estável de baterias em situações típicas de uso.

Destaca-se a robustez do conjunto *Savonius*-Gerador de Ímã Permanente (GIP), o funcionamento adequado dos circuitos de retificação, filtragem e conversão CC/CC, bem como o gerenciamento automático da carga por meio de placa dedicada. As análises também evidenciaram o impacto do correto dimensionamento dos componentes e dos limites do conversor (corrente máxima de 5 A) para garantir autonomia, segurança e vida útil ao banco de baterias.

Conclui-se que a arquitetura desenvolvida representa uma alternativa sustentável, viável e de baixo custo para geração distribuída em locais remotos, especialmente onde o acesso à rede elétrica é inviável e há incidência de ventos moderados, tornando-se uma solução acessível para demandas energéticas básicas em comunidades isoladas.

Palavras-chave: Turbinas de eixo vertical. Geradores de ímã Permanente. Microgeração distribuída

ABSTRACT

This work presents the development, implementation, and experimental validation of a wind microgeneration system based on a helical Savonius turbine coupled to a permanent magnet generator, designed for off-grid applications. The system is suitable for regions where the average wind incidence exceeds 9 km/h, a threshold that enables efficient operation and effective local energy utilization.

The study included the design, construction, and laboratory testing of the prototype, with analysis of aerodynamic performance, electrical characteristics, behavior under different load conditions, as well as rectification and energy storage strategies. The experiments demonstrated that the system operates efficiently under practical conditions, providing energy to small loads and ensuring stable battery charging in typical usage scenarios.

The robustness of the Savonius–Permanent Magnet Generator (PMG) set stands out, along with the proper operation of the rectification, filtering, and DC/DC conversion circuits, as well as the automatic load management by a dedicated controller board. The analyses also evidenced the impact of proper component sizing and the converter's limits (maximum current of 5 A) on ensuring autonomy, safety, and battery lifespan.

It is concluded that the developed architecture represents a sustainable, viable, and low-cost alternative for distributed generation in remote locations—especially where access to the grid is unfeasible and moderate winds occur—becoming an accessible solution for basic energy demands in isolated communities.

Keywords: Wind energy. Vertical axis turbines. Permanent magnet Generator. Distributed microgeneration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada.....	19
Figura 2 – Diferenças físicas entre geradores <i>onshore</i> e <i>offshore</i>	22
Figura 3 – Evolução dos aerogeradores em função de sua potência.	23
Figura 4 – Aerogerador de eixo horizontal.....	26
Figura 5 – Exemplo de aerogerador do tipo <i>Savonius</i> helicoidal.....	28
Figura 6 – Exemplo de aerogerador do tipo <i>Darrieus</i> e suas variantes.....	29
Figura 7 – Exemplo de aerogerador do tipo híbrido <i>Darrieus-Savonius</i>	30
Figura 8 – Exemplo de gerador de ímã permanente.....	31
Figura 9 – Tipos de motores <i>BLDC inrunner</i> e <i>outrunner</i>	33
Figura 10 – Fluxograma do sistema completo.....	36
Figura 11 – Estudo desenvolvido por Oliveira (2014).....	37
Figura 12 – Turbina <i>Savonius</i> modela em <i>Fusion 360</i>	38
Figura 13 – Segregação em software das pás helicoidais.....	40
Figura 14 – Discos de sustentação.....	41
Figura 15 – Eletrolux LFE11.....	42
Figura 16 – Estator do gerador.....	43
Figura 17 – Rotor do gerador.....	44
Figura 18 – Alicerce de união rotor-estator.....	44
Figura 19 – Turbina <i>Savonius</i> com seu conjunto gerador.....	45
Figura 20 – Módulo de diodo IXYS MDD44-18N1B.....	48
Figura 21 – Circuito de retificação trifásica com filtragem capacitiva.....	50
Figura 22 – Desempenho do circuito de retificação.....	51
Figura 23 – Circuito de proteção contra sobretensão.....	51
Figura 24 – CI LM311.....	52
Figura 25 – CI LM2940.....	53
Figura 26 – Módulo de Proteção e estabilização.....	54
Figura 27 – CI LM2596.....	55
Figura 28 – Controlador de carga XH-M609.....	56
Figura 29 – Bateria chumbo-ácido.....	57
Figura 30 – Arquitetura geral do sistema.....	58
Figura 31 – Anemômetro Digital.....	60
Figura 32 – Ventilador industrial utilizado nos ensaios.....	61
Figura 33 – Curva de potência experimental da turbina <i>Savonius</i> (carga de 1 A).....	63
Figura 34 – Curva de potência experimental da turbina <i>Savonius</i> (carga de 5 A).....	64
Figura 35 – Tensão alternada produzida pelo GIP.....	66
Figura 36 – Ambiente laboratorial utilizado para realizar os testes.....	67
Figura 37 – Teste de Estabilização em 20 VDC.....	68
Figura 38 – Teste de Estabilização em 30 VDC.....	69
Figura 39 – Teste de Estabilização em 40 VDC.....	70

Figura 40 – Desempenho do Conversor CC/CC.....	71
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão gerada pelo motor DON1300WN R/T em diferentes rotações.....	47
Tabela 2 – Lista de materiais utilizados no projeto experimental.....	59
Tabela 3 – Curva de potência experimental da turbina <i>Savonius</i> (carga de 1 A).....	62
Tabela 4 – Curva de potência experimental da turbina <i>Savonius</i> (carga de 5 A).....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DC-DC	Conversor de Tensão Contínua para Tensão Contínua
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
Onshore	Instalação em terra
Offshore	Instalação no mar
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
FNMC	Fundo Nacional sobre Mudança do Clima
CO ₂	Dióxido de carbono
On-grid	Sistema conectado à rede elétrica pública
Off-grid	Sistema independente da rede elétrica
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i> (Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica, EUA)
GIP	Geradores de Ímã Permanente
NdFeB	Neodímio Ferro Boro (tipo de ímã de terras raras utilizado no rotor)
SmCo	Samário Cobalto (ímã de terras raras)
3D	Três Dimensões (Impressão (3D))
XH-M608	Módulo controlador de carga/descarga
2D	Duas Dimensões
GCI	<i>Grid Convergence Index</i> (Índice de Convergência de Malha)
SST	<i>Shear Stress Transport</i> (Modelo de Turbulência)
ANSYS	Software de simulação numérica
PLA	Ácido Polilático

LISTA DE SÍMBOLOS

RPM	Rotações por minuto
C_p	Coefficiente de potência da turbina (adimensional)
λ	Razão de velocidade de ponta (<i>tip speed ratio</i> , adimensional)
ω	Taxa de dissipação específica
E	Tensão instantânea gerada em cada fase [V]
K_e	Constante de força contra-eletromotriz (<i>back-EMF</i>) [V/rpm]
n	Rotação do eixo do gerador [rpm]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Introdução a sistemas eólicos de geração	18
2.1.1 Energia eólica no Brasil	19
2.1.1.1 Geração <i>onshore</i>	20
2.1.1.2 Geração <i>offshore</i>	21
2.2 Aerogeradores e sua classificação por potência instalada	22
2.2.1 Aerogeradores de pequeno porte	23
2.2.2 Aerogeradores de médio porte	24
2.2.3 Aerogeradores de grande porte	24
2.3 Caracterização de sistemas eólicos <i>on-grid</i> e <i>off-grid</i>	24
2.3.1 Sistemas de geração <i>on-grid</i>	25
2.3.2 Sistemas de geração <i>off-grid</i>	25
2.4 Turbinas de eixo horizontal e de eixo vertical	25
2.4.1 Turbinas eólicas de eixo horizontal	26
2.4.2 Turbinas eólicas de eixo vertical	27
2.4.3 Turbinas <i>Savonius</i>	27
2.4.3.1 <i>Savonius</i> convencional	27
2.4.3.2 <i>Savonius</i> helicoidal	28
2.4.4 Turbina <i>Darrieus</i>	29
2.4.5 <i>Darrieus</i> H-rotor	29
2.4.6 Turbinas híbridas <i>Darrieus-Savonius</i>	30
2.5 Geradores de ímã permanente	31
2.5.1 Classificação Estrutural dos Geradores de Ímã Permanente	32
2.5.1.1 Geradores de Fluxo Radial	32
2.5.1.2 Geradores de Fluxo Axial	32
2.5.2 Equivalência Construtiva entre Geradores de Ímã Permanente e Motores <i>BLDC</i> ..	33
2.5.3 Critérios de Seleção e Aplicação	34
2.6 Contextualização do projeto	34

3 METODOLOGIA	35
3.1 Turbina Savonius	36
3.1.1 Geometria e Dimensionamento	36
3.1.2 Desempenho Aerodinâmico	38
3.1.3 Análise do Escoamento e Estrutura da Turbina	39
3.1.4 Fabricação por Impressão 3D	39
3.1.5 Sustentação das Pas	41
3.2 Gerador de ímã permanente	41
3.2.1 Seleção do gerador	41
3.2.2 Estator do gerador	42
3.2.3 Rotor do gerador	43
3.2.4 Alicerce de união rotor-estator	44
3.2.5 Montagem Final do Sistema Eólico	45
3.3 Estudo e preparação do sistema <i>Off-grid</i> de potência do gerador	46
3.3.1 Modelagem Matemática e Caracterização da Tensão Gerada pelo GIP	46
3.3.2 Circuito de retificação e estabilização de tensão	46
3.3.3 Módulos de diodos	47
3.3.4 Cálculo e Seleção de Capacitores para Filtragem de <i>Ripple</i>	48
3.3.5 Desempenho do circuito de retificação	50
3.4 Circuito de proteção contra sobretensão	51
3.4.1 LM311 – Comparador de Tensão	52
3.4.2 LM2940 – Regulador de tensão	52
3.4.3 Prototipagem do Módulo de Proteção e estabilização	53
3.5 Conversor CC/CC	54
3.6 Controlador de carga XH-609	55
3.7 Bateria chumbo-ácido VRLA	56
3.8 Visão Integrada do Sistema Eólico <i>off-grid</i>	57
3.9 Orçamento do projeto	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 Turbina Savonius	60
4.1.1 Resultados Experimentais da Curva de Potência da Turbina <i>Savonius</i> com Carga de 1 A	62
4.1.2 Resultados Experimentais da Curva de Potência da Turbina <i>Savonius</i> com Carga de 5 A	63
4.1.3 Comparação entre os Regimes de Carga de 1 A e 5 A para a Turbina <i>Savonius</i> ...	65

4.1.4	Análise da potência elétrica gerada nos ensaios experimentais	65
4.2	Análise da qualidade de energia do GIP	66
4.3	Desempenho do circuito de retificação e estabilização de tensão	67
4.3.1	Teste de Estabilização em 20 VDC	68
4.3.2	Teste de Estabilização em 30 VDC	69
4.3.3	Teste de Estabilização em 40 VDC	69
4.4	Desempenho do Conversor CC/CC	70
4.5	Resultados do chaveamento da carga pela placa XH-M609 e do carregamento dos elementos acumuladores (baterias)	71
5	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Entre o período de 2010 a 2025, a necessidade de renovação das matrizes energéticas mundiais tem sido amplamente discutida. Para mitigar os impactos ambientais causados pela exploração de fontes não renováveis, como a poluição e o aquecimento global, diversas alternativas de geração de energia renovável vêm sendo propostas. Entre as principais fontes renováveis para produção de energia elétrica, destacam-se a hídrica, eólica, solar e geotérmica, que buscam reduzir os efeitos ambientais negativos associados aos sistemas convencionais de geração (KOTHE, 2016).

A energia eólica, em particular, é uma fonte limpa, renovável e amplamente disponível geograficamente. A geração comercial de eletricidade a partir do vento teve início há pouco mais de três décadas, impulsionada pelo avanço tecnológico oriundo da indústria aeronáutica, que permitiu o desenvolvimento rápido de turbinas eólicas eficientes e confiáveis. A crise do petróleo na década de 1970 fomentou o interesse global, especialmente na Europa e nos Estados Unidos, por fontes alternativas que diminuíssem a dependência dos combustíveis fósseis. Desde então, a indústria eólica tem apresentado crescimento anual superior a 30%, movimentando bilhões de dólares e consolidando-se como uma opção competitiva e sustentável frente a outras fontes de energia (KOTHE, 2016).

Os aerogeradores podem ser classificados conforme a posição do eixo do rotor, sendo de eixo vertical ou horizontal, e pela potência gerada, que varia desde microgeradores até unidades de grande porte. Para aplicações urbanas e residenciais, os aerogeradores de pequeno porte são os mais indicados, pois ocupam menor espaço e possibilitam geração descentralizada, reduzindo perdas associadas à transmissão de energia em longas distâncias (JUNIOR, 2015).

Os rotores de eixo horizontal são os mais utilizados devido à sua maior eficiência energética, pois utilizam predominantemente forças de sustentação para converter a energia eólica em energia mecânica, necessitando de sistemas de orientação para manter o rotor perpendicular ao vento. Já as turbinas de eixo vertical apresentam a vantagem de não necessitarem de sistemas de orientação, podendo captar energia eólica independentemente da direção do vento, utilizando forças de sustentação e arrasto (JUNIOR, 2015).

Os sistemas eólicos podem ser utilizados em três modalidades principais: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede elétrica. Os sistemas isolados, geralmente de pequeno porte, costumam utilizar armazenamento de energia por meio de baterias dos mais variados modelos. Em alguns casos, como na irrigação, o armazenamento pode não ser necessário, pois a energia gerada é consumida diretamente. Além disso, sistemas eólicos

com velocidade variável, que empregam algoritmos para rastreamento do ponto de máxima potência, apresentam maior eficiência energética em comparação aos sistemas de velocidade fixa (SOUZA, 2018).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um gerador eólico de pequeno porte, utilizando uma turbina *Savonius* helicoidal, acoplada a um gerador de ímãs permanentes. O sistema será projetado para operação *off-grid*, com a finalidade de fornecer energia elétrica em locais isolados, onde a conexão à rede convencional é técnica ou economicamente inviável. Para garantir a estabilidade da tensão gerada e a eficiência no carregamento das baterias, será implementado um circuito de retificação trifásica seguido de um sistema de filtragem com capacitores, além do uso de um módulo regulador *DC-DC* para controle do processo de carga. Espera-se, com este projeto, contribuir para a disseminação de soluções sustentáveis e acessíveis de geração de energia renovável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar e desenvolver um sistema de geração eólica de pequeno porte e armazenamento de energia *off-grid*.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar um sistema de geração eólica.
- Propor um projeto de geração *off-grid* de pequeno porte.
- Simular, em ambiente computacional, o sistema desenvolvido.
- Interligar o gerador de energia ao sistema de carregamento de baterias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos, tecnologias e aplicações relacionadas ao desenvolvimento de geradores eólicos de pequeno porte, com foco nas turbinas *Savonius* helicoidais e em geradores de ímãs permanentes para sistemas *off-grid*.

O foco da revisão está nos estudos que tratam da energia eólica, dos diferentes tipos de turbinas (com destaque para as turbinas *Savonius*) e da utilização de máquinas de ímã permanente na utilização como geradores de energia.

A revisão está organizada por temas, começando com um panorama geral da energia eólica, seguido pela classificação e características dos geradores, apresentação dos tipos de turbinas eólicas e, por fim, a análise de tipos de máquinas de ímãs permanentes aplicados à geração eólica. Assim, o objetivo é oferecer uma base sólida para o desenvolvimento do projeto, destacando os avanços tecnológicos, os desafios e as oportunidades na área de geração eólica de pequeno porte.

2.1 Introdução a sistemas eólicos de geração

A energia eólica tem se consolidado como uma das principais fontes renováveis para geração de eletricidade no mundo, sendo fundamental para a transição energética global rumo a matrizes mais sustentáveis e com menor impacto ambiental. Segundo o *Global Wind Energy Council (GWEC)*, a capacidade total instalada mundial de energia eólica atingiu cerca de 1.174 GW em 2024, com um crescimento recorde de 121 GW de nova capacidade adicionada apenas neste ano. Esse avanço reflete tanto os investimentos em parques *onshore* quanto *offshore*, além de políticas públicas voltadas à descarbonização e à segurança energética.

Apesar do crescimento expressivo, o relatório do *GWEC* destaca que a maior parte das novas instalações se concentrou em mercados maduros, como China, Estados Unidos, Alemanha, Índia e Brasil, que agora compõem o *Top 5* mundial em capacidade instalada (*Global Wind Energy Council (GWEC), 2025*). O setor também enfrenta desafios relacionados à estabilidade regulatória, à necessidade de expansão das redes de transmissão e à criação de mecanismos de leilão mais eficientes.

2.1.1 Energia eólica no Brasil

No Brasil, a energia eólica apresentou forte expansão entre os anos de 2005 a 2025, consolidando-se como a segunda maior fonte renovável da matriz elétrica nacional. Em 2024, o país alcançou a 5ª posição no *ranking* mundial de capacidade instalada, com aproximadamente 34 GW em operação, ultrapassando Espanha e Reino Unido (Global Wind Energy Council (GWEC), 2025). O crescimento foi impulsionado principalmente pela região Nordeste, que concentra cerca de 80% dos parques eólicos nacionais devido à qualidade e constância dos ventos.

Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2024), o Brasil adicionou cerca de 4,3 GW de nova capacidade eólica em 2024, contribuindo para um total de 11 GW de novas usinas renováveis no país, sendo mais de 91% provenientes de fontes solar e eólica. Esse crescimento reflete não apenas o potencial do recurso eólico brasileiro, mas também o avanço tecnológico, a redução de custos e a crescente demanda por energia limpa.

A Figura 1 ilustra a evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil desde 2005, evidenciando a aceleração do crescimento a partir de 2015, com crescimento superior a 20% ao ano.

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2024)

Além disso, a energia eólica representou cerca de 16% da matriz elétrica brasileira em 2024, consolidando-se como a 3ª maior fonte renovável nacional (Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), 2024).

O potencial eólico brasileiro é vasto, especialmente na região Nordeste, que concentra a maior parte da capacidade instalada. O país possui ainda um potencial técnico estimado em cerca de 1.200 GW para energia eólica *offshore*, conforme o novo marco regulatório aprovado em 2025, que regulamenta a exploração de áreas marítimas para geração eólica (G1 - Senai RN, 2024).

Entretanto, o setor enfrenta desafios, como a necessidade de equilibrar a oferta intermitente das fontes renováveis com a demanda do sistema elétrico, o que tem levado a cortes temporários na geração e ao maior uso de térmicas para garantir estabilidade. Além disso, a desaceleração das instalações em 2024, com 3,3 GW adicionados, representa uma redução de 31,25% em relação a 2023, reflexo da crise de demanda e de questões regulatórias (CNN Brasil,).

Apesar disso, o avanço de políticas públicas, como o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) e o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC), tem facilitado o financiamento e a expansão do setor, tornando a energia eólica uma peça estratégica para a diversificação da matriz energética, a segurança do sistema e a redução das emissões de gases de efeito estufa (FGV Energia, 2025).

A energia eólica, fonte renovável e limpa, pode ser dividida em duas categorias principais conforme o local de instalação: *onshore* (em terra) e *offshore* (no mar). Cada modalidade apresenta características, vantagens e desafios específicos que impactam sua viabilidade técnica, econômica e ambiental.

2.1.1.1 Geração *onshore*

A energia eólica *onshore* é gerada por turbinas instaladas em terra, em locais onde há ventos adequados para a geração de eletricidade. As turbinas, sustentadas por fundações de concreto armado, convertem a energia cinética do vento em energia mecânica rotativa, que é transformada em energia elétrica por meio de geradores (CNN Brasil,). A capacidade máxima das turbinas *onshore* geralmente alcança cerca de 5,6 MW, sendo instaladas em parques eólicos compostos por múltiplos aerogeradores, transformadores e subestações que elevam a tensão para transmissão (Iberdrola,).

Entre as vantagens da energia *onshore* destacam-se os custos mais baixos de instalação e manutenção, devido à facilidade de acesso e à infraestrutura terrestre, além da possibilidade de coexistência com atividades agrícolas e pecuárias, o que permite o uso múltiplo do solo (Iberdrola,). Por outro lado, a energia *onshore* enfrenta limitações quanto à disponibilidade

de áreas adequadas, especialmente próximas a centros urbanos, e maior variabilidade e menor constância dos ventos, o que pode afetar a estabilidade da geração (Deltha Wind, 2024).

2.1.1.2 Geração *offshore*

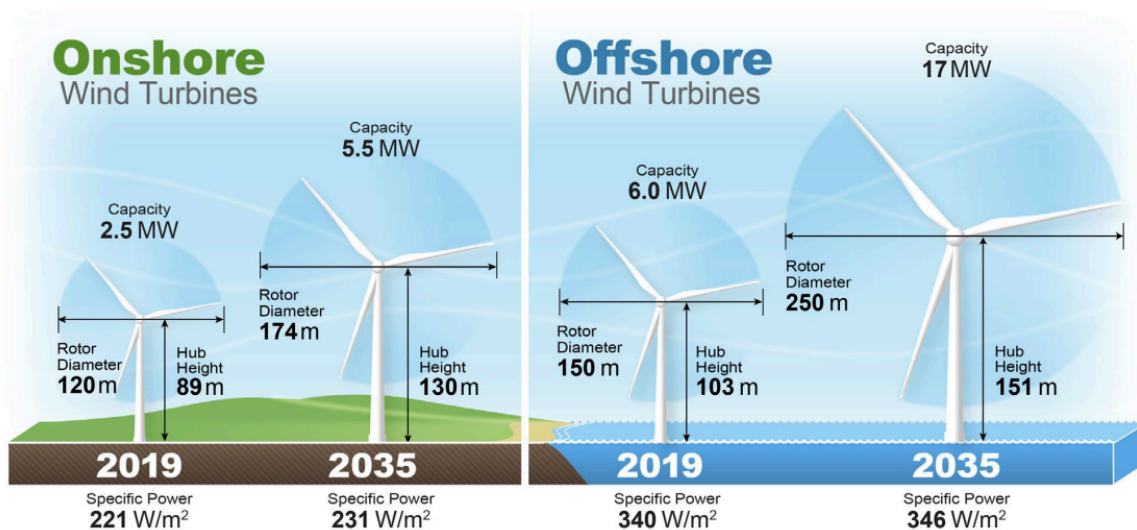
A energia eólica *offshore* é produzida por turbinas instaladas no mar, em águas rasas próximas à costa ou em alto-mar, onde os ventos são mais fortes e constantes. Essa maior intensidade e regularidade dos ventos marítimos permite uma capacidade de geração significativamente superior à *onshore*. Além disso, a ausência de obstáculos naturais, como edificações e relevo, favorece a operação contínua das turbinas, elevando a eficiência do sistema e reduzindo o custo por megawatt gerado (Modal Connection, 2025).

As turbinas *offshore* são geralmente maiores, com potências unitárias superiores a 10 MW, chegando a até 15 MW em alguns projetos, enquanto as *onshore* se consolidam em torno de 5 MW devido a limitações logísticas (Iberdrola,). Outro benefício importante da energia *offshore* é o menor impacto visual e sonoro para as populações terrestres, pois as instalações ficam distantes da costa (Deltha Wind, 2024).

Porém, a energia *offshore* apresenta custos iniciais elevados, tanto para construção quanto para manutenção, devido à complexidade logística e às condições adversas do ambiente marinho. A manutenção exige embarcações especializadas e condições meteorológicas favoráveis, aumentando os desafios operacionais (Deltha Wind, 2024). Além disso, a instalação e operação dos parques *offshore* demandam rigorosos estudos ambientais para minimizar impactos sobre a fauna marinha, rotas de migração e atividades pesqueiras, bem como o cumprimento de exigências legais, como a Declaração de Impacto Ambiental (Iberdrola,).

Ambas as modalidades são essenciais para a expansão da matriz energética renovável, e a escolha entre elas depende de fatores como localização geográfica, custo, impacto ambiental e políticas públicas. À medida que a tecnologia avança e os custos de *offshore* diminuem, espera-se que essa modalidade cresça significativamente, complementando a energia *onshore* e contribuindo para a descarbonização global (Deltha Wind, 2024). A Figura 2 indica as diferenças entre os métodos de instalação *onshore* e *offshore*.

Figura 2 – Diferenças físicas entre geradores *onshore* e *offshore*



Fonte: *Wiser e outros (2021)*

2.2 Aerogeradores e sua classificação por potência instalada

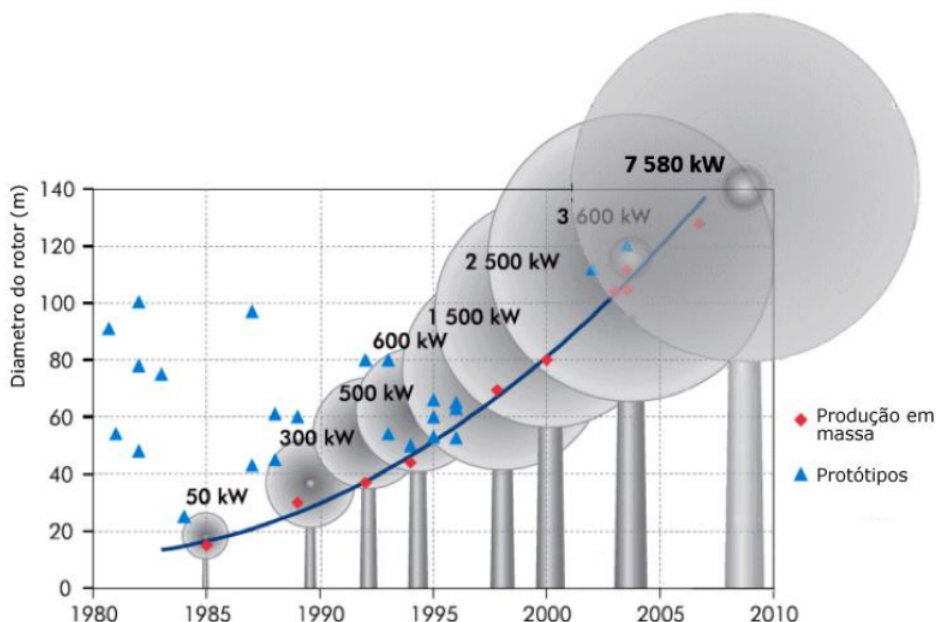
No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) exerce papel fundamental na regulação do setor elétrico, estabelecendo normas e procedimentos que orientam a implantação, operação e expansão das centrais geradoras eólicas. Destaca-se a Resolução Normativa nº 1.071, de 29 de agosto de 2023, a qual define os requisitos para a obtenção de outorga de autorização e para a alteração da capacidade instalada de centrais geradoras eólicas, além de tratar da associação entre centrais e da comunicação de implantação de centrais de capacidade reduzida (RESOLUÇÃO. . . , 2023). Essa norma estabelece critérios técnicos e documentais para a autorização, incluindo a análise do potencial eólico por meio de medições realizadas em torres instaladas no local do empreendimento, bem como a avaliação de interferências aerodinâmicas entre parques, garantindo a coordenação e a segurança do sistema elétrico nacional.

Adicionalmente, a Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, aprimora as regras para conexão e faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída, modalidades que abrangem geradores de pequeno e médio porte, facilitando sua integração aos sistemas de distribuição (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2023). Essas regulamentações são complementadas por outras deliberações e consultas públicas que visam à modernização do setor, à sustentabilidade econômico-financeira das distribuidoras e à adaptação às novas tecnologias, como sistemas de armazenamento e geração *offshore*.

A seleção do tipo e da configuração do gerador deve considerar a demanda energética específica, as condições locais de vento e a possibilidade de conexão à rede elétrica, o que torna

imprescindível o conhecimento das características técnicas e das regulamentações aplicáveis a esses sistemas. A figura 3 caracteriza a evolução do tamanho da turbina eólica em função de sua potência.

Figura 3 – Evolução dos aerogeradores em função de sua potência.



Fonte: Windbox (2020)

Outro fator que impacta a operação em baixas velocidades é a necessidade de sistemas de orientação para alinhar as pás com a direção do vento, o que aumenta a complexidade mecânica e os custos de manutenção (Automaxx Windmill, 2024). Em ambientes com ventos muito variáveis, essa orientação pode não ser suficientemente rápida ou precisa, reduzindo ainda mais a eficiência.

Portanto, embora as turbinas de eixo horizontal sejam predominantes e altamente eficientes em locais com ventos constantes e moderados a fortes, sua utilidade em ventos baixos é limitada devido à necessidade de velocidade mínima para partida, à queda acentuada da potência gerada em baixas velocidades e à complexidade dos sistemas de orientação.

2.2.1 Aerogeradores de pequeno porte

Geradores eólicos de pequeno porte geralmente possuem potência instalada inferior a 100 kW e são utilizados principalmente em sistemas isolados, residenciais ou rurais. Embora representem uma fração menor da capacidade total instalada, esses geradores são importantes para a geração distribuída e para comunidades remotas, promovendo a descentralização da

produção de energia (RESOLUÇÃO. . . , 2023).

2.2.2 Aerogeradores de médio porte

Os geradores de médio porte, com potência entre 100 kW e 1 MW, atendem a pequenas centrais geradoras e sistemas híbridos, capazes de suprir demandas de comunidades maiores ou pequenas indústrias. Essa categoria tem papel relevante na diversificação da matriz energética local e na integração com sistemas de distribuição (RESOLUÇÃO. . . , 2023).

2.2.3 Aerogeradores de grande porte

Os geradores de grande porte, com potência superior a 1 MW, são predominantes nos grandes parques eólicos comerciais que compõem a maior parte da capacidade instalada no país. No Brasil, parques eólicos como Lagoa dos Ventos (716,5 MW), Campo Largo (687,9 MW) e Chuí (582,8 MW) exemplificam essa categoria, concentrando grande parte da geração eólica nacional, especialmente na região Nordeste (Eixos, 2024). Esses aerogeradores de alta capacidade beneficiam-se de avanços tecnológicos e economias de escala, sendo essenciais para o atendimento da demanda energética em larga escala.

2.3 Caracterização de sistemas eólicos *on-grid* e *off-grid*

Com o avanço das tecnologias de geração distribuída e o crescente interesse por fontes renováveis, especialmente a energia solar e eólica, a escolha do tipo de sistema de geração torna-se um aspecto crucial para a viabilidade técnica e econômica dos projetos. Nesse contexto, os sistemas de geração podem ser classificados em duas categorias principais: os sistemas conectados à rede elétrica pública, conhecidos como *on-grid*, e os sistemas independentes da rede, denominados *off-grid*.

Cada uma dessas configurações apresenta características específicas quanto à forma de utilização, armazenamento e gestão da energia gerada, influenciando diretamente o custo, a autonomia e a aplicabilidade dos sistemas. A compreensão das diferenças entre os sistemas *on-grid* e *off-grid* é fundamental para orientar a escolha adequada conforme as condições locais, necessidades energéticas e disponibilidade de infraestrutura, especialmente em países com grande extensão territorial e diversidade regional, como o Brasil.

2.3.1 Sistemas de geração *on-grid*

Estes sistemas encontram-se interligados à rede elétrica pública, permitindo que a energia gerada seja consumida localmente, enquanto eventuais excedentes são injetados na rede, gerando créditos que podem ser utilizados para compensar o consumo em períodos de baixa geração. A ausência da necessidade de armazenamento em baterias caracteriza-se como uma vantagem, uma vez que a rede elétrica funciona como um armazenamento virtual (SUNERGIA, 2024).

As principais vantagens incluem menor custo inicial, possibilidade de compensação na fatura de energia e manutenção simplificada. Esses sistemas são indicados para áreas urbanas e rurais com acesso à rede elétrica, bem como para pequenas e médias instalações.

2.3.2 Sistemas de geração *off-grid*

Operam de forma independente da rede elétrica pública, exigindo o armazenamento da energia gerada em baterias para garantir o fornecimento contínuo, especialmente em períodos sem vento ou durante a noite. São recomendados para locais remotos ou sem acesso à rede elétrica (SUNERGIA, 2024).

Apresentam como vantagens a autonomia total e a possibilidade de implantação em regiões isoladas; entretanto, possuem custo inicial mais elevado devido à necessidade de sistemas de armazenamento e requerem gerenciamento eficiente da energia. São aplicados em comunidades rurais isoladas, propriedades afastadas e sistemas híbridos.

2.4 Turbinas de eixo horizontal e de eixo vertical

As turbinas eólicas são dispositivos que convertem a energia cinética do vento em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Elas podem ser classificadas segundo o eixo de rotação em turbinas de eixo horizontal (TEEH) e turbinas de eixo vertical (TEEV), cada uma com características específicas que as tornam adequadas para diferentes aplicações e condições de vento (LAFAY; VARGAS; VARGAS, 2008).

Este capítulo apresenta um panorama detalhado sobre os principais tipos de turbinas de eixo horizontal e turbinas de eixo vertical, com ênfase nas turbinas *Savonius* (convencional e helicoidal), *Darrieus*, *H-Rotor* e modelos híbridos, incluindo aspectos históricos, técnicos e de desempenho.

2.4.1 Turbinas eólicas de eixo horizontal

As turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) são as mais utilizadas para geração de energia elétrica em larga escala. Nelas, o eixo de rotação é paralelo ao solo, e as pás giram em torno de um cubo central, captando a energia do vento com alta eficiência. Segundo Automaxx Windmill (2024), as turbinas de eixo horizontal apresentam maior eficiência aerodinâmica devido ao uso predominante das forças de sustentação, que são mais eficazes que as forças de arrasto para a conversão de energia.

Essas turbinas geralmente são instaladas em torres elevadas para aproveitar ventos mais fortes e constantes, o que aumenta significativamente a produção energética (Automaxx Windmill, 2024). No entanto, apresentam uma limitação importante: a necessidade de uma velocidade mínima do vento para iniciar a rotação, chamada de velocidade de partida ou *cut-in speed*. Essa velocidade normalmente varia entre 3 e 4 m/s, abaixo da qual o torque gerado pelas pás é insuficiente para vencer as forças resistivas do sistema, como atrito e inércia (Automaxx Windmill, 2024). A figura 4 representa o exemplo de aerogerador de eixo horizontal.

Figura 4 – Aerogerador de eixo horizontal



Fonte: Energes (2020)

Outro fator que impacta a operação em baixas velocidades é a necessidade de sistemas de orientação para alinhar as pás com a direção do vento, o que aumenta a complexidade mecânica e os custos de manutenção (Automaxx Windmill, 2024). Em ambientes com ventos muito variáveis, essa orientação pode não ser suficientemente rápida ou precisa, reduzindo ainda mais a eficiência.

Portanto, embora as turbinas de eixo horizontal sejam predominantes e altamente eficientes em locais com ventos constantes e moderados a fortes, sua utilidade em ventos

baixos é limitada devido à necessidade de velocidade mínima para partida, à queda acentuada da potência gerada em baixas velocidades e à complexidade dos sistemas de orientação.

2.4.2 Turbinas eólicas de eixo vertical

As turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) destacam-se por sua capacidade de captar ventos de diferentes direções e por apresentarem características construtivas que facilitam sua instalação em espaços reduzidos. Como destaca Schmit (2015), uma das principais vantagens das turbinas eólicas de eixo vertical é a capacidade de captar vento de qualquer direção, além de apresentarem uma estrutura relativamente simples e robusta. Entre os diversos modelos de TEEV, as turbinas *Savonius* e *Darrieus* são as mais estudadas e aplicadas, cada uma com princípios de funcionamento e vantagens específicas. Este capítulo apresenta uma análise detalhada desses modelos, incluindo suas variantes, como a *Savonius* helicoidal, o rotor *Darrieus* tipo H e modelos híbridos, destacando aspectos técnicos, vantagens, limitações e aplicações típicas, com o objetivo de fundamentar o desenvolvimento e a otimização de sistemas eólicos de pequeno porte.

2.4.3 Turbinas *Savonius*

Segundo Oliveira (2014), a turbina *Savonius* foi desenvolvida e patenteada em 1929 pelo engenheiro finlandês *Sigurd Johannes Savonius*, em um contexto de busca por soluções simples e eficientes para geração de energia durante a crise econômica da década de 1920. Seu design básico consiste em duas ou três pás semicirculares fixadas em um eixo vertical, formando um rotor em “S” no corte transversal.

Com o avanço dos estudos, foi criada a variante helicoidal, na qual as pás semicirculares são torcidas ao longo da altura do rotor, formando uma hélice com torção entre 90° e 180°. Essa modificação visa reduzir vibrações e ruídos, além de proporcionar uma rotação mais suave e contínua (DAMAK; DRISS; ABID, 2013).

2.4.3.1 *Savonius* convencional

Opera pelo princípio do arrasto, com diferença de força entre a pá côncava e a convexa gerando torque (OLIVEIRA, 2014). Apresenta alto torque de partida em baixas velocidades (a partir de 2 m/s), baixa velocidade angular e capacidade de aceitar ventos de qualquer direção.

Contudo, possui eficiência limitada, com coeficiente de potência entre 10% e 15% (DAMAK; DRISS; ABID, 2013).

2.4.3.2 *Savonius* helicoidal

As pás helicoidais proporcionam torque mais uniforme, redução de vibrações e ruídos, e maior eficiência aerodinâmica (coeficiente de potência em torno de 17,5%) (DAMAK; DRISS; ABID, 2013). Estudos numéricos indicam estabilidade operacional superior e melhor aproveitamento do vento em baixas velocidades (KOTHE, 2016).

A Figura 5 apresenta um conjunto de aerogeradores verticais do tipo *Savonius* helicoidal instalados em estrutura elevada próxima à orla marítima. Observam-se múltiplos rotores com pás torcidas, característicos do modelo *Windside*, cuja geometria helicoidal promove rotação suave, baixa emissão de ruído e desempenho estável mesmo em condições de ventos turbulentos. Este tipo de arranjo é comumente utilizado para aplicações industriais, náuticas e experimentais, destacando-se pela robustez e confiabilidade operacional em ambientes agressivos (*Windside*, 2025).

Figura 5 – Exemplo de aerogerador do tipo *Savonius* helicoidal



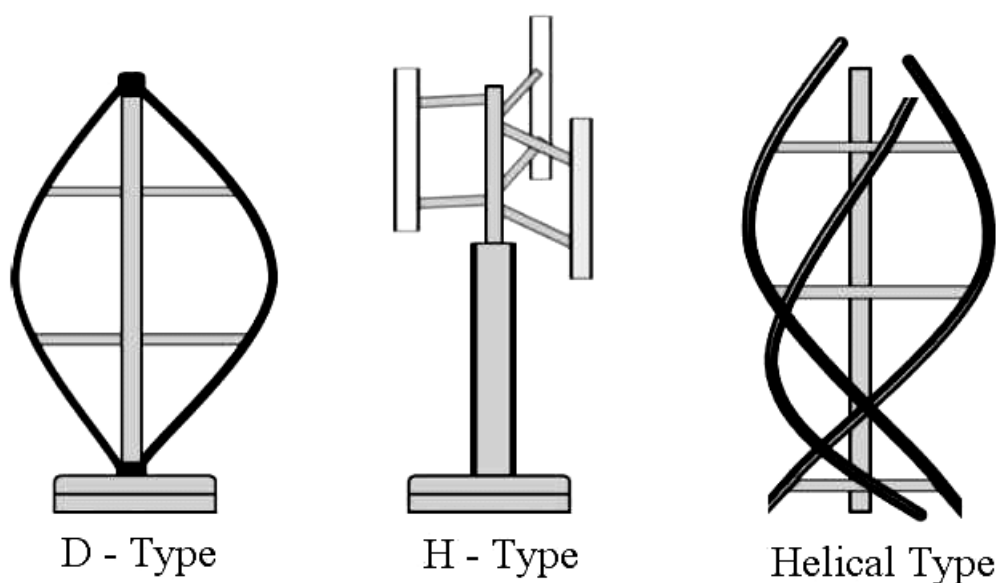
Fonte: Adaptado de *Windside* (2025)

2.4.4 Turbina *Darrieus*

Segundo Schmit (2015), a turbina *Darrieus*, inventada pelo engenheiro francês *Georges Darrieus* em 1931, é um modelo clássico de turbina eólica de eixo vertical. Seu funcionamento baseia-se no princípio da sustentação aerodinâmica, em que “as pás, geralmente de perfil *NACA*, ao girarem, geram uma diferença de pressão responsável pelo torque de rotação”. Uma das principais vantagens desse tipo de turbina é a capacidade de captar vento de qualquer direção, além de apresentar uma estrutura relativamente simples e robusta (SCHMIT, 2015).

Entretanto, a turbina *Darrieus* possui uma limitação notável: a dificuldade de partida em baixas velocidades de vento, pois “essas máquinas apresentam deficiências de arranque, sendo frequentemente necessário o uso de motores auxiliares para iniciar a rotação” (FILHO et al., 2019). Apesar dessa limitação, o modelo *Darrieus* influenciou o desenvolvimento de outros tipos de turbinas eólicas e permanece relevante em pesquisas voltadas à geração de energia limpa e à inovação tecnológica. A Figura 6 ilustra o modelo de aerogerador *Darrieus* e suas variantes.

Figura 6 – Exemplo de aerogerador do tipo *Darrieus* e suas variantes



Fonte: Schmit (2015)

2.4.5 *Darrieus* H-rotor

O rotor *Darrieus* tipo H é uma variante da turbina eólica de eixo vertical que se destaca pela simplicidade construtiva, apresentando pás retas e paralelas ao eixo de rotação, formando um formato em “H”. Segundo Souza (2020), o rotor H facilita a fabricação e manutenção, sendo

uma alternativa viável para pequenas centrais eólicas em ambientes urbanos e rurais.

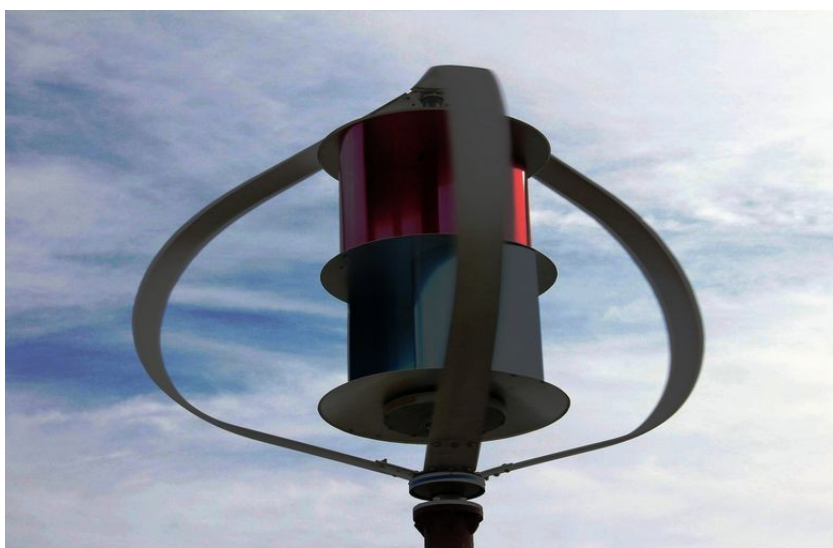
Este tipo de rotor opera principalmente por forças de sustentação aerodinâmica, gerando torque durante a rotação das pás. Conforme estudo de Filho et al. (2019), a geometria do rotor H permite uma análise mais simples do comportamento aerodinâmico, mas apresenta desafios no arranque devido ao baixo torque inicial em ventos fracos.

2.4.6 Turbinas híbridas *Darrieus-Savonius*

A turbina híbrida *Darrieus-Savonius* combina as vantagens das turbinas eólicas de eixo vertical *Darrieus* e *Savonius* para melhorar o desempenho em diferentes condições de vento. Enquanto o rotor *Savonius* proporciona alto torque de partida em ventos fracos, facilitando o arranque da turbina, o rotor *Darrieus* oferece maior eficiência aerodinâmica em velocidades médias e altas. Essa combinação resulta em uma turbina capaz de iniciar a rotação facilmente e operar com eficiência em uma faixa mais ampla de velocidades do vento (HOGUANE, 2018).

Segundo estudos realizados por Hogueane (2018), o ângulo das pás é um fator importante para equilibrar torque de partida, potência e eficiência, com valores ideais geralmente entre 63° e 72° . Essa configuração híbrida representa uma solução promissora para superar as limitações individuais dos rotores *Darrieus* e *Savonius*, combinando seus modelos para uma geração eólica mais eficiente e confiável. A Figura 7 demonstra um exemplo de turbina híbrida *Darrieus-Savonius* que é comercializável.

Figura 7 – Exemplo de aerogerador do tipo híbrido *Darrieus-Savonius*



Fonte: Oy Windside Production Ltd (2025)

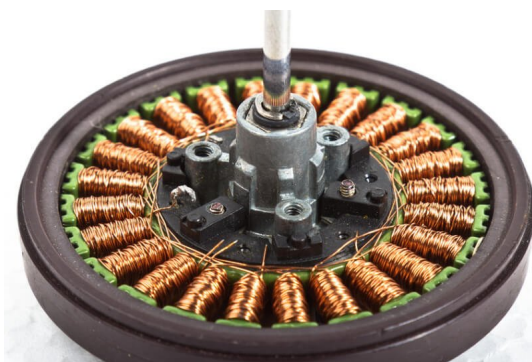
2.5 Geradores de ímã permanente

Os geradores de ímã permanente (GIP) representam uma das mais relevantes inovações no campo da eletromecânica para micro e minigeração de energia elétrica. O princípio desses dispositivos baseia-se na indução eletromagnética, descoberta por *Michael Faraday* em 1831, quando se verificou experimentalmente que o movimento relativo entre enrolamentos condutores e um campo magnético variável gera uma força eletromotriz nos terminais das bobinas. Inicialmente, os geradores utilizavam campos formados por eletroímãs com alimentação externa, mas avanços na tecnologia de materiais magnéticos permitiram o uso de ímãs permanentes artificiais em substituição à excitação elétrica, simplificando o sistema e reduzindo perdas (ALVES; MOTTA; ZANCANELLA, 2020).

Os GIP passaram a ser cada vez mais empregados em sistemas de geração distribuída e renovável graças a características como alta eficiência, baixo custo de manutenção e ausência de necessidade de fonte externa para excitação do campo magnético. O rotor, contendo os ímãs permanentes, gira em relação ao estator, induzindo correntes nas bobinas devido à variação do fluxo magnético – fenômeno explicado quantitativamente pela Lei de *Faraday - Lenz*. Além disso, a adoção de ímãs de terras raras e topologias otimizadas de fluxo permitiu criar máquinas mais compactas, robustas e adaptadas tanto à geração eólica quanto a sistemas embarcados ou portáteis (ALVES; MOTTA; ZANCANELLA, 2020)

Desta forma, os geradores síncronos de ímã permanente adquiriram papel de destaque em turbinas de eixo horizontal e vertical para aplicações de pequeno a médio porte. De acordo com Interaminense (2025), a utilização dessas máquinas favorece conversão eficiente mesmo em baixas rotações, sendo cruciais para o aproveitamento do potencial dos ventos em sistemas urbanos e rurais, além de reduzirem significativamente os custos de operação ao longo do ciclo de vida do projeto.

Figura 8 – Exemplo de gerador de ímã permanente.



Fonte: Industria On (2025)

2.5.1 Classificação Estrutural dos Geradores de Ímã Permanente

Os geradores de ímã permanente (GIP) são máquinas síncronas largamente empregadas em sistemas de geração distribuída renovável, especialmente eólica, em virtude da sua eficiência, robustez e operação sem alimentação elétrica para excitação do campo. A arquitetura dessas máquinas pode ser caracterizada tanto pelo tipo de fluxo magnético predominante — radial ou axial — quanto pela configuração mecânica do rotor: *inrunner* ou *outrunner*. Essas distinções exercem influência direta sobre parâmetros de desempenho, facilitam a integração com turbinas e condicionam as técnicas construtivas (GOLTZ, 2021).

2.5.1.1 Geradores de Fluxo Radial

Nos geradores de fluxo radial, o campo magnético gerado pelos ímãs percorre transversalmente do centro do rotor para o estator, em sentido perpendicular ao eixo de rotação. A configuração *inrunner* radial posiciona os ímãs no rotor central, que gira internamente ao estator circundante, favorecendo geometria de menor diâmetro, maior comprimento axial e alta rotação. Essa solução é específica para aplicações em que se demanda elevada velocidade e densidade de potência volumétrica, como motores industriais compactos e pequenas turbinas horizontais (GOLTZ, 2021).

Na configuração *outrunner* radial, os ímãs são montados no rotor externo que gira ao redor do estator fixo. O aumento do diâmetro proporciona maior "braço magnético", originando elevado torque em baixas rotações. Por conta disso, essa arquitetura é predominante em microgeradores para turbinas de eixo vertical e sistemas de partida direta, além de colaborar para eficiência térmica e simplicidade mecânica de acoplamento (GOLTZ, 2021).

2.5.1.2 Geradores de Fluxo Axial

Os Geradores de fluxo axial se diferenciam pela orientação do campo magnético, que percorre paralelamente ao eixo da máquina, geralmente entre discos planos de rotor e estator. A arquitetura *inrunner* axial apresenta o rotor disco girando internamente a um anel estator, formada para projetos que exigem redução máxima das dimensões radiais e alta velocidade, embora seja menos expandida comercialmente (LINARD, 2014).

Já a configuração *outrunner* axial mais comum, dispõe discos de rotor com ímãs permanentes girando externamente a um ou mais discos estatores. Essa topologia propicia torque

elevado a baixas rotações, facilita dissipação térmica e permite sobreposição modular para obtenção de maiores potências, perfazendo configurações como a Arranjo *Halbach*, com redução de perdas por correntes parasitas e harmônicos de tensão (LINARD, 2014).

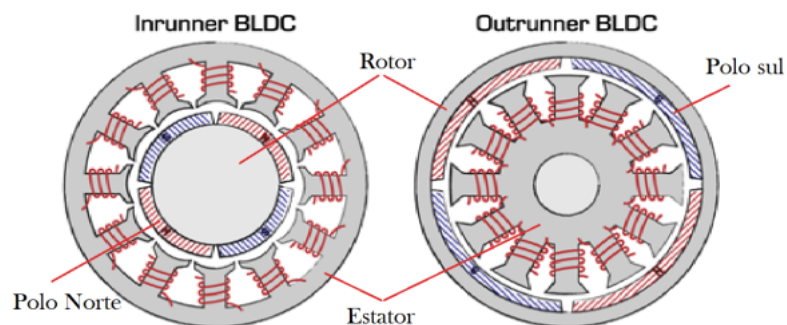
2.5.2 Equivalência Construtiva entre Geradores de Ímã Permanente e Motores *BLDC*

Do ponto de vista construtivo, os geradores de ímã permanente (GIP) apresentam a mesma topologia física e eletromagnética dos motores *brushless* de corrente contínua (*BLDC*). Ambos possuem um estator composto por enrolamentos trifásicos distribuídos e um rotor equipado com ímãs permanentes, podendo adotar configurações do tipo *inrunner* (rotor interno) ou *outrunner* (rotor externo).

A diferença fundamental reside no modo de operação: enquanto o *BLDC* é normalmente utilizado como motor, quando seu eixo é acionado por força mecânica externa, sua estrutura permite o funcionamento eficiente como gerador, convertendo energia mecânica em energia elétrica. Essa reversibilidade é atribuída à simetria da máquina síncrona de ímã permanente, cuja excitação magnética fixa elimina a necessidade de sistemas adicionais de campo.

Na prática, tanto os *BLDC* quanto os GIP compartilham características construtivas essenciais como elevado fator de potência, alto rendimento e resposta dinâmica superior em relação a máquinas de excitação por bobina, o que os torna amplamente empregados em sistemas de microgeração, acionamentos industriais e aplicações automotivas (BRUNELLI, 2024).

Figura 9 – Tipos de motores *BLDC inrunner* e *outrunner*



Fonte: Brunelli (2024)

2.5.3 Critérios de Seleção e Aplicação

A escolha entre gerador axial ou radial, *inrunner* ou *outrunner*, deve ser baseada em análises de torque de partida, velocidade característica da fonte mecânica, limitações volumétricas de instalação, dissipação térmica e custo de fabricação. Em sistemas de microgeração eólica, as variantes *outrunner* radial e *outrunner* axial têm se destacado por sua versatilidade e adaptação direta a turbinas lentas, enquanto as versões *inrunner* preservam vantagens em aplicações de alta rotação ou forte restrição dimensional (LINARD, 2014).

2.6 Contextualização do projeto

O projeto apresentado enquadra-se na categoria de geradores eólicos de pequeno porte, caracterizados como microgeração distribuída, conforme a Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023, que estabelece o limite de potência instalada de até 75 kW para sistemas conectados em baixa tensão. Os GIP, quando empregados nessas aplicações, destacam-se pela robustez, alta eficiência, simplicidade construtiva e ausência de necessidade de excitação externa, atributos essenciais para viabilização técnica e confiabilidade operacional em sistemas autônomos e de geração renovável (LINARD, 2014; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2023).

A alternativa de configuração *off-grid* prevalece quando o atendimento visa áreas remotas, afastadas da rede pública, sendo imprescindível o uso de baterias para o armazenamento e disponibilização contínua da energia gerada. Neste cenário, os geradores síncronos de ímã permanente se sobressaem devido ao alto rendimento sobre ampla faixa de carga, partida facilitada e reduzido custo de manutenção, pontos cruciais para sistemas isolados (LINARD, 2014).

A legislação nacional, através da Resolução ANEEL nº 1.071/2023, dispensa a obrigatoriedade de obtenção de outorga para sistemas renováveis com potência instalada inferior a 5 MW, simplificando o processo de legalização, estimulando a ampliação da geração distribuída e incentivando a adoção de fontes energéticas limpas e descentralizadas em todo o território nacional (RESOLUÇÃO... , 2023).

Dessa maneira, o desenvolvimento e a implantação de sistemas com geradores de ímã permanente atendem plenamente aos requisitos regulatórios, ambientais e técnicos do setor energético nacional, promovendo autonomia, sustentabilidade e acessibilidade para a geração de energia em pequenos consumidores e regiões isoladas (LINARD, 2014; GOLTZ, 2021; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2023).

3 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é descrever os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do gerador eólico de pequeno porte para uso *off-grid*. Inicialmente, são apresentadas as etapas gerais do estudo relacionadas à metodologia, seguidas pela descrição detalhada do projeto da turbina *Savonius* helicoidal, do gerador selecionado e dos sistemas eletrônicos de retificação, estabilização da tensão e carregamento da bateria.

Para atingir esses objetivos, o desenvolvimento foi dividido nas seguintes etapas principais:

- Pesquisa bibliográfica sobre turbinas *Savonius* helicoidais, geradores de ímã permanente e sistemas de eletrônica de potência aplicados à geração eólica.
- Estudo e modelagem do rotor helicoidal com ampliação dimensional, baseado nos estudos de Oliveira (2014), por um fator de escala 3 para otimização.
- Projeto e fabricação do protótipo da turbina por meio de impressão *3D*.
- Análise e estudo de viabilidade do gerador de ímã permanente aplicado ao projeto.
- Desenvolvimento do circuito retificador trifásico para conversão da corrente alternada em contínua.
- Elaboração do circuito de capacitores para estabilização da tensão de saída produzida pelo gerador, para posterior integração com o módulo de controle e carregamento de bateria.
- Desenvolvimento do circuito de proteção contra sobretensão do circuito de carregamento.
- Realização de testes experimentais para validação do desempenho do sistema integrado.

A pesquisa bibliográfica foi realizada por meio da consulta a artigos científicos, teses, manuais técnicos e normas relacionadas, buscando fundamentar as escolhas técnicas e o dimensionamento dos componentes do sistema.

O projeto da turbina foi desenvolvido com base em estudos acadêmicos, especialmente o trabalho de Oliveira (2014), adaptando as dimensões originais por um fator de escala 3 para maximizar o torque inicial, mantendo as características aerodinâmicas do modelo helicoidal.

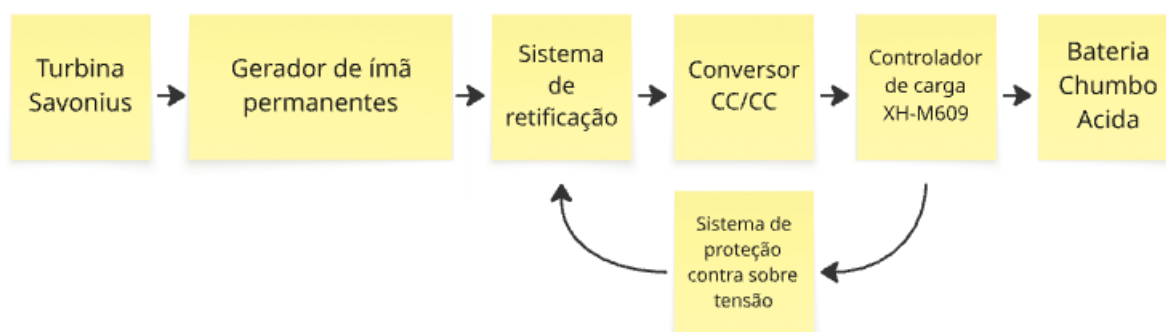
Para garantir a viabilidade do gerador de ímã permanente, foram analisadas suas características elétricas e mecânicas, bem como sua compatibilidade com o sistema de retificação e controle de carga.

O circuito retificador e o sistema de estabilização foram projetados para assegurar uma tensão contínua estável e adequada ao carregamento da bateria, controlado pelo módulo XH-M609, que protege contra sobrecarga e otimiza o processo de carga.

Por fim, o sistema completo será submetido a testes práticos para avaliar a geração elétrica, a eficiência do circuito de estabilização e o desempenho do carregamento da bateria, validando o funcionamento integrado do gerador eólico *off-grid*.

O fluxograma apresentado na Figura 10 indica o fluxo correspondente ao sistema por completo:

Figura 10 – Fluxograma do sistema completo



Fonte: Elaborado pelo autor

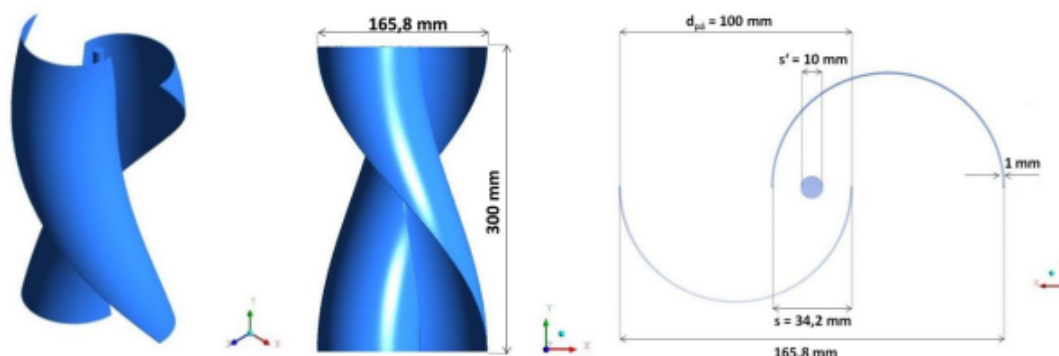
3.1 Turbinha Savonius

Como apresentado durante a revisão bibliográfica, a turbina *Savonius* helicoidal é um tipo de turbina eólica de eixo vertical caracterizada pela torção de 180° em suas pás, o que proporciona um torque mais uniforme e reduz as vibrações típicas das turbinas *Savonius* convencionais. Essa configuração melhora o desempenho aerodinâmico, especialmente em baixas velocidades de vento, tornando-a adequada para sistemas *off-grid* que demandam confiabilidade e operação eficiente em condições variáveis.

3.1.1 Geometria e Dimensionamento

Baseando-se no estudo detalhado de Oliveira (2014), o rotor original apresenta as seguintes dimensões, como indicado na Figura 11: altura de 330 mm, diâmetro de 165,8 mm (medido de extremidade a extremidade das pás) e espessura das pás de 1 mm.

Figura 11 – Estudo desenvolvido por Oliveira (2014)



Fonte: Oliveira (2014)

O projeto da turbina *Savonius* helicoidal, com as dimensões ampliadas por um fator de escala 3, foi modelado utilizando o software *Autodesk Fusion 360*. Essa ferramenta permitiu a criação precisa da geometria helicoidal com torção de 180° nas pás, respeitando as proporções e características aerodinâmicas do modelo original estudado no trabalho de Oliveira (2014).

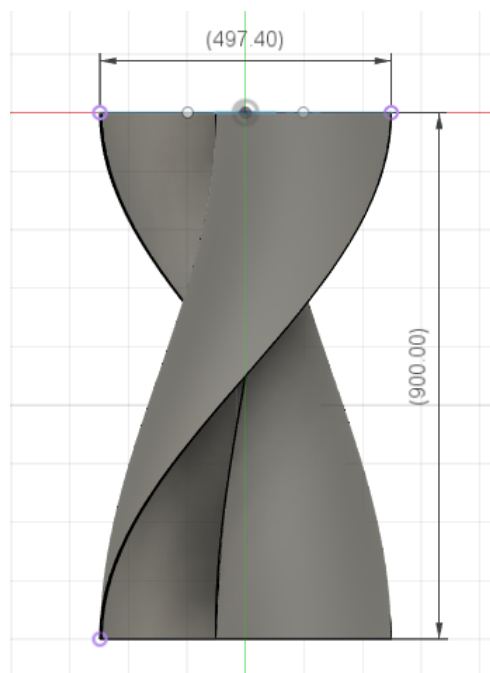
A modelagem no *Fusion 360* envolveu a criação de esboços 2D das seções semicirculares das pás, seguidos pela aplicação de operações de varredura (*sweep*) ao longo de uma trajetória helicoidal, gerada por uma curva do tipo *coil* (espiral), para formar a torção característica do rotor. Esse processo assegura a fidelidade geométrica necessária para a fabricação por impressão 3D.

As principais dimensões adotadas foram:

- Altura: 900 mm
- Diâmetro: 495,4 mm
- Espessura das pás: 3 mm

A modelagem detalhada no *Fusion 360* possibilitou a visualização e análise preliminar do projeto, como apresentado na Figura 12, além de facilitar a geração dos arquivos digitais para a impressão 3D. Essa abordagem também permitiu realizar ajustes e otimizações no design antes da fabricação, garantindo a integridade estrutural e o desempenho aerodinâmico esperado.

Figura 12 – Turbina Savonius modela em *Fusion 360*



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Desempenho Aerodinâmico

A turbina *Savonius* helicoidal, com torção de 180° nas pás, apresenta desempenho aerodinâmico superior ao modelo *Savonius* convencional, principalmente devido à distribuição mais uniforme do torque ao longo da rotação, o que reduz vibrações e oscilações típicas das turbinas de eixo vertical baseadas em forças de arrasto (OLIVEIRA, 2014).

Segundo o estudo detalhado de Oliveira (2014), o coeficiente de potência (C_p) máximo obtido para a turbina helicoidal é de aproximadamente 0,175, alcançado para uma razão de velocidade de ponta (λ) de 0,58, considerando a correção do efeito de bloqueio do túnel de vento. Este valor representa um ganho significativo em relação às turbinas *Savonius* convencionais, que geralmente apresentam C_p entre 0,12 e 0,15.

Além do coeficiente de potência, o estudo destaca que o coeficiente de torque da turbina helicoidal mantém valores positivos para todos os ângulos de rotação, ao contrário da turbina convencional, que pode apresentar torque negativo em certas posições, o que contribui para uma operação mais estável e eficiente (OLIVEIRA, 2014).

3.1.3 Análise do Escoamento e Estrutura da Turbina

A análise do escoamento da turbina *Savonius* helicoidal elaborada por Oliveira (2014), onde foram realizadas simulações numéricas tridimensionais no software *Fluent/ANSYS*, utilizando o modelo de turbulência *k- ω SST* para garantir precisão nos resultados. As simulações mostraram que a geometria reduz significativamente as zonas de recirculação e turbulência em comparação à turbina convencional, resultando em um fluxo de ar mais estável e eficiente. O coeficiente de torque permanece positivo durante toda a rotação, evitando reversões de torque e proporcionando maior estabilidade operacional, além de reduzir vibrações mecânicas.

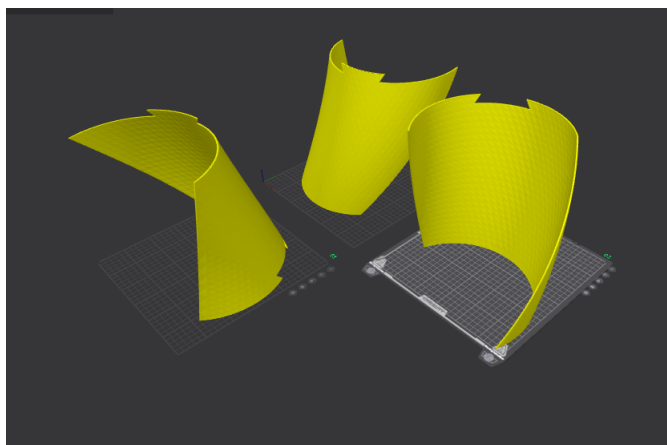
No aspecto estrutural, o aumento do rotor pelo fator de escala 3 exige que os materiais utilizados na impressão 3D sejam resistentes para suportar as maiores cargas de operação. A torção helicoidal das pás distribui os esforços de forma mais homogênea, diminuindo pontos de concentração de tensão e aumentando a durabilidade do sistema. Além disso, a razão de sobreposição das pás foi mantida, contribuindo para o torque de partida e a eficiência geral da turbina. Dessa forma, a análise integrada do escoamento e da estrutura garante que a turbina *Savonius* helicoidal ampliada seja robusta, eficiente e adequada para geração de energia em sistemas *off-grid*.

3.1.4 Fabricação por Impressão 3D

Após a modelagem paramétrica das pás no *Fusion 360*, os arquivos digitais foram exportados para o software *Creality Print*, facilitando o fatiamento e a segregação de cada componente em múltiplas partes individuais. Esse procedimento permitiu otimizar o planejamento das impressões e garantir o melhor aproveitamento do volume útil de fabricação oferecido pela Ender 5 Max.

No ambiente do *Creality Print*, realizaram-se ajustes de orientação, geração automatizada de suportes e simulação do tempo/custo de produção, permitindo o controle de parâmetros como densidade de preenchimento e altura de camada conforme requisitos estruturais de cada segmento da pá. Na Figura 13 é possível a visualização do fatiamento e segregação dos segmentos da pá helicoidal da turbina *Savonius*.

Figura 13 – Segregação em software das pás helicoidais



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a impressão de cada segmento, as partes foram cuidadosamente ajustadas, levando em consideração tolerâncias de encaixe e orientação correta das superfícies, para compensar pequenas variações dimensionais inerentes ao procedimento aditivo. A união dos módulos foi realizada por colagem com resina epóxi, escolhida pela sua elevada capacidade de aderência, resistência ao cisalhamento e durabilidade em ambientes sujeitos a vibrações e variações de temperatura. Este método garante excelente integridade estrutural ao rotor, reduzindo a probabilidade de falhas mecânicas durante ensaios aerodinâmicos ou operação em bancada experimental.

O uso do filamento PLA (ácido polilático) foi definido por equilibrar boa rigidez, leveza e facilidade de acabamento superficial, contribuindo para minimizar perdas aerodinâmicas e ruído causado pela rugosidade da superfície.

Após a etapa de montagem das pás da turbina *Savonius* helicoidal, foi realizado um trabalho de tratamento superficial visando aprimorar o desempenho aerodinâmico do protótipo. Para isso, aplicou-se um lixamento manual cuidadoso utilizando lixa de grana 600, reconhecida por proporcionar acabamento fino e reduzir significativamente a rugosidade residual característica das peças impressas em PLA por manufatura aditiva. Este procedimento é essencial para minimizar a aderência do vento à superfície das pás, pois rugosidades elevadas geram regiões de separação do fluxo e aumentam o coeficiente de arrasto, impactando negativamente a eficiência de conversão energética da turbina.

3.1.5 Sustentação das Pás

A sustentação estrutural das pás da turbina *Savonius* helicoidal foi viabilizada por meio de discos metálicos projetados no software *Fusion 360*, conforme requisitos dimensionais extraídos do modelo paramétrico da turbina. Essas peças foram desenhadas com recortes e encaixes específicos para permitir o posicionamento preciso e a fixação firme das pás, assegurando estabilidade geométrica e alinhamento axial ao conjunto rotórico.

Após a montagem, os discos de sustentação proporcionaram rigidez mecânica ao conjugar as pás ao eixo central, minimizando flexões indesejadas sob carga aerodinâmica e facilitando a montagem/desmontagem para manutenção ou ajustes. Na Figura 14, observa-se o componente finalizado, evidenciando a distribuição e fixação dos suportes soldados para encaixe das pás.

Figura 14 – Discos de sustentação



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Gerador de ímã permanente

3.2.1 Seleção do gerador

A seleção do gerador de ímã permanente adotado neste projeto fundamenta-se na combinação de atributos técnicos desejáveis para sistemas de microgeração distribuída e aplicações *off-grid*, dentre os quais destacam-se: alta eficiência, operação em baixas rotações, baixo nível de ruído e reduzida necessidade de manutenção. Estas características são essenciais para garantir confiabilidade e durabilidade ao sistema elétrico. O modelo escolhido, DON1300WN R/TA, é um motor trifásico robusto, utilizado originalmente em máquinas de lavar roupa inverter da marca Electrolux (modelo LFE11) como a da Figura 15, operando em ligação estrela (Y) sem

aterramento. Este motor trabalha em regime máximo de tensão de 310 VCA quando acionado a 1200 rpm, configurando-se como um gerador adequado para conversão de energia mecânica em elétrica em regimes de baixa e média rotação.

Figura 15 – Eletrolux LFE11



Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de controle da lavadora converte a tensão de entrada, que pode variar entre 110 V e 220 V, e realiza o controle preciso da velocidade do motor, manipulando todas as grandezas elétricas trifásicas envolvidas (tensão, corrente e frequência). Essa metodologia demonstra a adaptabilidade do motor em aplicações que requeiram controle dinâmico de torque e velocidade, características que favorecem sua utilização em conjunto com turbinas eólicas de eixo vertical, como as do tipo *Savonius*, operando em baixas velocidades e possibilitando a integração direta em topologias que dispensam o uso de redutores de velocidade.

Esta versatilidade construtiva e operacional torna o gerador DON1300WN R/TA especialmente indicado para sistemas de geração distribuída com exigência de alta confiabilidade energética e baixo custo de manutenção, alinhando-se às exigências técnicas do presente trabalho.

O gerador selecionado para este projeto é do tipo *outrunner* (rotor externo), uma configuração que apresenta características construtivas e funcionais vantajosas para sistemas de geração eólica de pequeno porte.

3.2.2 Estator do gerador

O estator é composto por um núcleo circular de material ferromagnético, dividido em 36 polos, cada um deles envolto por enrolamentos de fio de cobre esmaltado. Esses enrolamentos são responsáveis por criar o campo magnético girante quando alimentados por corrente elétrica

trifásica (TRINDADE, 2009).

A estrutura central, geralmente feita de material isolante (como plástico de alta resistência), serve de suporte para os enrolamentos e para a fixação do conjunto ao corpo do gerador. Os polos do estator são dispostos radialmente, formando uma coroa circular, típica de GIP *outrunner*, onde o rotor (carcaça externa com ímãs) gira ao redor desse estator fixo (TRINDADE, 2009).

Esse componente é fundamental para a conversão de energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa (quando operando como motor), sendo responsável pela geração do campo magnético que interage com os ímãs do rotor (TRINDADE, 2009). A Figura 16 representa uma vista clara do estator.

Figura 16 – Estator do gerador



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Rotor do gerador

O rotor do GIP do tipo *outrunner* é constituído por uma carcaça externa cilíndrica, na qual estão fixados os ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), distribuídos uniformemente ao longo da superfície interna. Essa configuração permite que o campo magnético gerado pelos ímãs interaja diretamente com os enrolamentos do estator fixo, promovendo a conversão eficiente de energia.

O maior raio da carcaça externa proporciona um aumento no momento de força, resultando em elevado torque mesmo em baixas rotações, característica fundamental para aplicações em geração eólica de pequeno porte. A Figura 17 apresenta o rotor do gerador utilizado do tipo *outrunner*, caracterizado por possuir a carcaça externa como parte girante do conjunto.

Figura 17 – Rotor do gerador



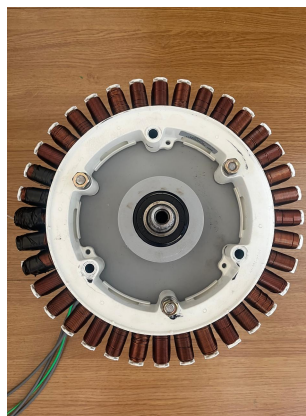
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.4 Alicerce de união rotor-estator

Para possibilitar a integração mecânica entre o rotor e o estator do gerador de ímã permanente DON1300WN R/TA, foi desenvolvido um alicerce estrutural específico, modelado em ambiente *Fusion 360* e produzido por manufatura aditiva. A peça, projetada sob medida e impressa em 3D, atua como elemento de interface garantindo não apenas a fixação precisa, mas também o alinhamento axial e a robustez mecânica do conjunto eletromecânico.

Na Figura 18 está apresentado o alicerce fabricado e já em posição de serviço, atuando como base rígida e elemento de união entre o rotor e o estator, conferindo estabilidade e confiabilidade ao sistema de geração. Esse método de integração demonstra a versatilidade do uso de tecnologias de fabricação digital na engenharia experimental, agilizando etapas do desenvolvimento e facilitando ajustes prototípicos.

Figura 18 – Alicerce de união rotor-estator



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.5 Montagem Final do Sistema Eólico

Após a fabricação, montagem e integração de todos os componentes descritos – pás helicoidais, discos de sustentação, eixo, gerador de ímã permanente e alicerces – foi possível consolidar o sistema eólico experimental para testes. O resultado é um conjunto robusto e funcional, validando as soluções de engenharia adotadas para microgeração renovável em ambiente controlado.

A Figura 19 apresenta a montagem final do sistema, destacando a disposição vertical da turbina *Savonius* sobre o eixo de acoplamento e a fixação do gerador DON1300WN R/TA à sua base estrutural. Essa configuração permite a conversão direta da energia cinética do vento em energia elétrica de modo eficiente.

Figura 19 – Turbina *Savonius* com seu conjunto gerador



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Estudo e preparação do sistema *Off-grid* de potência do gerador

3.3.1 Modelagem Matemática e Caracterização da Tensão Gerada pelo GIP

O gerador de ímã permanente, em operação, a rotação do eixo faz com que os ímãs do rotor atravessem os enrolamentos do estator, induzindo uma força contra-eletromotriz (*back-EMF*) proporcional à velocidade angular do eixo e à constante de *back-EMF* do GIP. (TRINDADE, 2009).

Segundo Trindade (2009), a tensão instantânea gerada em cada fase pode ser modelada por:

$$E = K_e \cdot n \quad (3.1)$$

Onde E é a tensão gerada em volts (V), K_e é a constante de força contra-eletromotriz (*back-EMF*) e n é a rotação do eixo em rotações por minuto (RPM).

Com base nos dados do gerador (310 VCA a 1200 rpm), a constante de força contra-eletromotriz (K_e) é expressa pela equação:

$$K_e = \frac{310 \text{ V}}{1200 \text{ rpm}} \approx 0,258 \text{ V/rpm} \quad (3.2)$$

A tensão gerada pelo GIP utilizado neste projeto é proporcional à rotação do eixo, de acordo com a seguinte expressão:

$$E = 0,258 \cdot n \quad (3.3)$$

Onde E é a tensão gerada em volts (V) e n é a rotação do eixo em rotações por minuto (rpm). A Tabela 1 apresenta os valores de tensão gerada para diferentes rotações do gerador DON1300WN R/T.

Observa-se que, mesmo em baixas rotações, o gerador é capaz de produzir tensões elevadas, o que é favorável para aplicações em sistemas de geração eólica de pequeno porte.

3.3.2 Circuito de retificação e estabilização de tensão

Após a produção da tensão trifásica do GIP, a conversão para corrente contínua é realizada por meio de três módulos de diodos *IXYS MDD44-18 NIB*, conectados

Tabela 1 – Tensão gerada pelo motor DON1300WN R/T em diferentes rotações

Rotação (rpm)	Tensão Gerada (V)
100	25,8
200	51,6
300	77,4
400	103,2
600	154,8
800	206,4
1.000	258,0
1.200	309,6

Fonte: Elaborado pelo autor

em ponte retificadora trifásica. Esses módulos são projetados para suportar correntes elevadas e apresentam robustez adequada para aplicações industriais e sistemas de geração distribuída (IXYS/LITTELFUSE, 2020). A ponte retificadora converte a tensão alternada trifásica em uma tensão contínua pulsante, que, por sua natureza, apresenta ondulações (*ripple*) indesejadas.

3.3.3 Módulos de diodos

Para a etapa de retificação da tensão trifásica produzida pelo gerador, foram selecionados módulos de diodos IXYS MDD44-18N1B. Este componente é um módulo retificador bipolar, encapsulado no padrão industrial TO-240AA, projetado para aplicações de alta potência e robustez em sistemas industriais e de geração distribuída (IXYS/LITTELFUSE, 2020).

O IXYS MDD44-18N1B é composto por dois diodos conectados em série, com as seguintes características principais:

- Tensão máxima reversa (VRRM): 1.800 V
- Corrente máxima direta (IFAV): 59 A
- Corrente de surto (IFSM): 1.150 A
- Queda de tensão direta típica (VFO): 0,8 V
- Encapsulamento: TO-240AA, com base cerâmica de alta dissipação térmica

- Montagem elétrica e mecânica por parafuso, garantindo excelente contato elétrico e facilidade de instalação

A figura 20 demonstra as características construtivas do módulo de diodo IXYS MDD44-18N1B como apontado acima:

Figura 20 – Módulo de diodo IXYS MDD44-18N1B



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.4 Cálculo e Seleção de Capacitores para Filtragem de *Ripple*

Para garantir a estabilidade da tensão de saída e minimizar a ondulação (*ripple*) após a retificação, capacitores eletrolíticos de alta capacitância devem ser conectados em paralelo à carga, imediatamente após a ponte retificadora. O valor adequado do capacitor de filtragem depende da corrente máxima consumida pela carga e da frequência do *ripple* na tensão retificada, que, no caso de uma retificação trifásica, corresponde a seis vezes a frequência da rede (por exemplo, 360 Hz para uma rede de 60 Hz) (EZUIM, s.d.).

De acordo com EZUIM (s.d.), o dimensionamento do capacitor pode ser indicado pela expressão:

$$C = \frac{I}{f \cdot V_{ripple}} \quad (3.4)$$

onde:

C é a capacitância em *farads* (F);

I é a corrente máxima da carga (A);

f é a frequência do *ripple* (Hz);

V_{ripple} é a tensão de ondulação admissível (V).

Considerando uma corrente máxima de 5 A, frequência de *ripple* de 360 Hz e admitindo um *ripple* máximo de 2 V, o valor mínimo recomendado para o capacitor é:

$$C = \frac{5}{360 \times 2} \approx 0,00694 \text{ F} = 6.944 \mu\text{F} \quad (3.5)$$

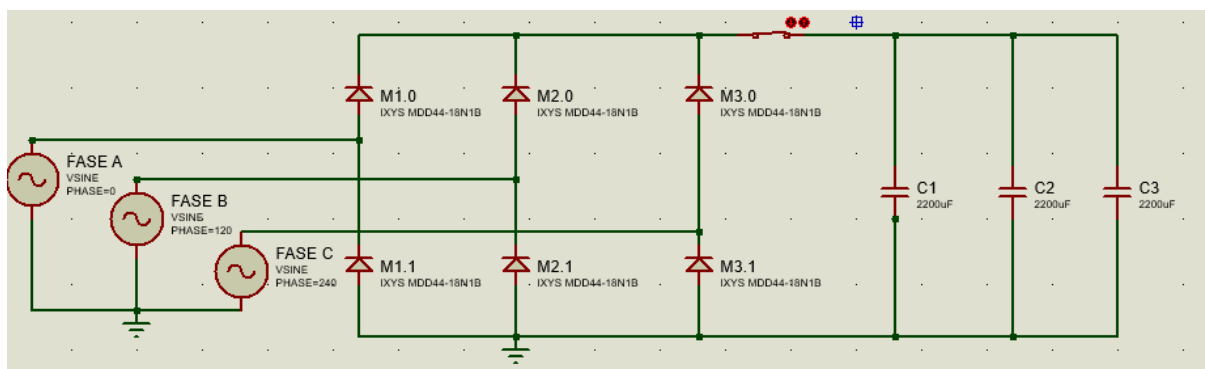
Assim, recomenda-se a utilização de um capacitor comercial de pelo menos $6.800 \mu\text{F}$ com tensão nominal superior à máxima tensão do sistema (por exemplo, 63 V ou 100 V, para maior margem de segurança) (EZUIM, s.d.).

Após o dimensionamento e a seleção dos componentes, o circuito completo de retificação e estabilização de tensão pode ser visualizado na Figura 21. Neste diagrama, observa-se a conexão dos três módulos de diodos IXYS MDD44-18N1B em configuração de ponte trifásica, seguida pelos três capacitores eletrolíticos de $2.200 \mu\text{F}$ cada, associados em paralelo para filtragem da tensão contínua.

O diagrama foi elaborado utilizando o software *Proteus*, uma das ferramentas mais utilizadas mundialmente para projeto, simulação e documentação de circuitos eletrônicos. O *Proteus* permite criar esquemas elétricos com uma ampla biblioteca de componentes, simular o funcionamento do circuito em tempo real e até mesmo desenvolver e testar placas de circuito impresso (PCB) antes da montagem física. Entre suas principais vantagens estão a interface intuitiva, a possibilidade de simulação de microcontroladores, análise de sinais com instrumentos virtuais e a integração entre o projeto esquemático e o layout da placa (TECNOBITS, 2025).

O uso do *Proteus* neste projeto possibilitou a validação prévia do funcionamento do circuito de retificação e filtragem, permitindo identificar e corrigir possíveis falhas ainda na fase de desenvolvimento, além de facilitar a documentação técnica do sistema.

Figura 21 – Circuito de retificação trifásica com filtragem capacitiva.



Fonte: Elaborado pelo autor

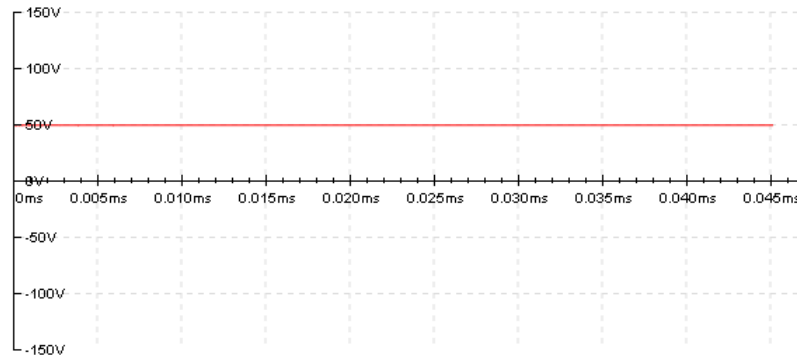
Neste circuito, a tensão alternada trifásica produzida pelo gerador é convertida em tensão contínua pulsante pela ponte de diodos. Os capacitores de filtragem, totalizando $6.600 \mu\text{F}$, 63 V, são responsáveis por estabilizar a tensão de saída e reduzir o *ripple*, garantindo uma alimentação mais estável para o módulo controlador de carga e as baterias. A escolha de módulos de diodo robustos e capacitores adequados assegura maior confiabilidade e vida útil ao sistema, mesmo sob condições de operação com variações de carga ou picos de corrente.

3.3.5 Desempenho do circuito de retificação

O circuito de retificação trifásica, modelado com os diodos IXYS MDD44-18N1B e os três capacitores de $2.200 \mu\text{F}$, foi simulado no *Proteus* sob diferentes condições de carga. As formas de onda obtidas demonstraram conversão eficiente da tensão alternada trifásica em tensão contínua, com *ripple* reduzido e valores estáveis de saída.

A Figura 22 apresenta a tela do osciloscópio virtual do *Proteus* durante a simulação do circuito de retificação. O osciloscópio exibe a tensão contínua de 50 V na saída do retificador. Observa-se uma tensão contínua estável, confirmando a eficiência do circuito de retificação para a condição de carga testada. Esse resultado valida a escolha dos componentes e a topologia do circuito, garantindo o correto funcionamento do sistema de alimentação do controlador XH-M608.

Figura 22 – Desempenho do circuito de retificação

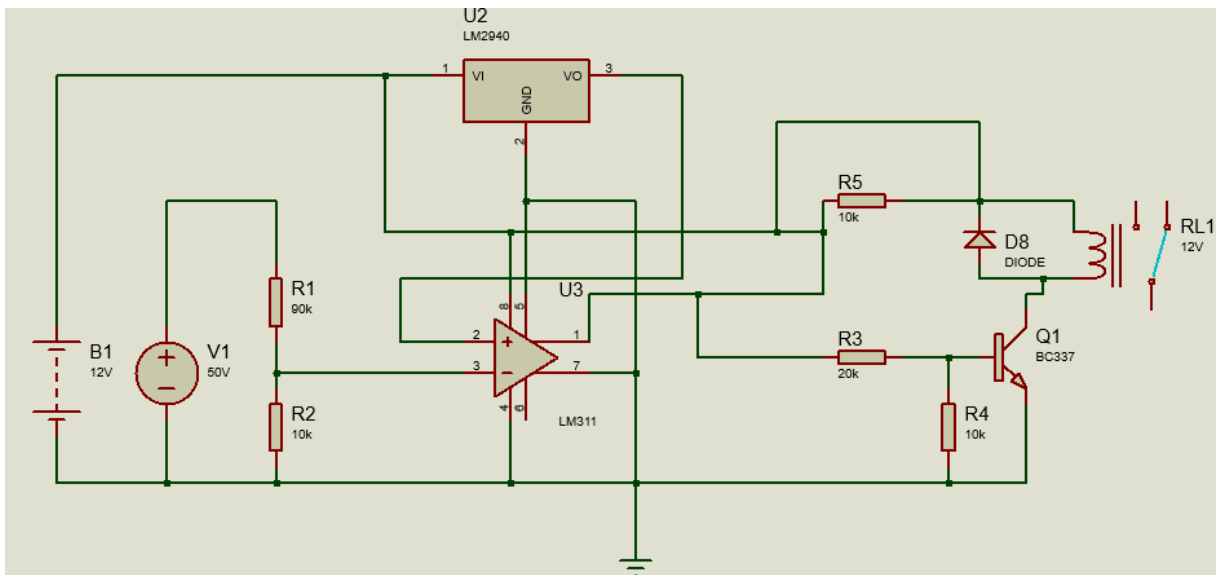


Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Circuito de proteção contra sobretensão

O circuito de proteção contra sobretensão, desenvolvido e simulado no software Proteus, é mostrado na Figura 23. O objetivo desse circuito é monitorar a tensão de saída do sistema de geração e proteger os componentes sensíveis, como os capacitores de filtragem e o módulo controlador de carga XH-M608, caso a tensão ultrapasse o limite seguro de operação de 50 V.

Figura 23 – Circuito de proteção contra sobretensão.



Fonte: Elaborado pelo autor

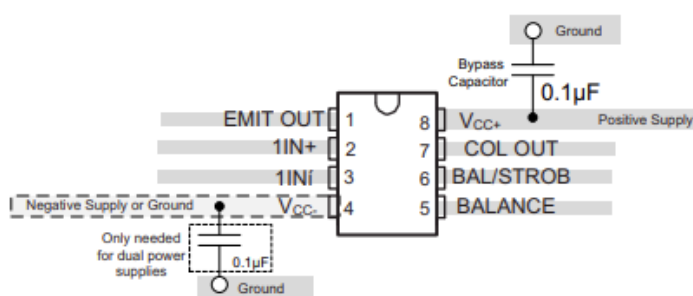
No circuito, a tensão de geração é reduzida por um divisor resistivo formado por R1 e R2, de modo que, quando a tensão de entrada atinge 50 V, a tensão no ponto central do divisor chega a 5 V. Essa tensão é aplicada à entrada inversora do comparador LM311 (U3), enquanto a

entrada não inversora recebe uma referência fixa de 5 V. O regulador LM2940 (U2) é utilizado para fornecer uma tensão de referência estável ao circuito.

3.4.1 LM311 – Comparador de Tensão

O LM311 é um circuito integrado comparador diferencial de alta velocidade, capaz de operar em uma ampla faixa de tensões de alimentação (3,5 V a 30 V) e com saída compatível com os mais variados tipos de circuito. Ele possui duas entradas (inversora e não inversora) e compara as tensões aplicadas a elas, fornecendo na saída um nível lógico alto ou baixo conforme o resultado da comparação. O LM311 é amplamente utilizado para detecção de níveis de tensão, proteção contra sobretensão e conversão analógico-digital simples (INSTRUMENTS, 2004).

Figura 24 – CI LM311



Fonte: Texas. Instruments (2017)

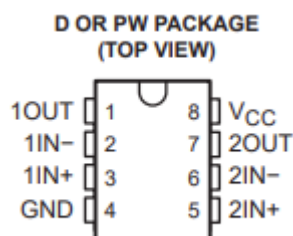
A Figura 24 mostra o encapsulamento e a pinagem do LM311, um comparador diferencial de alta velocidade amplamente utilizado para detecção de níveis de tensão e proteção em circuitos eletrônicos. Destacam-se as entradas inversora e não inversora, os terminais de alimentação e a saída *open-collector*, que permite acionar diretamente cargas externas (INSTRUMENTS, 2004).

3.4.2 LM2940 – Regulador de tensão

O LM2940 é um regulador de tensão linear de baixa queda (*low dropout*), projetado para fornecer correntes de até 1 A com excelente estabilidade e proteção contra curto-circuito, sobrecarga térmica e inversão de polaridade. Sua principal aplicação é garantir uma tensão de referência estável para circuitos sensíveis, mesmo com variações na tensão de entrada. O LM2940 apresenta baixa tensão de *dropout* (típica de 0,5 V para 1 A), tornando-o ideal para

sistemas alimentados por baterias ou fontes sujeitas a oscilações (INSTRUMENTS, 2004).

Figura 25 – CI LM2940



Fonte: Instruments (2004)

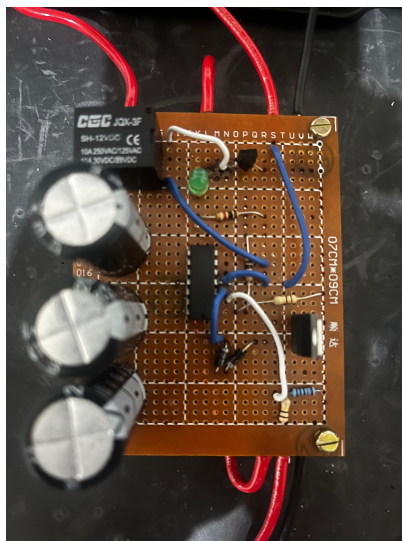
A Figura 25 apresenta a pinagem e encapsulamento do LM2904. O LM2904 é um amplificador operacional duplo, e a figura mostra a disposição dos pinos para cada amplificador: saídas (1 OUT, 2 OUT), entradas inversora e não inversora (1 IN-, 1 IN+, 2 IN-, 2 IN+), alimentação positiva (VCC) e terra (GND). Essa configuração facilita a identificação e conexão correta dos terminais em projetos eletrônicos (INSTRUMENTS, 2004).

3.4.3 Prototipagem do Módulo de Proteção e estabilização

A etapa de desenvolvimento do circuito impresso foi inicialmente conduzida no software *proteus*, utilizada para o desenho esquemático, roteamento e simulação virtual dos circuitos eletrônicos do sistema de proteção.

Para a realização prática, optou-se pela montagem dos sistemas de proteção em placa universal padrão pré-furada (fenolite perfurado), uma alternativa amplamente empregada em prototipagem e validação funcional de projetos eletrônicos. Todos os componentes dos circuitos de proteção e estabilização foram cuidadosamente posicionados segundo o layout planejado, encaixados nos furos passantes da placa, e soldados manualmente, como demonstrado na Figura 26.

Figura 26 – Módulo de Proteção e estabilização



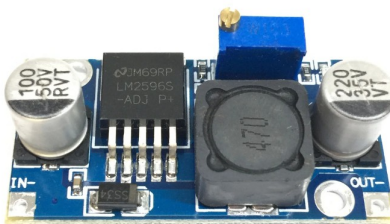
Fonte: Elaborado pelo autor

A soldagem foi feita com ferro de ponta fina e solda estanhada, promovendo contatos firmes e acabamento limpo entre as ilhas e trilhas improvisadas. Cuidados adicionais foram tomados quanto à dissipação térmica e ao isolamento entre trilhas e terminais adjacentes, minimizando riscos de curto e ruídos elétricos. Este método viabilizou ajustes rápidos, substituição facilitada de componentes em bancada e testes contínuos do sistema.

3.5 Conversor CC/CC

Para viabilizar a alimentação do módulo controlador de carga XH-M609 e do sistema de bateria, foi empregado um conversor CC/CC dedicado, construído a partir de uma placa comercial baseada no circuito integrado LM2596 igualmente o representado na Figura 27. Este conversor tem como função principal receber a tensão contínua retificada e estabilizada proveniente do gerador, que pode variar de 0 a 50 V, e convertê-la para um valor fixo de 12 V, adequado ao funcionamento dos dispositivos eletrônicos do sistema.

Figura 27 – CI LM2596



Fonte: Texas Instruments (2016)

O uso do LM2596 como componente central do conversor foi motivado por sua ampla faixa de operação, baixa corrente de quiescência e robustez em aplicações de controle e regulação. A placa pronta facilita a implementação e reduz a complexidade do sistema, oferecendo um conjunto *already* testado de proteção contra sobrecorrente e variações transitórias, além de compatibilidade com módulos de corte e recarga de baterias.

A integração deste conversor garante a estabilidade da tensão de alimentação do XH-M609, independentemente das oscilações da tensão de entrada, assegurando o controle seguro do processo de carga e descarga da bateria. Esse arranjo contribui para a confiabilidade global do sistema, protegendo tanto os componentes eletrônicos quanto a autonomia do arranjo *off-grid*.

3.6 Controlador de carga XH-609

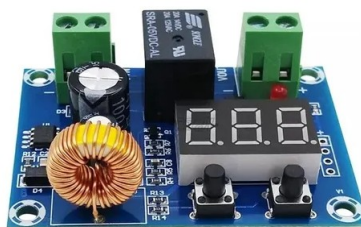
O módulo controlador XH-M609 foi empregado para o gerenciamento do carregamento e proteção da bateria do sistema. Este módulo é projetado para operar em sistemas de 6 V a 40 V, sendo compatível com diferentes tipos de baterias recarregáveis, como lítio e chumbo-ácido. O XH-M609 integra funções de monitoramento, proteção contra sobretensão e subtensão, e controle automático do processo de carga e descarga, oferecendo maior segurança e praticidade ao sistema (Mantech, 2024).

Além do controle de carga e descarga, o XH-M609 pode ser utilizado como voltímetro independente, facilitando o monitoramento contínuo do sistema. Sua instalação é simples, com terminais de parafuso para conexão dos cabos de alimentação, bateria e carga. As dimensões compactas (aproximadamente 57 mm × 42 mm × 19 mm) permitem fácil integração em painéis e caixas de controle (Mantech, 2024).

A Figura 28 ilustra a ligação típica do módulo controlador XH-M609 em um sistema de carregamento de baterias. O diagrama mostra a conexão da fonte de entrada (6–40 V),

bateria e carregador, além da configuração dos terminais do relé para controle automático do carregamento, permitindo a proteção contra sobrecarga e subtensão.

Figura 28 – Controlador de carga
XH-M609



Fonte: Mantech (2024)

3.7 Bateria chumbo-ácido *VRLA*

A bateria utilizada no sistema é do modelo Energy Power EP12-7, uma chumbo-ácida selada recarregável do tipo VRLA (Valve Regulated Lead Acid), com capacidade nominal de 7 Ah e tensão de 12 V. Sua construção selada e regulada por válvula permite operação em diversas posições e ambientes, garantindo segurança, baixa taxa de auto-descarga e fácil manutenção. Com dimensões compactas (151 mm de comprimento, 65 mm de largura e 100 mm de altura) e peso aproximado de 2 kg, esta bateria é amplamente empregada em sistemas estacionários de backup, nobreaks, sistemas de segurança e aplicações off-grid de pequeno porte devido à confiabilidade, durabilidade e praticidade de instalação (Energy Power, 2025).

A capacidade de 7 Ah é adequada para o armazenamento de energia dos ensaios do projeto, proporcionando autonomia suficiente para alimentar cargas elétricas de baixa potência integradas ao sistema experimental. Sua compatibilidade com o controlador de carga XH-M608 facilita o gerenciamento do ciclo de carga/descarga, protegendo a bateria e aumentando a vida útil do sistema. Assim, essa escolha confere robustez e eficiência, alinhando-se às demandas de projeto.

Figura 29 – Bateria chumbo-ácido



Fonte: Energy Power (2025)

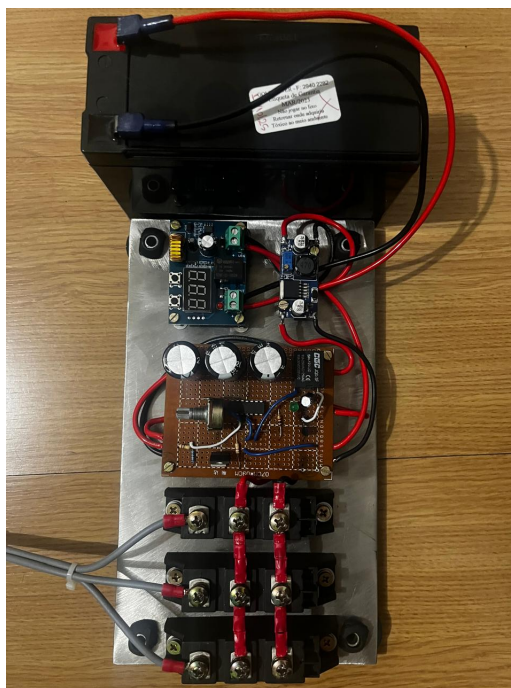
3.8 Visão Integrada do Sistema Eólico *off-grid*

A Figura 30 apresenta a visão geral do sistema experimental implementado, englobando todas as etapas do processo de conversão e gerenciamento de energia elétrica. O diagrama real evidencia a trajetória completa da energia, começando pela geração trifásica via turbina *Savonius* e gerador de ímã permanente, seguida da retificação, filtragem e estabilização da tensão elétrica.

Após essa etapa, a energia passa pelo conversor CC/CC, responsável por adequar a tensão para utilização no módulo de controle e proteção XH-M609 que faz o carregamento adequado das baterias.

A integração dos blocos pode ser visualizada fisicamente na montagem, onde cada subsistema (retificação, regulação, proteção e armazenamento) está disposto de forma lógica e acessível, favorecendo o entendimento do fluxo de energia. A adoção de sistemas de armazenamento por baterias proporciona autonomia e resiliência ao sistema, permitindo o funcionamento mesmo durante variações ou ausência de vento.

Figura 30 – Arquitetura geral do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor

3.9 Orçamento do projeto

A Tabela 2 sintetiza o orçamento do projeto apresentado, detalhando o custo individual de cada componente e material empregado na construção do protótipo. O inventário contempla desde elementos estruturais e eletrônicos até dispositivos destinados ao controle e à conversão de energia, cuidadosamente selecionados conforme requisitos de funcionalidade, disponibilidade no mercado e viabilidade econômica para sistemas *off-grid*.

A análise da composição dos itens destaca o rigor adotado na etapa de especificação, que priorizou desempenho técnico aliado ao melhor custo-benefício. O orçamento consolidado na tabela garante que todos os recursos essenciais estejam devidamente contemplados.

Tabela 2 – Lista de materiais utilizados no projeto experimental

ITEM	QTD	UNIDADE	VALOR	VALOR TOTAL
Bobina Filamento PLA	4	Unid.	R\$ 90,00	R\$ 360,00
Estator Gerador	1	Unid.	R\$ 110,00	R\$ 110,00
Rotor Gerador	1	Unid.	R\$ 80,00	R\$ 80,00
Chapa de aço inox 304, 1,5mmx1m ²	1	Unid.	R\$ 110,00	R\$ 110,00
Barra roscada M12X1m	1	Unid.	R\$ 37,00	R\$ 37,00
Barra roscada M8X1m	2	Unid.	R\$ 18,00	R\$ 36,00
Porca Sextavada M12	10	Unid.	R\$ 2,30	R\$ 23,00
Porca Sextavada M8	30	Unid.	R\$ 1,10	R\$ 33,00
Módulo de Diodos	3	Unid.	R\$ 59,00	R\$ 177,00
Placa Fenolite Pré Furado 9x12cm	1	Unid.	R\$ 8,00	R\$ 8,00
CI LM311	1	Unid.	R\$ 2,30	R\$ 2,30
CI LM7807	1	Unid.	R\$ 2,40	R\$ 2,40
Capacitor Eletrolítico 2200uf/63V	3	Unid.	R\$ 15,00	R\$ 45,00
Transistor PNP BC327	1	Unid.	R\$ 0,40	R\$ 0,40
Resistor 10K	3	Unid.	R\$ 0,12	R\$ 0,36
Resistor 90K	1	Unid.	R\$ 0,10	R\$ 0,10
Relé 10A 12V	1	Unid.	R\$ 12,00	R\$ 12,00
Controlador de bateria XH-M609	1	Unid.	R\$ 24,00	R\$ 24,00
Conversor DC/DC LM2596	1	Unid.	R\$ 30,00	R\$ 30,00
Bateria 12V/7ah	2	Unid.	R\$ 115,00	R\$ 230,00
			TOTAL:	R\$ 1.320,56

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos testes realizados nos circuitos de retificação e proteção, incluindo as análises oscilográficas laboratoriais que permitiram validar o desempenho dos principais blocos do sistema após a montagem física. Para garantir a confiabilidade dos resultados e simular condições reais de operação, foram conduzidos ensaios em ambiente controlado, utilizando ventiladores industriais. A criação de um fluxo de vento ajustável proporcionou o controle preciso da velocidade incidente sobre a turbina, viabilizando a avaliação do funcionamento do conjunto aerodinâmico e eletromecânico em diferentes patamares de rotação e carga.

4.1 Turbina Savonius

Para a avaliação experimental do desempenho da turbina *Savonius* helicoidal desenvolvida, foi conduzida uma série de testes empregando um ventilador industrial de grande porte, capaz de fornecer fluxo de ar controlado e reproduzir condições de vento estáveis em ambiente controlado.

O protocolo experimental consistiu em ajustar a posição da Turbina em relação ao ventilador afastando ou aproximando o protótipo, submetendo assim a turbina a diferentes velocidades de vento, previamente aferidas com o anemômetro digital apresentado na Figura 31, posicionado próximo ao plano de rotação do rotor. Para cada valor de velocidade, foram registrados dados de rotação (RPM), velocidade do vento e tensão induzida do gerador, possibilitando a plotagem de curvas características do sistema.

Figura 31 – Anemômetro Digital



Fonte: Elaborado pelo autor

O ventilador industrial utilizado nos ensaios como mostrado na Figura 32 foi capaz de gerar uma vazão de ar com velocidade máxima medida de 10 m/s, conforme aferido via anemômetros digitais posicionados junto ao plano das pás. Este valor corresponde a aproximadamente 36 km/h, considerando o fator de conversão padrão ($1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$). Essa vazão permitiu simular regimes de vento baixos a moderados, compatíveis com faixas típicas observadas em aplicações reais de microgeração eólica, garantindo a representatividade dos resultados experimentais das curvas de potência e eficiência.

Figura 32 – Ventilador industrial utilizado nos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O ventilador industrial utilizado nos ensaio possui altura aproximada de 1,1 m, o que resulta em uma área frontal significativa para incidência do fluxo de ar sobre a turbina. Essa dimensão permite à corrente de vento cobrir adequadamente toda a extensão vertical do rotor *Savonius*, maximizando a interação aerodinâmica e minimizando efeitos de desuniformidade no escoamento. Assim, a configuração adotada confere elevada representatividade experimental, aproximando as condições de teste às situações reais de operação em campo aberto, e tornando os dados de desempenho da turbina mais robustos e consistentes para análise de curvas de potência, eficiência e rendimento do conjunto.

4.1.1 Resultados Experimentais da Curva de Potência da Turbina *Savonius* com Carga de 1 A

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados com a turbina *Savonius* helicoidal, submetida a uma carga em torno de 1 A no circuito de saída. Os valores correspondem a diferentes velocidades de vento, variando entre 1,3 m/s e 10 m/s, simuladas com auxílio de ventilador industrial direcionado e monitoradas pelo anemômetro digital.

Para cada regime de vento testado, registraram-se a rotação do rotor (RPM), a tensão contínua gerada (VDC) e a frequência elétrica correspondente. Observa-se que, para velocidades inferiores a 2 m/s, a rotação se mantém muito baixa e a potência produzida é praticamente nula, o que confirma o comportamento típico de turbinas de arrasto em baixas velocidades. A partir de 3 m/s, há crescimento significativo tanto na rotação quanto na tensão gerada, evidenciando o aumento da energia cinética disponível no escoamento e seu aproveitamento mecânico e elétrico pelo conjunto gerador.

O desempenho global da turbina demonstrou-se crescente até a faixa máxima de teste, atingindo 109 RPM e cerca de 38 VDC para 10 m/s (36 km/h), bem como frequência elétrica da ordem de 10,9 Hz. Esses resultados indicam adequada conversão de energia e validação do projeto experimental, sendo os dados compatíveis com ensaios similares encontrados na literatura técnica.

Tabela 3 – Curva de potência experimental da turbina *Savonius* (carga de 1 A)

Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)	Rotação (RPM)	Tensão produzida (VDC)	Frequência elétrica trifásica (Hz)
1,3	4,68	0	0	0
2,5	9	7	3,07	0,7
3,8	13,68	17	5,9	1,7
5,4	19,44	32	14	3,2
7,6	27,36	57	19	5,7
8,3	29,88	75	29	7,5
9,4	33,84	93	33	9,3
10,0	36,00	109	38	10,9

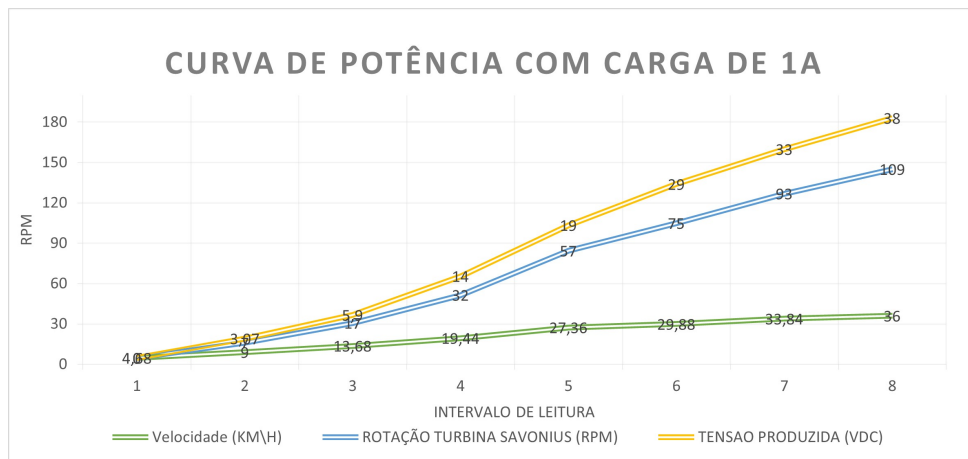
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o levantamento dos resultados experimentais, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 33, que ilustra a variação da rotação do rotor, tensão contínua produzida e frequência elétrica da turbina *Savonius* em função da velocidade do vento sob carga aproximada de 1 A. O gráfico foi gerado diretamente a partir dos valores registrados na tabela anterior, possibilitando análise visual da dinâmica do sistema e identificação das faixas de operação mais favoráveis

para a conversão de energia.

Os dados apresentados permitem observar claramente o crescimento quase linear das variáveis elétricas avaliadas, sobretudo acima de 3 m/s, além de facilitar comparações de desempenho com referências da literatura e orientar otimizações futuras do protótipo.

Figura 33 – Curva de potência experimental da turbina *Savonius* (carga de 1 A)



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Resultados Experimentais da Curva de Potência da Turbina *Savonius* com Carga de 5 A

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados com a turbina *Savonius* helicoidal, submetida a uma carga aproximada de 5 A no circuito de saída. As medições envolveram velocidades de vento variando entre 1,3 m/s e 10 m/s, simuladas em ambiente laboratorial controlado e monitoradas por anemômetros digitais.

Observa-se que, para velocidades inferiores a 7 m/s, a turbina apresentou respostas praticamente nulas, com rotação e saída do gerador muito próximos de zero, indicando a necessidade de um regime mínimo para a partida do sistema sob essa condição de carga elevada. Superior a esse patamar, a rotação do rotor, a tensão contínua produzida e a frequência elétrica aumentam progressivamente com a velocidade do vento, porém com valores inferiores aos observados para carga de 1 A, devido ao maior torque resistivo imposto pela carga mais elevada.

Esses resultados ressaltam a influência significativa da carga elétrica nas características dinâmicas e energéticas da turbina, destacando a importância do correto dimensionamento dos sistemas associados para otimizar o desempenho em aplicações práticas.

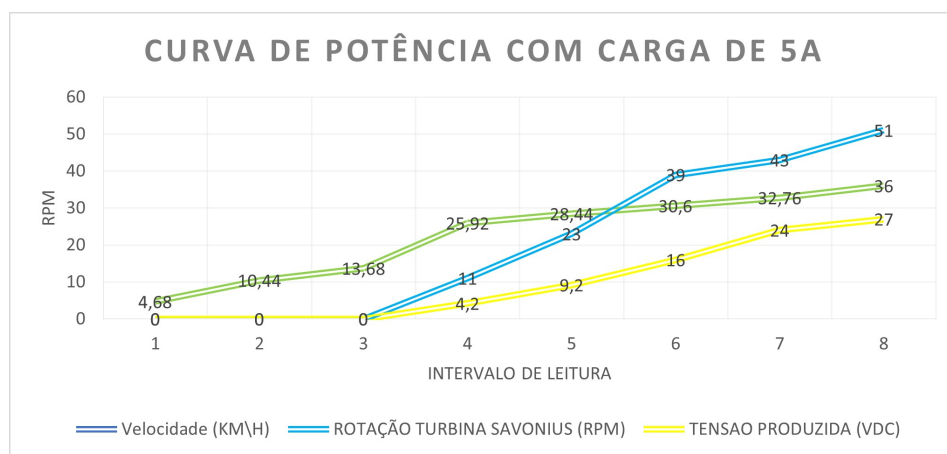
Tabela 4 – Curva de potência experimental da turbina *Savonius* (carga de 5 A)

Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)	Rotação (RPM)	Tensão produzida (VDC)	Frequência elétrica trifásica (Hz)
1,3	4,68	0	0	0
2,9	10,44	0	0	0
3,8	13,68	0	0	0
7,2	25,92	11	4,2	1,1
7,9	28,44	23	9,2	2,3
8,5	30,60	39	16	3,9
9,1	32,76	43	24	4,3
10,0	36,00	51	27	5,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o levantamento dos resultados experimentais foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 34, o qual ilustra a variação da rotação do rotor, tensão contínua produzida e frequência elétrica da turbina *Savonius* em função da velocidade do vento sob carga aproximada de 5 A. O gráfico foi construído diretamente a partir dos valores registrados na tabela anterior, permitindo análise visual detalhada do comportamento do sistema e identificação dos patamares de operação mais adequados para a conversão de energia elétrica em regimes de maior solicitação de corrente.

Observa-se que, devido ao aumento do torque resistivo imposto pela carga de 5 A, as variáveis elétricas apresentaram crescimento menos acentuado e uma velocidade de vento inicial mais elevada para o início efetivo da geração, com respostas praticamente nulas até velocidades superiores a 7 m/s. A partir desse ponto, verifica-se a elevação progressiva de rotação, tensão e frequência, embora todas em patamares inferiores aos observados para cargas menores.

Figura 34 – Curva de potência experimental da turbina *Savonius* (carga de 5 A)

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3 Comparação entre os Regimes de Carga de 1 A e 5 A para a Turbina *Savonius*

A análise comparativa entre as curvas de potência da turbina *Savonius* para cargas de 1 A e 5 A evidencia com clareza os efeitos do aumento de corrente na *performance* global do gerador e do conjunto turbina-gerador. Com a carga de 1 A, a turbina apresenta início de geração e desenvolvimento de rotação já em velocidades intermediárias de vento, com crescimento quase linear das variáveis elétricas e mecânicas a partir de 3 m/s. Nessa condição, os patamares de rotação, tensão e frequência elétrica atingem valores significativamente superiores para a mesma velocidade de vento em relação ao caso de 5 A.

Sob carga de 5 A, observa-se uma elevação do regime de vento necessário para o início efetivo da geração, com respostas praticamente nulas para velocidades inferiores a 7 m/s. Isso se deve ao maior torque resistivo imposto pela carga mais elevada, que exige maior energia do vento para superar o arrasto e as perdas do sistema.

Esses resultados demonstram que, apesar da robustez construtiva e da versatilidade da turbina *Savonius* em microgeração, regimes de carga elevados impõem restrições à faixa de operação e ao aproveitamento energético, especialmente em cenários de ventos moderados.

Um aspecto crucial para a análise de desempenho do sistema de microgeração proposto refere-se à limitação de corrente imposta pelo conversor CC/CC empregado no protótipo. O conversor utilizado possui especificação máxima de 5 A na saída, valor que condiciona diretamente a faixa operacional segura do sistema e atua como restrição para a extração máxima de potência elétrica da turbina *Savonius*.

4.1.4 Análise da potência elétrica gerada nos ensaios experimentais

A potência elétrica entregue pelo gerador, em ambos os ensaios, foi calculada pelo produto entre a tensão contínua (V_{DC}) registrada nos terminais de saída e a corrente (I) definida experimentalmente através da carga conectada ao sistema:

$$P = V_{DC} \times I$$

Assim, para cada condição de vento avaliada, a potência foi obtida multiplicando a tensão medida pelo valor fixo da corrente (1 A ou 5 A).

Nos testes com carga de 1 A, a potência mínima observada foi nula para velocidades de vento inferiores a 2 m/s (7,2 km/h), apresentando início efetivo de geração a partir de 3 m/s

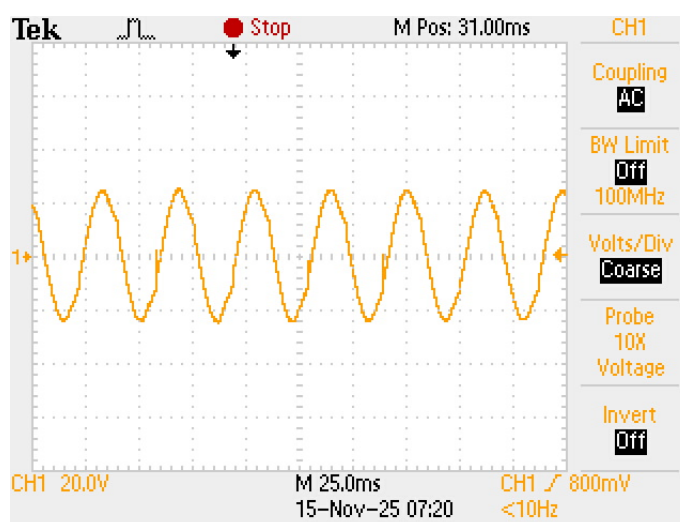
(10,8 km/h). Nesta situação, o valor máximo registrado atingiu aproximadamente 38 W na condição de 10 m/s (36 km/h), correspondente à tensão de 38 VDC. Já para a carga de 5 A, a potência também foi nula até ventos superiores a 7 m/s (25,2 km/h), chegando ao extremo de 135 W sob vento de 10 m/s (36 km/h), pela tensão máxima de 27 VDC. Essas medições permitem delimitar os regimes de disponibilidade energética da turbina, evidenciando a importância da adequada compatibilização entre perfil de vento, regime de carga e especificação do conversor empregado.

4.2 Análise da qualidade de energia do GIP

A avaliação da qualidade da energia produzida pelo GIP constitui etapa fundamental para a validação de sistemas de microgeração distribuída, especialmente em aplicações *off-grid*. O processo envolveu a análise oscilográfica das fases do gerador, realizada antes da etapa de retificação, visando caracterizar a estabilidade, a simetria e o comportamento da tensão alternada gerada.

A Figura 35 apresenta a oscilografia registrada na fase A do GIP durante os ensaios em regime de carga, utilizando um motor de corrente contínua com corrente nominal próxima de 1 A para simular o consumo e avaliar o comportamento do sistema sob demanda elétrica realista. A forma de onda exibida é predominantemente senoidal, com baixa distorção e amplitude consistente, evidenciando a qualidade da geração trifásica e o correto funcionamento dos enrolamentos e do arranjo magnético do gerador.

Figura 35 – Tensão alternada produzida pelo GIP



Fonte: Elaborado pelo autor

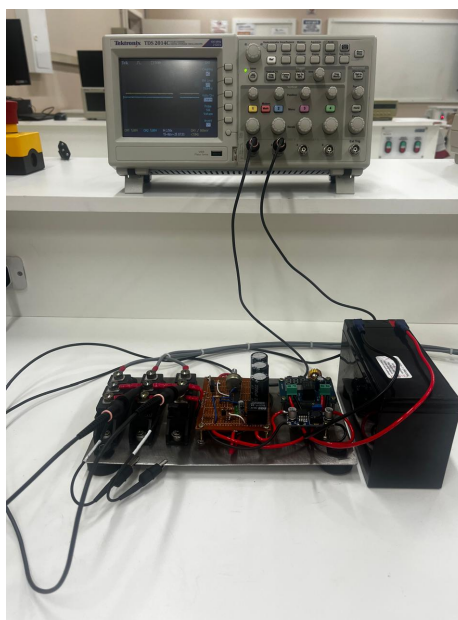
A oscilografia foi realizada conectando-se os canais do osciloscópio entre cada um dos terminais de saída de fase do GIP e o terminal comum de fechamento em estrela (Y). Essa configuração permitiu registrar diretamente a forma de onda da tensão de cada fase em relação ao fechamento (Y), assegurando medições precisas das grandezas fundamentais do sistema.

Optou-se por apresentar somente a imagem da fase A, dada a similaridade dos resultados. O teste com carga permitiu analisar o comportamento sob condições reais de operação, detectando possíveis variações transitórias, influências da carga sobre a estabilidade da tensão e a resposta dinâmica do sistema diante diferentes patamares de rotação.

4.3 Desempenho do circuito de retificação e estabilização de tensão

A avaliação do sistema de retificação e estabilização foi conduzida por meio de testes laboratoriais em três patamares distintos de tensão contínua após a retificação: 20 V, 30 V e 40 V. O objetivo foi analisar o desempenho do filtro capacitivo e da arquitetura de estabilização sob diferentes condições operacionais, simulando cenários de carga variada e regimes de geração.

Figura 36 – Ambiente laboratorial utilizado para realizar os testes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 36 apresenta o ambiente laboratorial e o osciloscópio digital empregado na aquisição das formas de onda e medições de tensão e *ripple* durante os ensaios do circuito de retificação e estabilização. O equipamento permitiu registrar, visualizar e analisar com precisão

os sinais elétricos do sistema sob diferentes condições de operação.

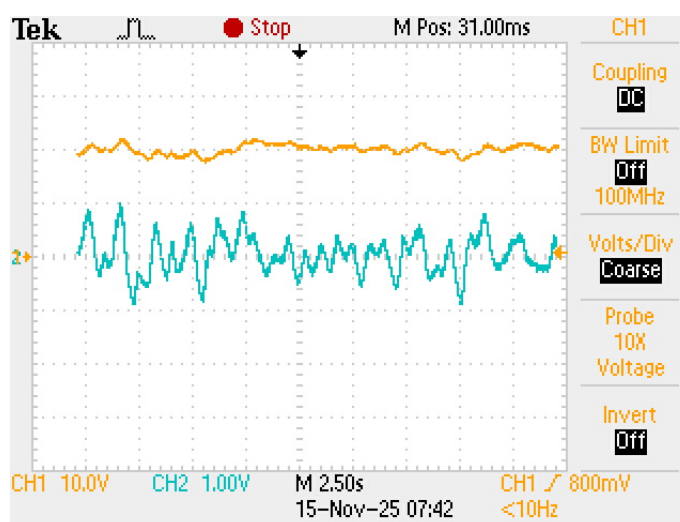
Para cada condição de teste, utilizou-se o osciloscópio com uma das ponteiros conectada em modo DC, aferindo a tensão contínua de saída do sistema, enquanto a outra ponteira, configurada para modo AC, foi dedicada à medição do nível de *ripple* residual, diretamente sobre o mesmo ponto de saída. Essa técnica possibilitou a estimativa precisa da amplitude do *ripple* presente após a ação do filtro, fundamental para avaliar o grau de estabilização e a qualidade energética do circuito.

4.3.1 Teste de Estabilização em 20 VDC

O primeiro teste foi realizado mantendo a saída do circuito de retificação e filtragem ajustada em 20 VCC. Na Figura 37, registra-se o resultado obtido no osciloscópio: o canal 1 (linha superior, 10 V/div, acoplamento DC) evidencia a estabilidade da tensão contínua do sistema. O canal 2 (linha inferior, 1 V/div, acoplamento AC) mostra as flutuações do *ripple* residual sobre a tensão CC.

A análise dos dados indica que o *ripple* máximo observado nessa condição foi de aproximadamente 1 V pico-a-pico, correspondendo a cerca de 5% da tensão contínua analisada. Trata-se de um valor compatível com as exigências de alimentadores eletrônicos para sistemas de controle, sem risco de prejuízos para a integridade dos componentes. O filtro capacitivo mostrou-se eficaz em atenuar as oscilações indesejadas, garantindo suprimento energético com boa qualidade para os módulos seguintes do sistema.

Figura 37 – Teste de Estabilização em 20 VDC



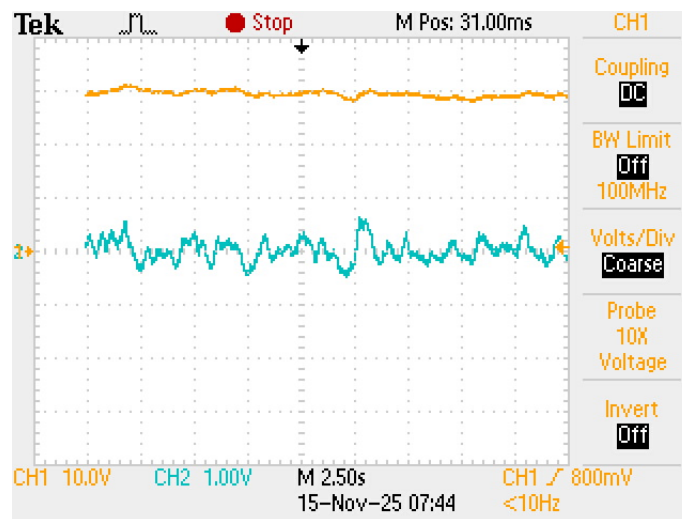
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2 Teste de Estabilização em 30 VDC

No segundo teste, o sistema foi ajustado para fornecer 30 VCC após a retificação e filtragem. A Figura 38 ilustra os sinais registrados: o canal 1 (superior, 10 V/div, acoplamento DC) demonstra estabilidade contínua da tensão de saída, com valores próximos a 30 V. O canal 2 (inferior, 1 V/div, acoplamento AC) exibe o *ripple* residual presente sobre a componente contínua.

A análise revela que a amplitude máxima do *ripple* permaneceu em torno de 0,8 V pico-a-pico, representando uma melhora percentual em relação ao teste de 20 V. O filtro capacitivo mostrou-se competente, atenuando as flutuações e garantindo que o *ripple* ficasse abaixo dos limites considerados críticos para aplicações com eletrônica sensível. O desempenho do circuito de estabilização foi satisfatório para esta faixa de operação, corroborando a eficiência do projeto em diferentes cenários de tensão de entrada.

Figura 38 – Teste de Estabilização em 30 VDC



Fonte: Elaborado pelo autor

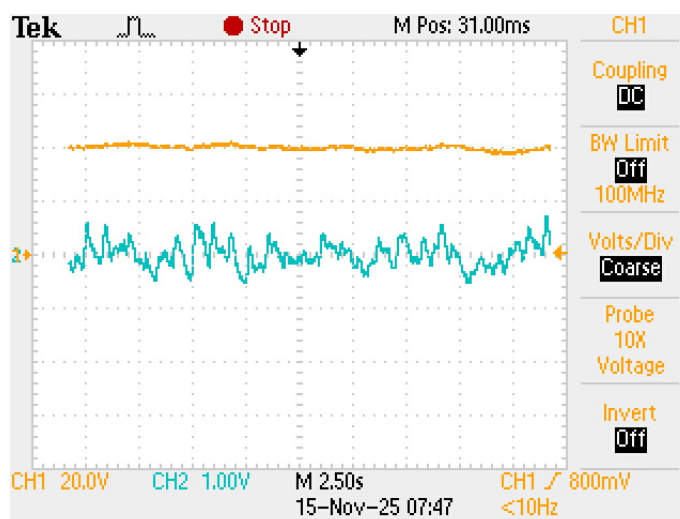
4.3.3 Teste de Estabilização em 40 VDC

No terceiro experimento, o sistema de retificação foi ajustado para fornecer 40 VCC na saída. A Figura 39 mostra a oscilografia obtida: o canal 1 (superior, 10 V/div, acoplamento DC) indica estabilidade na tensão contínua ao longo do intervalo analisado. O canal 2 (inferior, 1 V/div, acoplamento AC) registra o *ripple* residual, com amplitude máxima próxima de 0,6 V pico-a-pico, valor ligeiramente inferior aos testes anteriores.

Este resultado evidencia a elevada eficiência do filtro capacitivo, que manteve o *ripple*

dentro dos padrões técnicos exigidos para alimentação de sistemas eletrônicos críticos, mesmo em regime de tensão elevada. A estabilização da tensão foi plenamente eficaz, destacando-se o desempenho consistente do sistema tanto em baixas quanto em altas faixas de operação.

Figura 39 – Teste de Estabilização em 40 VDC



Fonte: Elaborado pelo autor

Os testes realizados em diferentes níveis de tensão (20 V, 30 V e 40 V) demonstraram que o circuito de retificação e filtragem capacitiva apresenta desempenho consistente e eficiente, assegurando baixa amplitude de *ripple* residual mesmo sob variação das condições de operação. Observou-se que o *ripple* máximo reduziu com o aumento da tensão de saída, atingindo valores sempre inferiores aos limites toleráveis para aplicações eletrônicas sensíveis, o que evidencia adequação do projeto ao propósito de qualidade energética.

4.4 Desempenho do Conversor CC/CC

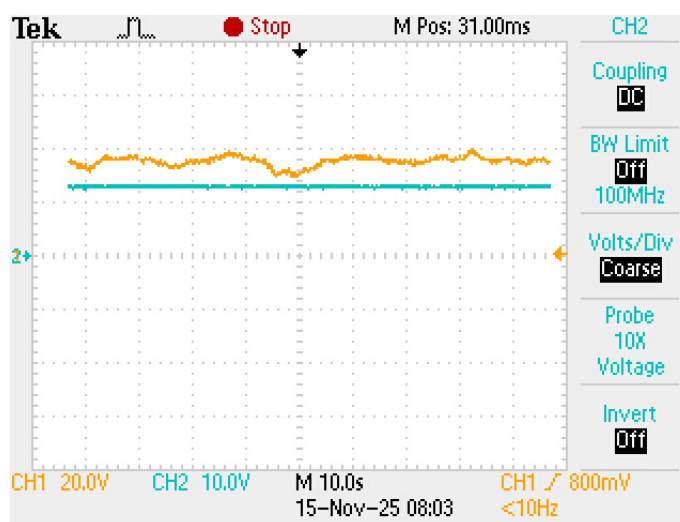
O conversor CC/CC, baseado no circuito integrado LM2596, foi submetido a testes de estabilidade com diferentes tensões de entrada e carga constante de 1 A. Conforme a oscilografia da Figura 40, durante o intervalo observado o canal 2 do osciloscópio (10 V/div, acoplamento DC) registrou a tensão de saída do conversor, enquanto o canal 1 pode ser usado para monitoração da entrada.

O LM2596 opera em modo chaveado, com frequência de comutação de até 150 kHz e eficiência de conversão máxima próxima de 92%. Durante todo o período do teste, a tensão de saída manteve-se rigorosamente estável e livre de oscilações perceptíveis — independentemente das variações de entrada impostas ao sistema. Para a carga de 1 A utilizada, não foram observadas

quedas de tensão, efeito de *overshoot*, nem variações transientes, indicando elevada precisão da regulação (regulação de carga de aproximadamente $\pm 0,5\%$).

Adicionalmente, não se verificou *ripple* significativo: o valor de ondulação na saída permaneceu abaixo de 50 mV, índice que ratifica a robustez do controle interno do LM2596 em condições reais de operação. Essa performance é assegurada pelo projeto do regulador, que utiliza controle PWM e *feedback* interno para correções rápidas de tensão em resposta a perturbações de carga.

Figura 40 – Desempenho do Conversor CC/CC



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, os resultados do teste confirmam que o conversor LM2596 oferece excelente desempenho em aplicações que exigem alimentação regulada para módulos de proteção, controladores e sistemas de armazenamento, mesmo sob regimes dinâmicos e variações de entrada frequentes.

4.5 Resultados do chaveamento da carga pela placa XH-M609 e do carregamento dos elementos acumuladores (baterias)

Durante os testes do sistema, foi estabelecida uma tensão mínima de operação de 8,5 V para o banco de baterias, composto por duas unidades de 7 Ah cada, visando prolongar a vida útil dos acumuladores e evitar descarga profunda. O módulo XH-M609 foi configurado para realizar o gerenciamento automático do carregamento, interrompendo a conexão da carga sempre que a tensão das baterias atingisse esse limite crítico.

Considerando a capacidade total do banco ($2 \times 7 \text{ Ah} = 14 \text{ Ah}$) e uma tensão média de

recarga de 12 V, a energia total armazenada é de aproximadamente 168 Wh. Para as menores potências medidas em ensaio (em torno de 20 W), o tempo de recarga completa das baterias, partindo do nível mínimo estabelecido até a tensão nominal, é estimado entre 8 e 9 horas. Já nos testes realizados sob potência máxima fornecida pelo gerador (135 W), o tempo de recarga foi reduzido para cerca de 1,5 horas, desde que não haja perdas significativas e a eficiência do sistema permaneça elevada.

Destaca-se que, durante a geração de energia, o sistema é capaz de atender simultaneamente às demandas de carga e recarregar o banco de baterias. Em condições em que a turbina não fornece potência suficiente, todo o consumo é suprido automaticamente pelas baterias, graças à lógica de chaveamento do módulo XH-M609. O desempenho do sistema demonstrou-se eficiente e seguro para configurações *off-grid*, garantindo a continuidade do fornecimento e a segurança eletroquímica dos acumuladores.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou o desenvolvimento, implementação e validação experimental de um sistema de geração eólica de pequeno porte, voltado para aplicações *off-grid*. Por meio da utilização da turbina *Savonius* helicoidal acoplada a um gerador de ímã permanente, foi possível avaliar o desempenho aerodinâmico, eletromecânico e energético do conjunto em condições controladas de laboratório, com diferentes regimes de carga e velocidades de vento.

Destaca-se que o gerador utilizado inicia a geração efetiva de energia a partir de ventos de aproximadamente 9 km/h, demonstrando boa sensibilidade e média velocidade de corte para o sistema experimental.

Os resultados obtidos evidenciaram a viabilidade técnica do sistema, comprovando que o protótipo é capaz de iniciar a geração de energia em médias velocidades de vento e fornecer potência suficiente para recarga de baterias e atendimento a pequenas cargas. Destaca-se o comportamento robusto da turbina *Savonius*, que apresentou boa resposta em regimes variáveis, além da atuação eficiente do módulo de controle de carregamento e do conversor CC/CC para preservação das baterias.

O trabalho também evidenciou as limitações impostas pelo regime de carga, pela potência máxima do conversor e pela intensidade do vento incidente, apontando para a importância do correto dimensionamento dos componentes e para o potencial de otimização futura do sistema. Além disso, as análises de qualidade de energia, estabilidade de tensão após a retificação e eficiência dos sistemas de proteção permitiram concluir que a arquitetura desenvolvida atende aos requisitos práticos para aplicações isoladas, garantindo uma excelente autonomia.

Adicionalmente, a experiência com prototipagem, medições e avaliação de desempenho contribuiu diretamente para a compreensão prática dos desafios envolvidos em sistemas de geração alternativa. Observou-se a relevância da integração entre projeto mecânico e eletrônico, o cuidado com a qualidade do armazenamento de energia e o papel fundamental do controle automático para ampliação da vida útil das baterias e continuidade do suprimento energético.

Portanto, pode-se afirmar que o sistema de geração eólica *Savonius* apresentado representa uma alternativa sustentável, eficaz e de baixo custo para um sistema *off-grid* de geração alternativa. Os resultados alcançados validam a proposta como solução acessível para suprir necessidades energéticas em regiões remotas ou não atendidas pela rede convencional.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1059, de 12 de dezembro de 2023**. [S.l.], 2023. Publicada pela ANEEL. Disponível em:

<<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>>.

ALVES, A. L.; MOTTA, Y. B.; ZANCANELLA, A. C. B. Geradores elétricos monofásicos e trifásicos como suporte didático para o ensino de eletromagnetismo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Universidade Federal de Santa Catarina, v. 37, n. 2, p. 879, 2020. Disponível em: <<https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscar.html?task=detalhes&id=W3048809594>>.

Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica). **Boletim Anual de Geração Eólica 2024**. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2024. Relatório técnico anual. Documento institucional da ABEEólica. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2025/05/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-DIGITAL-2025_PT_FINAL.pdf>.

Automaxx Windmill. **Quais são as diferenças entre turbina eólica de eixo horizontal e turbina eólica de eixo vertical**. 2024. Acessado em 13 de dezembro de 2025. Disponível em: <<https://www.automaxxwindmill.com/pt/blogs/turbina-eolica-1/quais-sao-as-diferencas-entre-turbina-eolica-de-eixo-horizontal-e-turbina-eolica-de-eixo-vertical>>.

BRUNELLI, L. C. **Desenvolvimento de controlador para motor brushless no contexto da mobilidade urbana**. Dissertação (Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação)) — Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, outubro 2024. Orientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/7159/5/MONOGRRAFIA_DesenvolvimentoControladorMotor.pdf>.

CNN Brasil. **Energia eólica: o que é, como funciona, tipos, vantagens e desvantagens**. Acessado em 13 de maio de 2025. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/entenda-como-funciona-a-energia-eolica-offshore-que-e-gerada-no-mar/>>.

DAMAK, A.; DRISS, Z.; ABID, M. S. **Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180°**. [S.l.], 2013. v. 52, 136–142 p. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811200688X>>.

Deltha Wind. **Entenda as vantagens e desvantagens da energia eólica offshore e onshore**. 2024. Acessado em 02 de junho de 2025. Disponível em: <<https://delthawind.com/sem-categoria/entenda-as-vantagens-e-desvantagens-da-energia-eolica-offshore-e-onshore/>>.

Eixos. **Os 10 maiores parques eólicos do Brasil**. 2024. Acessado em 15 de abril de 2025. Disponível em: <<https://eixos.com.br/empresas/os-10-maiores-parques-eolicos-do-brasil/>>.

Energes. **Saiba tudo sobre as pás dos aerogeradores**. 2020. Publicado em 05 de outubro de 2020. Disponível em: <<https://energes.com.br/tudo-que-voce-precisa-saber-sobre-as-pas-dos-aerogeradores/>>.

Energy Power. **Bateria Selada Chumbo-Ácida 12V 7Ah EP12-7 – Especificações Técnicas**. 2025. Disponível em:

<https://www.hidrante.com.br/produto/bateria-estacionaria-12v-x-7ah-energy-power-ep12-7/>.

Acesso em: 07/11/2025.

EZUIM. **Circuito de Filtro com Capacitor**. [S.l.], s.d. Apostila técnica sobre filtros em fontes retificadas. Disponível em: <https://www.ezuim.com/pdf/circ_filtro_cap.pdf>.

FGV Energia. **Informe do Setor Elétrico - Janeiro 2025**. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2025. Relatório técnico. Documento institucional da FGV Energia. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/informe_setor_eletrico_-_jan_-_2025_v2.pdf>.

FILHO, N. A. O. et al. Análise computacional e montagem experimental de um rotor darrieus para a geração de energia elétrica, utilizando as redes de água e esgoto. In: **XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (CREEM 2019)**. Ilhéus, BA, Brasil: ABCM, 2019. Disponível em:

<<https://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/23681>>.

G1 - Senai RN. **Projetos de energia eólica offshore avançam e 2025 será ano-chave, diz Senai RN**. 2024. Acessado em 13 de maio de 2025. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/especial-publicitario/senai-rn/noticia/2024/12/26/projetos-de-energia-eolica-offshore-avancam-e-2025-sera-ano-chave-diz-senai-rn.ghtml>>.

Global Wind Energy Council (GWEC). **Global Wind Report 2025**. Bruxelas, Bélgica: [s.n.], 2025. Relatório anual. Documento institucional do GWEC. Disponível em:

<<https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2025%20Reports/Global%20Wind%20Report/GWEC%20Global%20Wind%20Report%202025.pdf>>.

GOLTZ, E. C. **Estudo da máquina elétrica de fluxo axial no entreferro, com duplo rotor e armadura segmentada**. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2021. Orientador: Paulo Roberto Eckert. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/219719>>.

HOGUANE, C. A. M. Estudo da influência do Ângulo das pás na potência e eficiência mecânicas de uma turbina eólica híbrida de eixo vertical do tipo savonius-darrieus. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, UFPR, 2018. Universidade Eduardo Mondlane, Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/56166/37938>>.

Iberdrola. **Como funcionam os parques eólicos offshore**. Acessado em 05 de dezembro de 2025. Disponível em:

<<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>>.

Industria On. **Entenda como funciona um motor brushless**. 2025. Acesso em: 07 jun. 2025. Disponível em: <<https://blog.industriaon.com/entenda-como-funciona-um-motor-brushless/>>.

INSTRUMENTS, T. **LM2904-EP: Enhanced Product, Dual, 26-V, 1.2-MHz Operational Amplifier**. [S.l.], 2004. Document SLOS448, acesso em: 24 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2904-ep.pdf>>.

IXYS/LITTELFUSE. **MDD44-18N1B Standard Rectifier Module**. [S.l.], 2020. Datasheet. Disponível em: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/240/media-3321306.pdf>>.

JUNIOR, C. A. D. R. P. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AEROGERADORES DE EIXO HORIZONTAL E VERTICAL DE PEQUENO PORTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DE VENTO DE CARAÚBAS**. Mossoró, RN: [s.n.], 2015. Acessado em 29 de maio de 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/9fe0be3b-08aa-404b-b876-c323223350c3/content>>.

KOTHE, L. B. **Estudo comparativo experimental e numérico sobre o desempenho de turbinas Savonius helicoidal e de duplo-estágio**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, março 2016. Orientadora: Prof^ª Dr^ª Adriane Prisco Petry. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/141901/000993090.pdf>>.

LAFAY, J.-M. S.; VARGAS, N. S. d.; VARGAS, B. F. d. Caracterização de um aerogerador de pequeno porte em bancada. In: **II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES**. Florianópolis, Brasil: ISES / Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2008. Apresentado no evento científico.

LINARD, F. **Projeto de um gerador com ímãs permanentes e fluxo axial de 50 kW para geração distribuída**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/10224>.

Mantech. **XH-M609 Battery Charging Control Module**. [S.l.], 2024. Datasheet técnico do módulo controlador de carga/descarga de bateria 12V. Disponível em: <<https://www.mantech.co.za/datasheets/products/XH-M609-240709A.pdf>>.

Modal Connection. **Parques Eólicos Offshore: entenda o que são, suas vantagens e desafios**. 2025. Acessado em 18 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://modalconnection.com.br/sustentabilidade/oportunidades-de-logistica-nos-parques-eolicos-offshore/>>.

OLIVEIRA, C. P. d. **Análise do desempenho de uma turbina Savonius helicoidal com torção de 180° empregando simulação numérica**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2014. Orientadora: Adriane Prisco Petry. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/108528/000946384.pdf>>.

Oy Windside Production Ltd. **Windside Vertical Axis Wind Turbines**. 2025. Acessado em 13 de dezembro de 2025. Disponível em: <<https://windside.com/>>.

RESOLUÇÃO Normativa nº 1071, de 28 de março de 2023. [S.l.], 2023. Publicada pela ANEEL. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231071.html>>.

SCHMIT, R. **Desenvolvimento de uma turbina eólica de eixo vertical tipo H**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias Renováveis) — Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2015.

SOUZA, J. C. de. **Revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento do setor eólico no Brasil**. Lorena, SP: [s.n.], 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo. Orientador: Prof. Antonio Carlos da Silva. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2018/MEQ18039.pdf>>.

SOUZA, T. H. d. Estudo numérico e experimental de turbinas eólicas de eixo vertical tipo savonius. In: . Itajubá, Brasil: [s.n.], 2020. Orientador: José Carlos de Oliveira Matos. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2176/1/Disserta%20c3%a7%20c3%a3o_2020070.pdf>.

SUNERGIA. **Qual a diferença entre os sistemas On-Grid e Off-Grid?** 2024. Acessado em 04 junho de 2025. Disponível em: <<https://sunergia.com.br/blog/qual-a-diferenca-entre-os-sistemas-on-grid-e-off-grid/>>.

TECNOBITS. **how to simulate in Proteus**. 2025. Acesso em: 24 jun. 2025. Disponível em: <<https://tecnobits.com/en/Proteus/>>.

Texas Instruments. **LM2596 Simple Switcher Step-Down Voltage Regulator**. [S.l.], 2016. Datasheet oficial, código SNVS124J. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>>.

Texas. Instruments. **LM111, LM211, LM311 Differential Comparators Datasheet**. [S.l.], 2017. Document SLCS007K. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm211.pdf>>.

TRINDADE, R. H. **Estudo de Máquinas Elétricas Não-Convencionais: Motor Brushless DC**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Acesso em: 07 jun. 2025. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/fdfbadba-536b-4fee-80f6-dd3443a670ae/Trindade_Rafael_Henrique.pdf>.

Windbox. **Componentes dos aerogeradores**. 2020. Acessado em 13 de dezembro de 2025. Disponível em: <<https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>>.

Windside. **Turbina eólica de pequeno porte de eixo vertical WS-4 RANGE com rotor Savonius helicoidal**. 2025. Acesso em: 07 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.archiexpo.com/pt/prod/windside/product-88530-959470.html>>.

WISER, R.; OUTROS. **Expert elicitation survey predicts 37**[S.l.], 2021. **Relatório técnico do LBNL**. Disponível em: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/wind_lcoe_elicitation_ne_pre-print_april2021.pdf>.