



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Sullivan Graebin

**Construção de um Aerogerador Experimental para Aplicações Práticas e
Didáticas em Energias Renováveis**

Araranguá
2024

Sullivan Graebin

Construção de um Aerogerador Experimental para Aplicações Práticas e Didáticas em Energias Renováveis

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia

Orientador: Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.

Araranguá

2024

Graebin, Sullivan

Construção de um Aerogerador Experimental para Aplicações Práticas e Didáticas em Energias Renováveis / Sullivan Graebin ; orientadora, Luciano Lopes Pfitscher, 2024.

95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Energia Eólica. 3. Aerogeradores. 4. Energias Renováveis. I. Pfitscher, Luciano Lopes. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Sullivan Graebin

Construção de um Aerogerador Experimental para Aplicações Práticas e Didáticas em Energias Renováveis

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Carla de Abreu D'Aquino, Dr^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maicon Coelho Evaldt, Dr.
Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho, que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Energia.



Documento assinado digitalmente

Carla de Abreu Daquino

Data: 16/12/2024 11:17:49-0300

CPF: ***.586.819-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Carla de Abreu D'Aquino, Dr^a
Coordenadora do Curso



Documento assinado digitalmente

Luciano Lopes Pfitscher

Data: 16/12/2024 07:40:23-0300

CPF: ***.239.050-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.
Orientador



Documento assinado digitalmente

Sullivan Graebin

Data: 16/12/2024 07:50:42-0300

CPF: ***.712.319-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Sullivan
Graebin Autor

Araranguá, 06 de dezembro de 2024

Dedico este trabalho em nome do meu pai, Armin Graebin, como história e honra a sua existência com a construção da “AG Fênix”, o aerogerador experimental. Dedico a mim de nunca ter desistido do projeto e a todos que participaram do projeto *Plus Energy*, criado com muito esforço e superação que leva o lema: Mais que um propósito

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus ao conceder saúde para viver e construir experiências, pela minha família e amigos que me apoiam nos momentos delicados. Ao Alef Júlio Schaefer Cerutti, que esteve ao meu lado em todas as superações, dificuldades, frustrações e emoções dessa jornada. Ao meu orientador, que conheço há muito tempo e sempre apoiou nossas 'loucuras' acadêmicas. À Profa. Carla de Abreu D'Aquino que nos ajudou com os recursos para que o projeto pudesse ser construído. A Maria Eduarda Goss que sempre apoiou minhas ideias e a todos que conheci ao longo do caminho e que agregaram coisas marcantes à minha vida.

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias e a implementação de melhorias no setor energético refletem a necessidade de se utilizar fontes renováveis para suprir a demanda crescente de energia, de forma sustentável. Nesse contexto, o projeto de construção de um aerogerador experimental na Universidade Federal de Santa Catarina se apresenta como uma iniciativa para fomentar pesquisas em energias renováveis. O projeto abrange não apenas a geração de energia, mas também os aspectos de armazenamento, distribuição e consumo, oferecendo uma abordagem completa e prática para o estudo dessas tecnologias. A instalação do aerogerador se viabilizou com base em dados amostrais de vento coletados por uma estação LIDAR, que identificaram um cenário favorável para a captação de energia eólica em pequena escala. O desenvolvimento do projeto incluiu a aplicação de testes empíricos e simulações teóricas, explorando princípios de engenharia eólica, controle de sistemas e programação. O aerogerador passou por diversas adaptações e melhorias, refletindo o processo contínuo de aprimoramento característico do setor eólico, com o objetivo de aproximar a planta de potência para as qualificações operacionais exigidas na geração de energia. O aerogerador apresenta sistemas de controle que garantem estabilidade e segurança, mesmo em condições climáticas adversas, além de oferecer resistência à torção e ao arrasto, características essenciais para a integridade estrutural. A resposta rápida a comandos de segurança exemplifica a robustez do sistema, que continua sendo ajustado para se adaptar a diferentes cenários de condições de vento. A construção do projeto permitiu o aprendizado e conhecimentos dos acadêmicos participantes nas áreas de engenharia aplicadas, além da inserção na pesquisa e extensão, preparando estes para projetos práticos no mercado de trabalho. Os avanços posicionam o aerogerador como uma referência para futuros projetos de energias renováveis na Universidade, inspirando novas iniciativas semelhantes no Campus.

Palavras-chave: energia eólica; energias renováveis; aerogeradores.

ABSTRACT

The development of new technologies and the implementation of improvements in the energy sector reflect the need to use renewable sources to meet the growing demand in a sustainable manner. In this context, the project to build an experimental wind turbine at the Federal University of Santa Catarina is presented as an initiative to promote research in renewable energy. The project covers not only energy generation, but also aspects of storage, distribution, and consumption, offering a comprehensive and practical approach to the study of these technologies. The installation of the wind turbine was made possible based on sample wind data collected by a LIDAR station, which identified a favorable scenario for small-scale wind energy capture. The development of the project included the application of empirical tests and theoretical simulations, exploring principles of wind engineering, system control, and programming. The wind turbine has undergone several adaptations and improvements, reflecting the continuous improvement process characteristic of the wind sector, with the aim of bringing the power plant closer to the operational qualifications required for power generation. The wind turbine features control systems that ensure stability and safety, even in adverse weather conditions, in addition to offering resistance to torsion and drag, characteristics essential for structural integrity. The rapid response to safety commands exemplifies the robustness of the system, which continues to be adjusted to adapt to different wind condition scenarios. The project's construction enhanced the learning and knowledge of participating students in applied engineering, preparing them for practical projects. The advances position the wind turbine as a reference for future renewable energy projects at the University, inspiring new similar initiatives on Campus.

Keywords: wind energy; renewable energy; wind turbines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representatividade da energia eólica em 2024 no Brasil	16
Figura 2 – Capacidade instalada nos últimos anos	18
Figura 3 – Primeiros projetos da energia eólica no Brasil	22
Figura 4 – Volume de controle de uma turbina eólica	26
Figura 5 – Coeficiente de potência em função do TSR	27
Figura 6 – Aerogerador comercial de eixo horizontal	28
Figura 7 – Aerogeradores de eixo vertical.....	29
Figura 8 – Principais partes e componentes de uma turbina eólica	30
Figura 9 – Fundação de laje de sapata superficial	31
Figura 10 – Torre de concreto	32
Figura 11 – Nacele de aerogerador de eixo horizontal.....	33
Figura 12 – Cubo de eixo horizontal.....	34
Figura 13 – Perfil de uma pá comercial	35
Figura 14 – Divisões longitudinais da pá	36
Figura 15 – Composição estrutural da pá	37
Figura 16 – Esquema de um aerogerador de velocidade fixa.	38
Figura 17 – Estágios de operação.....	39
Figura 18 – Esquema de gerador de ímã permanente	41
Figura 19 – Esquema de gerador de rotor excitado	42
Figura 20 – Esquema de gerador de gaiola de esquilo	42
Figura 21 – Esquema de gerador de dupla indução.....	43
Figura 22 – Esquema de geração com retificador, <i>Boost</i> e inversor	44
Figura 23 – Esquema de geração com retificador e inversor	44
Figura 24 – Sistema de <i>pitch</i>	47
Figura 25 – Sistema de <i>yaw</i>	48
Figura 26 – Instrumentação meteorológica	49
Figura 27 – Anemômetros sônicos.....	50
Figura 28 – Torre de prospecção meteorológica.....	51
Figura 29 – Predominância dos ventos	54
Figura 30 – Local da implantação do projeto	55
Figura 31 – Torre meteorológica	56
Figura 32 – Torre de concreto utilizada.....	57

Figura 33 – Perfuração de solo	57
Figura 34 – Quadro de comando.....	58
Figura 35 – Gerador trifásico síncrono de ímãs permanentes.....	59
Figura 36 – Caixa Multiplicadora (<i>Gearbox</i>).....	60
Figura 37 – Peças do sistema primário de multiplicação	61
Figura 38 – Montagem do sistema primário de multiplicação.....	61
Figura 39 – Aerofólio utilizado nas pás	62
Figura 40 – Estrutura das pás	63
Figura 41 – Pás revestidas com chapa de alumínio.....	64
Figura 42 – Sistema de direcionamento da nacele (<i>yaw</i>).....	68
Figura 43 – Sistema de ajuste de ângulo de pá (<i>pitch</i>)	68
Figura 44 – Estação meteorológica do aerogerador	69
Figura 45 – IHM do sistema supervisório	70
Figura 46 – Principais melhorias implementadas no aerogerador.....	73
Figura 47 – Aerogerador experimental.....	74
Figura 49 – Frequências de ventos em baixas velocidades	87
Figura 50 – Turbina de quatro pás	88
Figura 51 – Instalação da turbina eólica.....	88
Figura 52 - Primeira versão da torre experimental	89
Figura 53 – Danos estruturais na primeira versão do projeto.....	90
Figura 54 – Nacele com o sistema eletromecânico e de controle montados	91
Figura 55 – Eletrônica de potência do sistema de controle.....	92
Figura 56 – Nacele em campo para ajustes finais.....	92
Figura 57 – Instalação da nacele	93
Figura 58 – Pás do aerogerador.....	93
Figura 59 – Instalação das pás	94
Figura 60 – Testes do sistema de controle	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação TSR para número de pás	27
Tabela 2 – Dados do fabricante do gerador	59
Tabela 3 – Dados da caixa multiplicadora.....	60
Tabela 4 – Dados aerodinâmicos das pás	62
Tabela 5 – Dados de potência real de geração estimada	65
Tabela 7 – Potência teórica estimada extraída do vento.....	86
Tabela 8 – Parâmetros de dados de vento	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultados Gerais	75
------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias
AGW - Aerogerador WEG
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
CA - Corrente Alternada
CC - Corrente Contínua
CELESC - Centrais Elétricas de Santa Catarina
CLP - Controlador Lógico Programável
DFIG - *Double fed induction generator*
DNP3 - *Distributed Network Protocol 3*
IEC - *International Electrotechnical Commission*
IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
 I_{fm} - Coeficiente de fator de multiplicação
IHM - Interface humano-máquina
LIDAR - *Light Detection and Ranging*
NACA - *National Advisory Committee for Aeronautics*
OPC - *Open Platform Communication*
P&D - Planejamento e Desenvolvimento
PI - Proporcional Integrador
PLL - *Phase Locked Loop*
PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PWM - *Pulse Width Modulation*
ROI - *Return on Investment*
RPM - Rotações por minuto
SC - Santa Catarina
SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*
TCC - Trabalho de Conclusão de Curso
TSR - Tip-Speed Ratio
MPPT - *Maximum Power Point Tracking*
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

- A Área varrida pelas pás da turbina eólica (m^2)
- A1 Área de entrada (m^2)
- A2 Área de Saída (m^2)
- C_p Coeficiente de Potência (%)
- g Aceleração da gravidade (m/s^2)
- η Rendimento global (%)
- η_g Rendimento do gerador (%)
- η_{cx} Rendimento de caixa multiplicadora (*gearbox*) (%)
- η_{tcp} Rendimento da transmissão coroa-pinhão (transmissão primária) (%)
- η_r Rendimento do rotor (%)
- η_y Rendimento do *yaw* (%)
- P Potência (W)
- P_D Potência eólica disponível (W)
- P_R Potência eólica real (W)
- p_0 Pressão atmosférica ao nível do mar (kPa)
- R Constante específica do ar (J/K mol)
- ρ Densidade do ar na pressão local (kg/m^3)
- T Temperatura do ar (K)
- V1 Velocidade do vento na entrada (m/s)
- V2 Velocidade do vento na saída (m/s)
- v Velocidade do vento (m/s)
- z Altura (m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	21
2.1 CONCEPÇÃO HISTÓRICA DOS AEROGERADORES	21
2.2 RECURSO EÓLICO	24
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES EÓLICOS	28
2.4 ESTRUTURA DE UM AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL	29
2.4.1 Fundação	30
2.4.2 Torre	31
2.4.3 Nacele	32
2.4.4 Rotor / Turbina	33
2.5 FUNCIONAMENTO DE UM AEROGERADOR	37
2.5.1 Sistema de Geração	37
2.5.1.1 Tipos de Geradores	40
2.5.2 Conversores para Geradores Síncronos	43
2.5.3 Conexão à rede	45
2.5.4 Sistema de <i>Pitch</i>	47
2.5.5 Sistema de <i>Yaw</i>	48
2.6 SISTEMA DE MONITORAMENTO METEOROLÓGICO	48
2.7 SISTEMA DE MONITORAMENTO OPERACIONAL	51
3 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E RESULTADOS – PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AEROGERADOR EXPERIMENTAL	54
3.1 POTENCIAL EÓLICO LOCAL	54
3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VENTO	55
3.3 TORRE ÉOLICA E SISTEMA DE GERAÇÃO	56
3.3.1 Torre, Fundação e Quadro de Comando	57
3.3.2 Gerador e Caixa Multiplicadora (<i>Gearbox</i>)	58
3.3.3 Sistema Primário de Multiplicação	60
3.3.4 Pás	62
3.3.5 Eficiência Teórica do Sistema Eletromecânico	64

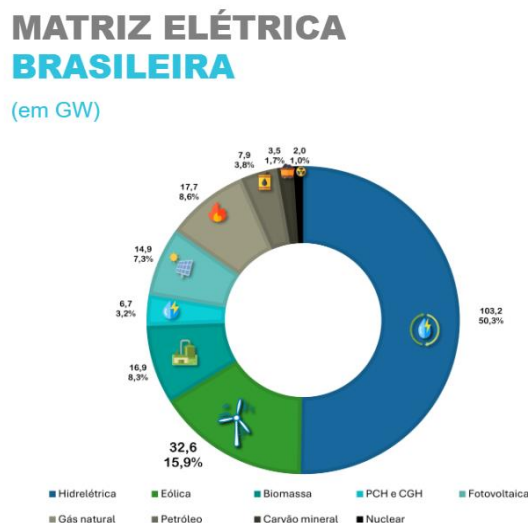
3.4 SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE	66
3.4.1 Sistema de <i>Yaw</i>	66
3.4.2 Sistema de <i>Pitch</i>	68
3.4.3 Medições de vento	69
3.4.4 Sistema Supervisório.....	70
3.5 PRINCIPAIS RESULTADOS DO PROJETO E DISCUSSÃO	71
4 CONCLUSÃO	77
4.1 CONTINUIDADE DO PROJETO.....	78
4.2 PUBLICAÇÃO	78
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A – ESTUDO DE VENTO NA REGIÃO DO PROJETO	86
APÊNDICE B – PRIMEIRA VERSÃO DO PROJETO	88
APÊNDICE C – MONTAGEM DO AEROGERADOR ATUAL.....	91

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica teve sua utilização primária em atividades agrícolas, como no bombeamento de água e moagem de grãos. Desde os primeiros registros no Norte e Centro da Europa, a humanidade começou a aproveitar a energia cinética dos ventos, transformando está em energia mecânica para processar materiais. O advento da introdução dos geradores de indução eletromagnética possibilitou a conversão da energia mecânica em eletricidade.

A energia eólica ocupa uma posição de destaque no cenário global de geração de energia e, no Brasil, essa fonte renovável tem se consolidado como uma das mais importantes do país. De acordo com dados da ABEEólica, a capacidade instalada no Brasil em 2023 ultrapassou os 30 GW, para consolidar o país entre os maiores produtores de energia eólica do mundo, ocupando atualmente a 6ª posição global. Esse crescimento é resultado de investimentos contínuos em novas tecnologias e no aumento da eficiência dos aerogeradores, pelo aperfeiçoamento dos sistemas de controle, sistemas de desacoplamento elétrico e otimização de componentes aerodinâmicos. No Brasil a energia dos ventos supera 15% da matriz elétrica brasileira, sendo uma fonte fundamental para a diversificação energética e a redução de emissões de carbono, conforme percentual de participação nacional mostrado na Figura 1 (ABEEólica, 2023).

Figura 1 – Representatividade da energia eólica em 2024 no Brasil



Fonte: ABEEólica (2024)

O aumento na participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira passou de menos de 5% (5 GW) em 2014 para mais de 15% em 2023 (30 GW). Esse crescimento foi impulsionado por vários fatores, como: a realização de leilões de energia, que garantiram contratos de longo prazo para novos projetos eólicos; a abundância de ventos constantes e de alta velocidade; e avanços tecnológicos que melhoraram a eficiência das turbinas e reduziram os custos de implantação (ABEEólica, 2014-2023).

No contexto global, a expansão do setor eólico no Brasil acompanhou a tendência mundial de aumento na capacidade instalada de energia renovável. Contudo, Brasil tem a necessidade de melhorar a infraestrutura de transmissão e a integração desse setor com outras fontes de energia. As perspectivas para a energia eólica no Brasil são otimistas, com a previsão de novos projetos e investimentos em tecnologias como a eólica *offshore* no mar. O mercado de turbinas *offshore* está em ascensão, com planos de expansão para áreas costeiras que apresentam elevado potencial de geração no Brasil (ABEEólica, 2014-2023). A meta para o mercado eólico nacional é alcançar 55 GW de potência instalada no início da próxima década, fomentadas pelas metas globais do COP28 de triplicar as energias renováveis até 2030. O Brasil, com seu potencial eólico costeiro de 748 GW para fundações flutuantes e 480 GW para fundações fixas, tem um papel fundamental no desenvolvimento sustentável, colocando o país como líder no segmento caso ocorra desenvolvimento estratégico no setor (Santos, 2024; Mello, 2024).

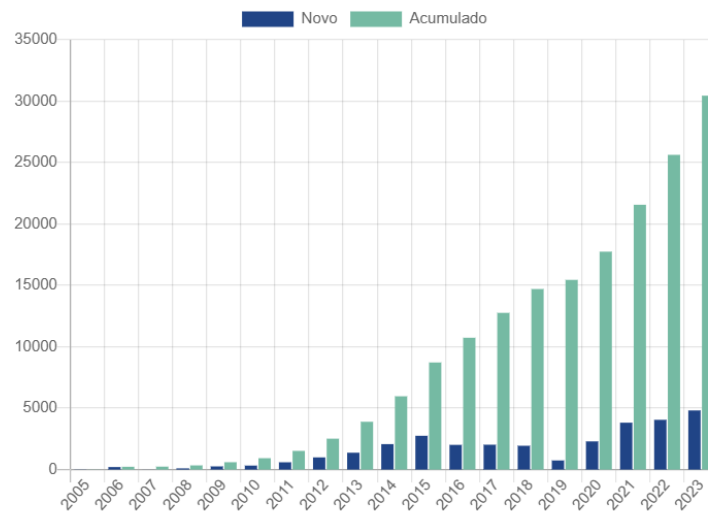
O Decreto nº10.946/2022 é o precursor das diretrizes iniciais para projetos no segmento eólico offshore. Em 2024 existe a expectativa de regulamentação da eólicas no mar pelo marco regulatório que tramita pelo Senado, após uma passagem empecilha na Câmara dos Deputados, ao incentivar fontes fósseis. Mesmo com o empecilho, vale salientar que a EPE em 2020 estudou o potencial eólico na costa do país com a publicação do *Road Map Eólica Offshore – Perspectiva e caminhos para a energia eólica marítima*, que descrevem ventos com velocidade acima de 7 m/s em 100 metros de altura, que potencializam o início de projetos a partir da metade da atual década (Mello, 2024; Godoi, 2022).

Em 2024, o Brasil conta com 1079 parque eólicos operacionais - a maioria localizada no Nordeste, onde os ventos constantes e de alta velocidade são ideais para a produção de energia. As perspectivas para os próximos anos são de crescimento acelerado, com novos projetos e leilões já programados para expandir a

capacidade instalada e integrar fortemente a energia eólica na matriz energética nacional. A evolução da capacidade instalada nos últimos anos no Brasil está ilustrada na Figura 2 (ABEEólica, 2024).

Figura 2 – Capacidade instalada nos últimos anos

**EVOLUÇÃO DA
CAPACIDADE INSTALADA**
(em MW)



Fonte: ABEEólica (2024)

A engenharia da energia eólica, com sua complexidade de construção e operação, exige um profundo entendimento dos componentes que constituem um aerogerador, incluindo as funcionalidades e os sistemas de controle que regulam seu funcionamento. Esses elementos são essenciais para o desenvolvimento de turbinas eólicas eficientes e confiáveis. Nesse sentido, a construção de um aerogerador experimental em um ambiente acadêmico é uma abordagem que permite aplicar na prática conhecimentos teóricos, e proporcionar aos estudantes a oportunidade de aprofundar sua compreensão sobre os princípios da geração eólica, o controle de operação de aerogeradores e a conversão de energia.

Este trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de um aerogerador, utilizando fundamentos teóricos e práticos da literatura, com aplicação experimental no meio acadêmico. O projeto pode ser considerado uma extensão de um laboratório acadêmico, para fins de estudos e pesquisas sobre geração de energia eólica, mecanismos de controle e a engenharia envolvida, integrando conhecimentos das áreas de mecânica, elétrica, eletrônica e computação.

O avanço da tecnologia de geração eólica e a contínua evolução das máquinas foram a principal motivação para a escolha do tema e o desenvolvimento deste projeto experimental. Em decorrência de sua implementação, foi criado um grupo de trabalho permanente ligado ao Curso de Graduação de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), denominado *Plus Energy*.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto baseou-se na revisão da literatura, simulações e ensaios durante a construção dos mecanismos do sistema de geração. Os testes e experimentos permitiram validar avanços realizados no protótipo, identificando falhas operacionais e promovendo melhorias.

1.1 OBJETIVOS

A seguir, são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o projeto e a construção de um aerogerador experimental para uso no curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) projetar e construir mecanismos de um aerogerador, tendo como base sistemas reais, como o perfil de pás, o controle de direcionamento (*yaw*) e o controle do ângulo de ataque das pás (*pitch*), entre outros;
- b) proporcionar uma aplicação que permita o entendimento dos princípios de geração e operação de turbinas eólicas, aproximando os estudantes de engenharia do tema das energias renováveis e da tecnologia eólica, e ampliando o entendimento dos acadêmicos quanto à sua aplicabilidade e relevância para a sociedade;
- c) construir uma estrutura que sirva de base, como um laboratório experimental, para atividades de ensino, pesquisa e extensão.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em quatro capítulos, incluindo este introdutório. Os demais capítulos abrangem os seguintes tópicos:

Capítulo 2 – Desenvolvimento Teórico

- Aborda a evolução dos aerogeradores ao longo do tempo e a relevância do vento como fonte de energia renovável;
- Apresenta os diferentes tipos de turbinas eólicas e seu princípio de funcionamento, com ênfase em turbinas eólicas de eixo horizontal;
- Apresenta os tipos de geradores e conversores utilizados em sistemas eólicos e o processo de conversão da energia cinética do vento em energia elétrica;
- Detalha os procedimentos de partida e parada dos aerogeradores, e descreve os sistemas de controle essenciais para uma operação segura e eficiente;
- Descreve os instrumentos de monitoramento das condições climáticas, como anemômetros e birutas, essenciais para os sistemas de *pitch* e *yaw*, e apresenta o papel do sistema supervisor de controle.

Capítulo 3 – Desenvolvimento Prático e Resultados

- Apresenta a avaliação do potencial eólico na região de instalação do projeto e considerações a respeito das características construtivas do aerogerador;
- Apresenta os aspectos construtivos do aerogerador construído, para o aproveitamento de ventos de baixa velocidade.
- Avalia os desafios e as soluções de engenharia adotadas no projeto.

Capítulo 4 – Conclusão

- Discute os dados obtidos com a construção do aerogerador, nos pontos de vista técnicos e operacionais;
- Discute as limitações encontradas e apresenta propostas de melhorias.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A conversão da energia cinética dos ventos (energia eólica) em eletricidade envolve o uso de turbinas eólicas. As turbinas são equipadas com pás conectadas a um eixo rotor, que ao girar transfere energia mecânica para um gerador. O gerador converte a energia mecânica em energia elétrica por meio de um processo de conversão eletromecânica, no qual o movimento das pás é transferido para o eixo rotor do gerador. A rotação cria um campo magnético variável, que induz tensão elétrica nas bobinas do estator do gerador (Wenzel, 2007).

A eletricidade gerada pelas turbinas é integrada à rede elétrica para transmissão e distribuição. O uso de fontes renováveis como a energia eólica ajuda a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões de gases de efeito estufa, e é essencial para as estratégias de mitigação das mudanças climáticas (Santos; Araújo, 2023).

2.1 CONCEPÇÃO HISTÓRICA DOS AEROGERADORES

Os aerogeradores eólicos tiveram o início de seu desenvolvimento comercial na Dinamarca, a partir de 1980, com a fabricação das primeiras torres eólicas semelhantes aos modelos atuais, fabricadas por empresas que atuavam na produção de equipamentos agrícolas (G.M., 2005).

Entre as décadas de 1980 a 2000, as turbinas eólicas passaram por transformações significativas em sua concepção e implementação, com um notável crescimento durante a década de 1990, quando o uso da tecnologia eólica expandiu globalmente (Martins; Guarnieri; Pereira, 2007).

No Brasil, os primeiros estudos para aplicação da energia eólica começaram em 1976, conduzidos pelo Centro Técnico Aeroespacial, que desenvolveu um protótipo de pequeno porte, com potência instalada de 2 kW. A primeira aplicação comercial dessa tecnologia no país ocorreu em 1992, com a instalação de um aerogerador em Fernando de Noronha (RN). Consistia em uma estrutura metálica treliçada de 23 metros de altura, com um gerador assíncrono de 75 kW e pás com 17 metros de diâmetro (Figura 3a). O sistema atendia 10% da demanda energética do arquipélago (ANEEL, 2005).

O parque eólico Morro do Camelinho, em Gouveia, Minas Gerais, é considerado o primeiro parque eólico conectado à rede elétrica no Brasil (Figura 3b). Seu comissionamento ocorreu em 1994, com quatro aerogeradores de 250 kW. As torres foram construídas em metal, com aproximadamente 30 metros de altura e com uma turbina de 29 metros de diâmetro (CEMIG, 2021).

Figura 3 – Primeiros projetos da energia eólica no Brasil



A - primeiro aerogerador



B - primeiro parque eólico

Fonte: adaptado de Santos; Araújo (2023)

A implantação de 1 MW de potência instalada na primeira fazenda de turbinas eólicas resultou na criação de empregos e na introdução de uma fonte de energia renovável, com custos viáveis de operação, manutenção e geração de energia. O empreendimento também possibilitou a viabilidade econômica do custo por kWh gerado (CEMIG, 2021).

A evolução histórica da energia eólica contribuiu na diversificação da matriz energética, tanto global quanto nacional, fomentada pela transição energética para fontes renováveis. O Brasil, com seu vasto potencial eólico, aliado a programas de incentivo iniciais, como o PROINFA, teve uma expansão exponencial desse setor nas últimas duas décadas (CEMIG, 2021).

O primeiro aerogerador nacional (70% da tecnologia nacional e 30% estrangeira) foi instalado na cidade de Capivari de Baixo (Santa Catarina), e teve o objetivo de desenvolver a tecnologia e a cadeia produtiva para a fabricação e implantação de equipamentos de grande porte no país. O projeto foi resultado de um *P&D* entre a empresa brasileira WEG S.A. (fabricante) e a empresa francesa ENGIE Brasil Energia (cliente), em parceria com a ANELL. O projeto do aerogerador teve sua fabricação e implantação pela WEG e recursos de projetos de *P&D* das centrais

elétricas da CELESC. O aerogerador nacional possui 4,2 MW de potência instalada, conta com acoplamento direto com o gerador síncrono de ímã permanentes e conversores de potência plena, em uma torre eólica de 120 metros de altura com turbina de 147 metros de diâmetro (WEG, 2021).

As turbinas modernas podem atingir alturas superiores a 240 metros, com turbinas que podem chegar a 150 metros de diâmetro, enquanto nos antigos aerogeradores não ultrapassavam 100 metros de altura e 40 metros de diâmetro de turbina (WindCycle, 2022).

A capacidade de geração das turbinas modernas pode chegar à faixa de 14 MW de potência instalada para cada máquina implantada, enquanto no passado a faixa variava entre 50 kW e 2 MW. Esse aumento é resultado de melhorias na engenharia, na eficiência do *design* e na tecnologia. As turbinas modernas utilizam materiais avançados, como fibra de vidro e carbono, que proporcionam maior resistência e menor peso. Em comparação, as turbinas mais antigas eram fabricadas com madeira e metais pesados, limitando sua eficiência e durabilidade. Além disso, as turbinas antigas dependiam de controles manuais ou sistemas mecânicos rígidos, que restringiam sua eficiência em diferentes condições de vento (GWEC, 2024).

Outro ponto em que houve significativa evolução é na conexão à rede elétrica. Atualmente, utilizam-se dispositivos de eletrônica de potência sofisticados, que permitem uma integração eficiente com sistemas de armazenamento de energia, como baterias, para mitigar a intermitência da geração eólica e melhorar a confiabilidade (GWEC, 2024).

Em 2024, a energia eólica tem posição vital no mercado de energia. A capacidade instalada de energia eólica globalmente ultrapassou 900 GW, com um crescimento contínuo em novos projetos, especialmente na Ásia e na Europa. Estima-se um grande aumento desse potencial com os parques eólicos *offshore*, que exploram ventos mais potentes em alto mar (GWEC, 2024).

O Brasil desempenha um papel fundamental no cenário global da energia eólica. O país adicionou 4,8 GW de nova capacidade eólica em 2023, posicionando-se como o terceiro maior mercado em termos de novas instalações. O crescimento contribuiu para um aumento de 21% na capacidade instalada na América Latina, consolidando o Brasil como o líder regional no setor eólico. Para que o país continue a ser competitivo e contribua com a meta global de triplicar a capacidade eólica instalada até 2030, é necessário enfrentar desafios regulatórios, fortalecer a

infraestrutura de transmissão e acelerar o desenvolvimento de projetos *offshore* (GWEC, 2024).

2.2 RECURSO EÓLICO

O vento acontece pelo movimento das massas de ar, e é influenciado pela temperatura, umidade e pressão atmosférica. As diferenças de pressão que geram o gradiente que origina o vento são formadas pelo aquecimento desproporcional da superfície terrestre e do ar atmosférico, pela radiação solar. A interação entre pressão, temperatura e radiação solar influencia diretamente na formação do vento, responsável pelas condições meteorológicas e climáticas globais (Martins; Guarnieri; Pereira, 2008).

A energia cinética presente no vento (movimentação da massa de ar) pode ser convertida em energia mecânica, pelo movimento rotativo das pás de um rotor, e, posteriormente, ser convertida em energia elétrica por um gerador. A potência disponível no vento está expressa na Equação 1:

$$P_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

onde:

P_D : potência disponível do vento (W);

ρ : densidade do ar na pressão local (kg/m^3);

A : área varrida pelas pás da turbina (m^2);

v : velocidade do vento (m/s).

A densidade do ar pode ser estimada em função da pressão atmosférica, a partir da equação do gás ideal (Equação 2).

$$\rho(z) = \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot e^{-\frac{g \cdot z}{R \cdot T}} \quad (2)$$

onde:

$\rho(z)$: densidade do ar na pressão local (kg/m^3);

p_0 : pressão atmosférica ao nível do mar (kPa);

R: constante específica do ar (J/K mol);

T: temperatura do ar (K);

g: aceleração da gravidade (m/s^2);

z: altura (m).

A potência eólica é proporcional à área varrida pelas pás da turbina, e ao cubo da velocidade do vento. No entanto, segundo o limite teórico estabelecido pelo princípio de Betz, apenas 59,3% da potência contida no vento pode ser convertida em energia mecânica no rotor (Betz, 1982 *apud* Martins; Guarnieri; Pereira, 2008).

Devido às perdas mecânicas no processo de captação da energia cinética, resultantes de fatores como a geometria das pás e o desempenho aerodinâmico (Gasch; Twele, 2002 *apud* Martins; Guarnieri; Pereira, 2008), o potencial teórico de geração de energia real é calculado pela Equação 3.

$$P_R = \frac{1}{2} * C_p * \eta * A * \rho * v^3 \quad (3)$$

onde:

P_R : potência real do vento (W);

C_p : capacidade de potência aerodinâmica do rotor;

η : rendimento eletromecânico;

ρ : densidade do ar na pressão local (kg/m^3);

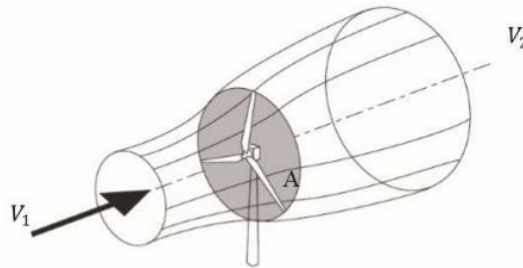
A: área varrida pelas pás do aerogerador (m^2);

v : velocidade do vento (m/s).

A Equação 3 descreve o potencial eólico como o produto da energia cinética disponível no vento pelo coeficiente de potência aerodinâmica do rotor (C_p) e o rendimento de conversão eletromecânica do gerador (η). O coeficiente de potência

aerodinâmica do rotor pode ser explicado pelo volume de controle da turbina, conforme Figura 4.

Figura 4 – Volume de controle de uma turbina eólica



Fonte: Burton *et al.* (2001)

Na Figura 4, a velocidade do vento que incide na área varrida pelas pás é representada por V_1 , com uma área correspondente à turbina designada como A_1 . A velocidade do vento na saída, representada por V_2 , é menor e está associada a uma área circular de escoamento dos vórtices, definida como A_2 (Burton *et al.*, 2001). A redução na velocidade demonstra o comportamento do vento ao passar pelas pás, conforme a Equação 4.

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2 \quad (4)$$

Para obter um aproveitamento cinético de 100%, a área das pás deveria cobrir totalmente a área varrida pelo vento. Contudo, a ausência da força de arrasto impediria a rotação do rotor e, conseqüentemente, a geração de energia (Burton *et al.*, 2001).

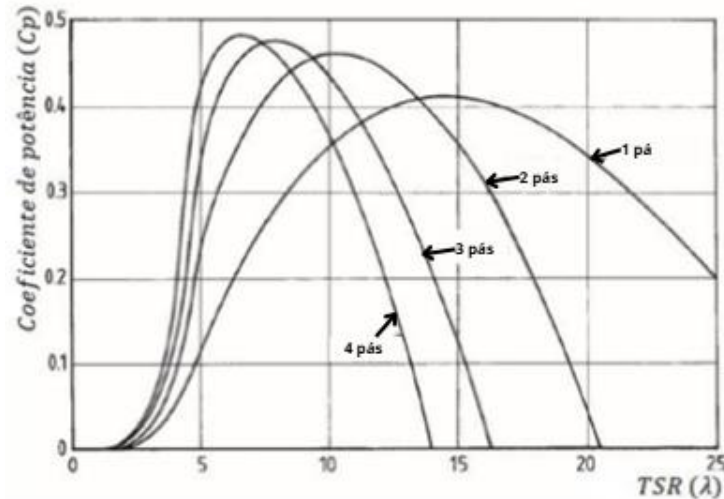
O coeficiente de potência aerodinâmico do rotor tem definição dada pela razão do potencial real obtido (Equação 3) pelo potencial máximo disponível (Equação 1), conforme Equação 5.

$$C_p = \frac{P_R}{P_D} \quad (5)$$

A Figura 5 ilustra o comportamento característico do coeficiente de potência aerodinâmico do rotor (C_p) com base no número de pás e na taxa de velocidade na

ponta da pá, *TSR* (Burton *et al.*, 2001). O parâmetro *TSR* (*tip speed ratio*) é definido como a razão entre a velocidade rotacional da ponta da pá e a velocidade real do vento. Comercialmente, os valores do coeficiente de potência estão entre 35% a 45%.

Figura 5 – Coeficiente de potência em função do *TSR*



Fonte: Adaptado de Moraes (2018)

A quantidade de pás de uma turbina eólica está associada ao coeficiente de velocidade na ponta da pá (*TSR*) e ao coeficiente de potência. Com *TSR* igual a 1, a velocidade da ponta da pá se aproxima da velocidade do vento, o que requer mais pás para otimizar a eficiência na conversão de energia. Para *TSR* superiores a 6, menos pás são necessárias, conforme Tabela 1, considerando que a extração eficiente da energia do vento ocorre com menor arrasto e maior eficiência aerodinâmica (Marques, 2004).

Tabela 1 - Relação *TSR* para número de pás

TSR	Número de pás
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 8	2 - 3
8 - 15	1 - 2

Fonte: Wenzel (2007)

À medida que a velocidade da ponta da pá aumenta, a rotação do rotor cresce e a quantidade de pás tende a diminuir, uma relação inversamente proporcional que otimiza custos e eficiência (Marques, 2004).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES EÓLICOS

A classificação básica dos aerogeradores eólicos envolve aspectos técnicos, que incluem:

- Orientação do eixo de rotação: horizontal ou vertical em relação à direção do vento;
- Forças aerodinâmicas predominantes: arrasto ou sustentação;
- Solidez do rotor: definida pela relação entre a área de material sólido e a área varrida (Silva, 2013).

Nos aerogeradores de eixo horizontal (Figura 6), o eixo rotacional é paralelo à direção do vento. As pás são projetadas para maximizar a sustentação ao manter uma baixa solidez, resistindo a velocidades tangenciais elevadas na extremidade das pás, frequentemente superiores a 10 vezes a velocidade do vento de ataque (Silva, 2013).

Figura 6 – Aerogerador comercial de eixo horizontal



Fonte: Canal Energia (2024)

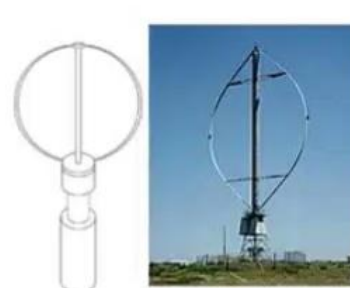
Os aerogeradores de eixo vertical são projetados para operar em diferentes direções de vento. O modelo Savonius utiliza o princípio do arrasto, com características para baixas velocidades de rotação e menor eficiência aerodinâmica. O modelo Darrieus opera com base no princípio de sustentação, otimizado para altas velocidades de vento. Destaca-se por ter melhor rendimento aerodinâmico e menor solidez estrutural em comparação com a Savonius, aplicado em regiões com ventos próximos ao solo (Silva, 2013). A Figura 7 ilustra os aerogeradores de eixo vertical.

Figura 7 – Aerogeradores de eixo vertical

Rotor Savonius



Rotor Darrieus



Fonte: Reis (2016)

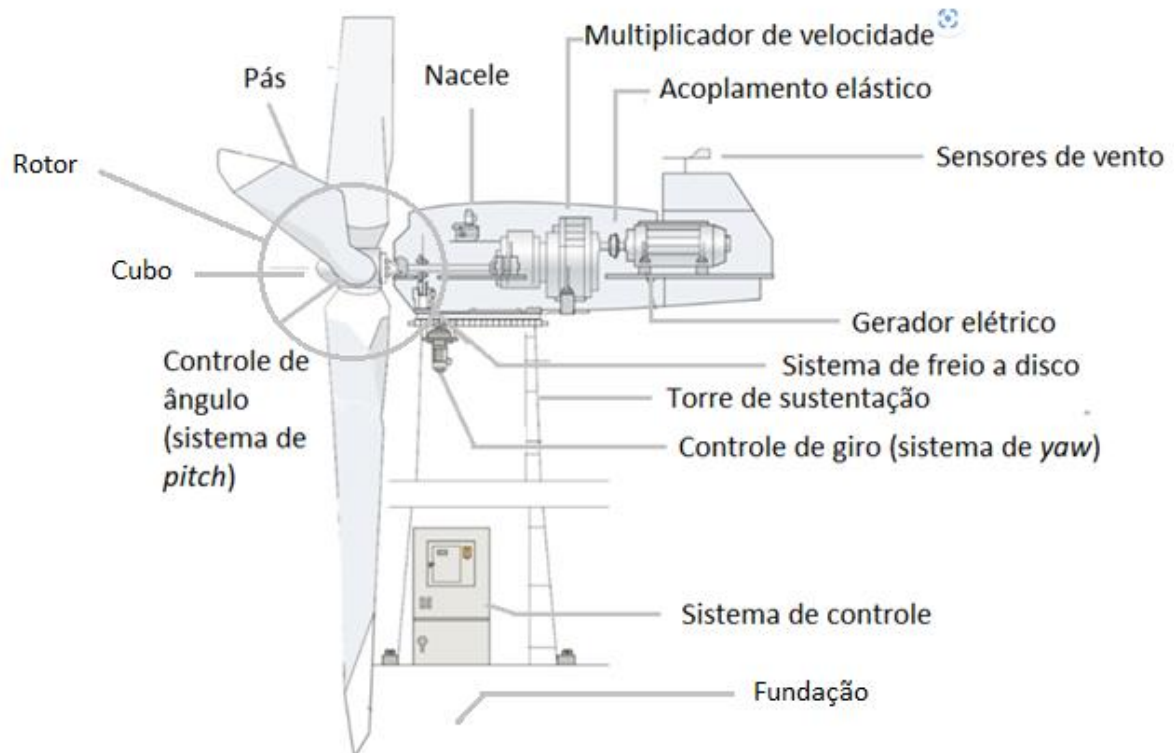
As turbinas de eixo vertical têm baixo coeficiente de potência comparadas com as de eixo horizontal, de modo a não serem comuns no mercado comercial.

2.4 ESTRUTURA DE UM AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Um aerogerador comercial, de eixo horizontal, pode ser dividido em quatro partes fundamentais (Figura 8):

- Fundação: responsável por fixar a torre do aerogerador no solo;
- Torre: sustenta a nacela e o rotor na altura projetada;
- Nacela: abriga o gerador e os equipamentos auxiliares;
- Rotor / Turbina (rotor horizontal): composta pelo cubo (mecanismo de conexão) e pelas pás (Boticchio; Rosa de Castro, 2018).

Figura 8 – Principais partes e componentes de uma turbina eólica



Fonte: adaptado de Cotesa (2023)

No rotor, as pás eólicas geram a rotação do eixo, que pode estar acoplado a um sistema de multiplicação ou diretamente ao gerador. A nacela abriga o gerador e os sistemas de freio, conversores, módulos de potência, transformador e sensores. Ela se conecta à torre e à turbina por meio de rolamentos e engrenagens, que permitem sua rotação para alinhar as pás à direção do vento. A torre sustenta o conjunto e abriga o sistema de controle na base, enquanto a fundação fixa toda a estrutura ao solo (Cotesa, 2023).

2.4.1 Fundação

A fundação dos aerogeradores tem a função de absorver e distribuir as cargas da estrutura e permitir os movimentos dinâmicos gerados pelas operações de *yaw* e *pitch*, explicados posteriormente. A seleção do tipo de fundação é determinada pelas características do solo e pelas cargas projetadas (Pestana, 2016). A Figura 9 ilustra a fundação utilizada na maioria dos projetos de torres eólicas.

Figura 9 – Fundação de laje de sapata superficial



Fonte: Braz; Rosa; Amaral (2021)

A fundação de aerogeradores comerciais é projetada com armadura de aço reforçada e estacas dimensionadas conforme as características geotécnicas do solo. Inclui uma sapata que distribui as cargas mecânicas e assegura a estabilidade estrutural, com especificações voltadas para resistir aos esforços de torção, cisalhamento, e cargas estáticas e dinâmicas impostas pela turbina eólica. O projeto segue critérios rígidos de engenharia civil para garantir a integridade e o desempenho mecânico da estrutura (Pestana, 2016).

2.4.2 Torre

As torres dos aerogeradores são estruturas que sustentam a nacela e a turbina em alturas que favoreçam a captação de ventos predominantes e de baixa turbulência. Essas torres são tipicamente construídas em aço, e ocasionalmente fabricadas em concreto para aplicação em protótipos e projetos que necessitam de maiores benefícios econômicos. As torres são montadas em seções tubulares conectadas uma sobre outra. As seções são interligadas por meio de encaixes precisos e fixadas com parafusos de alta resistência para garantir a integridade estrutural. A torre tubular de concreto (Figura 10) é amplamente utilizada devido à sua elevada robustez, durabilidade e viabilidade econômica (Castro, 2009).

Figura 10 – Torre de concreto



Fonte: Industrializar em Concreto (2016)

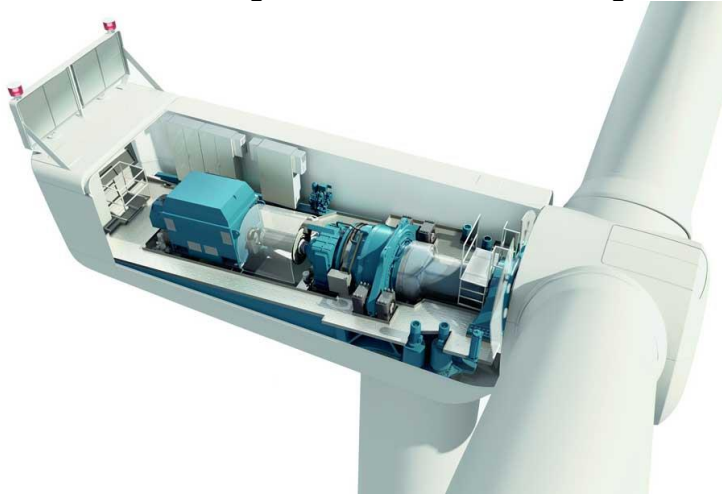
As torres atuais frequentemente excedem 100 metros de altura; para otimizar a exposição da turbina a ventos mais fortes e consistentes, que maximizam a eficiência na geração de energia.

2.4.3 Nacele

A nacele fica localizada no topo dos aerogeradores e abriga o sistema de conversão eletromecânica, o sistema de orientação (em inglês, *yaw*), instrumentação e demais controladores. No sistema de conversão eletromecânica, o eixo do rotor comumente está acoplado a uma caixa multiplicadora para aumentar a velocidade, ou então está diretamente conectado a um gerador equipado com controladores de rotação. (Boticchio; Rosa de Castro, 2018). O ambiente da nacele compreende a maior parte dos sistemas de conversão de energia, como ilustrado na Figura 11 (Boticchio; Rosa de Castro, 2018).

O sistema de orientação está instalado na parte inferior da nacele e utiliza os dados de direção do vento de uma biruta, da estação meteorológica, para orientar o rotor de forma que a pás estejam ortogonais ao vento.

Figura 11 – Nacele de aerogerador de eixo horizontal



Fonte: Windpower (2018)

Na nacele, também se encontram módulos de potência, que realizam a transformação e controle da energia gerada. Os conversores ajustam as características elétricas da energia antes que ela seja injetada na rede elétrica por meio de um transformador de alta tensão (Windpower, 2018).

2.4.4 Rotor / Turbina

O rotor (Figura 12) compreende as pás, o sistema de fixação das pás (cubo, ou *hub*, em inglês), e o sistema de controle das pás (*pitch*). Esse conjunto também pode ser denominado de turbina. Ao serem conectadas ao cubo, as pás captam a energia cinética do vento e a convertem em energia mecânica de rotação. O sistema de *pitch* regula o ângulo de ataque das pás em relação ao vento e controla a velocidade de rotação e, conseqüentemente, a produção de energia elétrica (REIS, 2016).

Figura 12 – Cubo de eixo horizontal



Fonte: Energês (2020)

O cubo é responsável pela transferência da energia cinética do vento captado pelas pás para o sistema eletromecânico de conversão. O sistema de *pitch* integrado ao cubo permite controle e operação da turbina eólica no ponto de máxima potência (Energês, 2020).

As pás, projetadas para captar a energia cinética do vento, possuem uma aerodinâmica para assegurar, em conjunto com o sistema de *pitch*, a operação em variações de força do arrasto do vento (Boticchio; Rosa de Castro, 2018). O movimento das pás inicia na zona de transição com o escoamento do vento ao longo de sua longitude, que gera uma força denominada de pressão dinâmica de rotação (*Wind Turbine Blades*, 2019).

A configuração de três pás tem maior eficiência na recepção da energia cinética do vento, pois mantém um equilíbrio adequado das forças aerodinâmicas. Os aerogeradores que possuem número maior de pás têm perdas de eficiência pela maior interação do vento entre as pás. Por outro lado, turbinas com menos pás comprometem o equilíbrio aerodinâmico e aumentam os riscos de sinistros operacionais (Boticchio; Rosa de Castro, 2018).

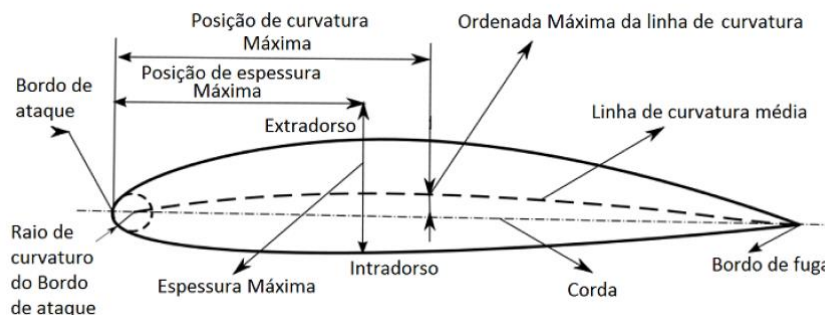
O perfil das pás eólicas tem semelhança ao de uma asa de avião, e é composto pelas seguintes partes:

- Bordo de ataque: parte frontal onde o vento inicia o escoamento pela superfície da pá;
- Bordo de fuga: parte traseira da pá, onde o escoamento se conclui;
- Corda: distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga;

- Intradorso: superfície posterior da pá, que concentra a maior pressão estática durante o escoamento;
- Extradorso: superfície frontal da pá, que concentra a maior pressão dinâmica durante o escoamento, devido à sucção;
- Espessura: medida da distância central entre a superfície frontal e a traseira da pá (Thomaz Junior, 2012).

A Figura 13 mostra o perfil de máxima corda de uma pá eólica com a demonstração das principais partes que caracterizam a sua aerodinâmica.

Figura 13 – Perfil de uma pá comercial



Fonte: traduzido de Thomaz Junior (2012)

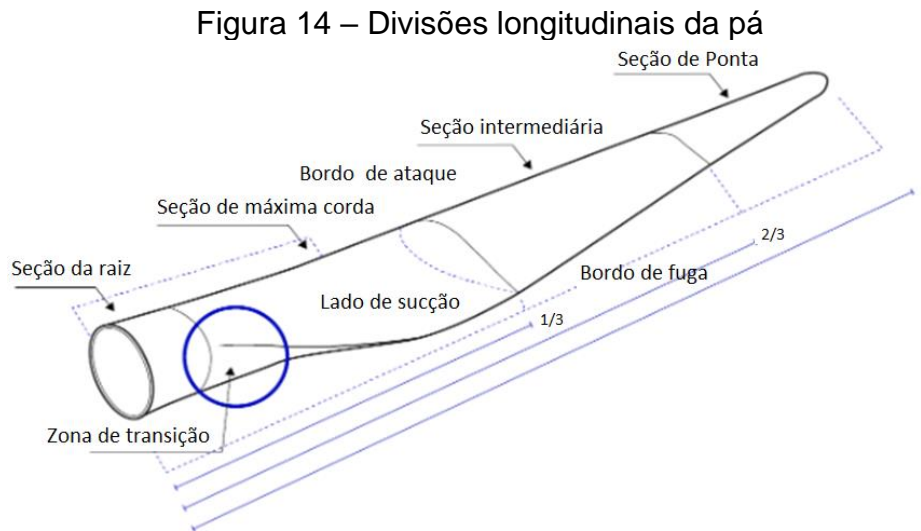
O perfil de pá apresentado tem sua fabricação baseada em aspectos de distribuição de cargas, centro de massa, sustentação e aerodinâmica da pá, que garantem integridade e resistência à pressão do vento (Thomaz Junior, 2012).

As pás eólicas são divididas em quatro seções longitudinais, conforme descrito a seguir:

- Seção da raiz: apresenta um formato transversal circular, conectada ao cubo;
- Seção de máxima corda: possui um perfil em formato de aerofólio ao longo da longitude;
- Seção intermediária: apresenta uma redução dinâmica da distância de corda ao longo do avanço longitudinal;
- Seção de ponta: apresenta uma redução de corda em proporção menor até alcançar a ponta da pá (*Wind Turbine Blades*, 2019).

A distribuição longitudinal das seções da pá inicia com a seção da raiz, seguida pela seção de máxima corda, que corresponde a um terço da longitude total

da pá. A seção intermediária representa outro terço, enquanto a seção de ponta ocupa o restante do comprimento, como apresentado na Figura 14 (*Wind Turbine Blades*, 2019).



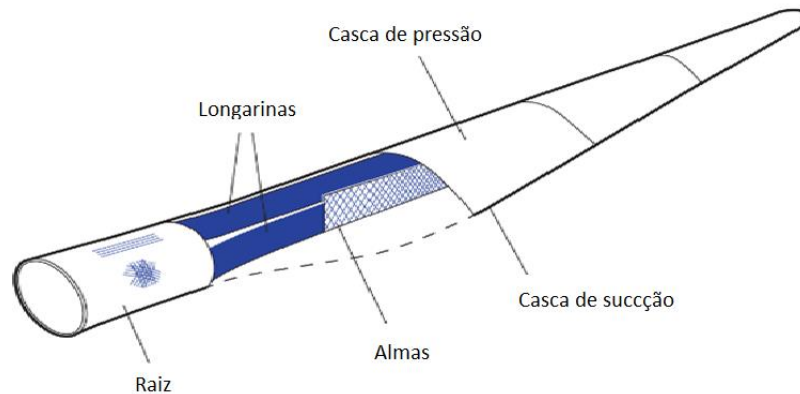
Fonte: traduzido e adaptado de *Wind Turbine Blades* (2019)

As pás são compostas por quatro componentes principais: cascas, longarinas, almas e raiz (Figura 15). As cascas representam a geometria externa das pás do rotor e são subdivididas em duas partes: casca de pressão e casca de sucção. A casca de pressão está voltada para a frente, lado de maior pressão do ar, enquanto a casca de sucção está voltada para trás, lado com menor pressão. A combinação dessas duas cascas modela o formato aerodinâmico das pás (*Wind Turbine Blades* 2019).

As longarinas, classificadas em principal e secundária, são infundidas nas cascas de sucção e pressão, que suportam a maior parte da carga aerodinâmica durante a operação e transferem essa carga para a raiz da pá (*Wind Turbine Blades* 2019).

As almas conectam as longarinas do lado da pressão com o lado da sucção, como uma viga que permite rigidez à pá e garante estabilidade geométrica. A quantidade de almas varia com as dimensões da pá: para cada par de longarinas, comumente existe uma alma; no entanto, em alguns projetos, pode haver duas almas para um par de longarinas, dependendo da carga a ser suportada (Mishnaevsky Jr, *et al.*, 2017).

Figura 15 – Composição estrutural da pá



Fonte: traduzido e adaptado de *Wind Turbine Blades* (2019)

As pás podem ter diversos tamanhos, em geral equivalente a um percentual (superior a 50%) da altura do cubo da turbina. Normalmente são em cor branca com as pontas pintadas, para sinalização e redução de choque com aves (Energês, 2020).

2.5 FUNCIONAMENTO DE UM AEROGERADOR

A diferença de pressão do vento, antes da casca de pressão e depois da casca de sucção das pás da turbina, cria um fluxo de ar com energia cinética. O fluxo atua sobre as pás e induz o movimento do rotor. A energia mecânica oriunda do fluxo de vento passa a ser transmitida para o gerador, localizado na nacele, onde a energia elétrica passa ser gerada (Wenzel, 2007).

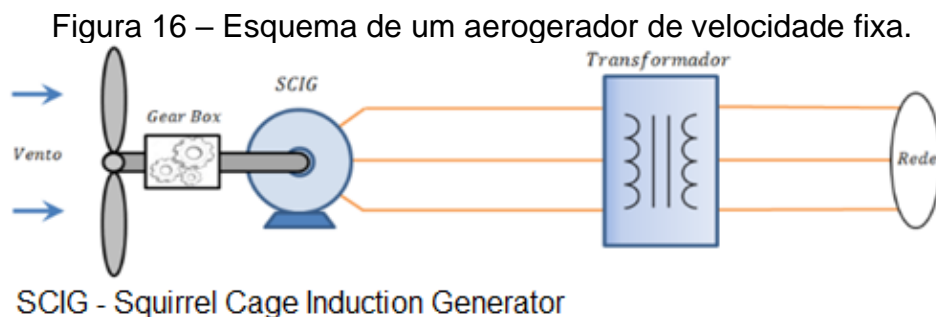
Os sistemas de conversão eletromecânica em aerogeradores normalmente utilizam uma caixa de multiplicação para aumentar a velocidade do eixo de baixa rotação do rotor para a velocidade de rotação necessária no eixo do gerador. A remoção de caixa pode ser aplicada em geradores de ímã permanente de múltiplos polos, compatíveis para a operação em ampla faixa de velocidades de vento (Gaiba de Oliveira, 2009).

2.5.1 Sistema de Geração

A operação dos geradores eólicos pode ser classificada em velocidade fixa ou velocidade variável. Com velocidade fixa, os aerogeradores mantêm uma rotação constante, independentemente das variações na velocidade do vento. Com

velocidade variável, a rotação do aerogerador é ajustada conforme a velocidade do vento (Ferreira, 2005).

Aerogeradores de velocidade fixa utilizam uma transmissão mecânica com caixa de multiplicação de velocidade (*gearbox*) acoplada ao eixo do gerador. Os geradores aplicados são do tipo de indução (assíncronos) com rotor em gaiola. O gerador é ligado a um transformador ligado à rede elétrica, conforme Figura 16. São modelos mais antigos - conectados diretamente à rede elétrica, em que a frequência da rede determina a rotação. O gerador deve ser acionado com rotação superior à rotação síncrona da máquina (Ferreira, 2005).



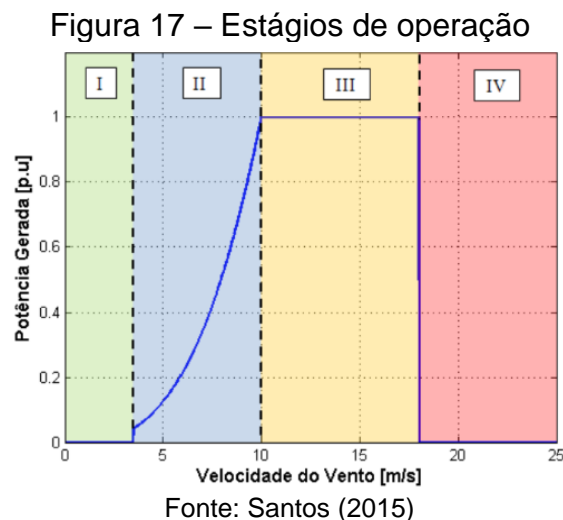
Fonte: adaptado de Santos (2015)

As turbinas eólicas de velocidade fixa possuem pás com estol que limitam a velocidade de operação, em suma maioria, aplicam geradores assíncronos pela facilidade de a máquina sincronizar a rede elétrica sem a necessidade de sofisticados sistemas de controle. Os aerogeradores com sistema de ajuste de ângulo de pá (*pitch*), operam em um faixa maior de vento, e frequentemente utilizam geradores síncronos de dupla alimentação, para controle preciso da frequência da energia gerada. O ajuste dinâmico proporciona maior eficiência em uma ampla faixa de velocidades do vento e maximiza a produção de energia. A escolha entre velocidade fixa e variável depende de fatores como disponibilidade tecnológica, custos, características do local de instalação e requisitos da rede elétrica em que a energia será injetada (Ferreira, 2005).

A conexão direta de aerogeradores de velocidade fixa à rede elétrica estabelece uma relação direta entre a frequência da rede elétrica e a velocidade síncrona do gerador, determinada pelo número de polos, de maneira que a rotação do gerador pode flutuar dentro de uma faixa limite causada pelo escorregamento, ao permitir variações na carga ou na velocidade do vento recebida. As flutuações podem

ocasionar oscilações indesejadas, impactos mecânicos adversos e degradação da qualidade da energia gerada (Ferreira, 2005).

Aerogeradores de velocidade variável têm a capacidade de geração de energia aumentada em até 30% de energia em comparação com máquinas de velocidade fixa. A eficiência está relacionada com a capacidade de operar de forma otimizada em uma ampla faixa de velocidade do vento. O *design* dos aerogeradores contribui para reduzir problemas mecânicos, uma vez que as forças exercidas pelo vento são absorvidas pela turbina e a eficiência na conversão de energia é maximizada pelo ajuste da velocidade de rotação para operações em velocidades baixas. O ajuste da velocidade de rotação também resulta na redução dos efeitos sonoros durante a operação. A Figura 17 apresenta os estágios de operação dos aerogeradores de velocidade variável amplamente utilizados no mercado eólico (Marques, 2004; Junior, 2007).



No estágio I o aerogerador fica inoperante até que o vento alcance uma velocidade mínima para iniciar sua operação, conhecida também como velocidade de *cut in*. As turbinas eólicas são projetadas para iniciar sua operação em velocidades de *cut in* a partir de 2 a 5 m/s. A faixa de velocidade inicial de operação se torna vantajosa quando supera a energia gasta internamente pelos sistemas (Marques, 2004; Junior, 2007).

No estágio II a operação possui um características crescente de geração de energia, seguindo a relação cúbica da potência com a velocidade do vento. Nessa etapa, acontece a busca da eficiência aerodinâmica de operação com utilização do

controle de rastreamento do ponto de máxima potência, conhecido como MPPT (*maximum power point tracking*). Alguns exemplos de controles MPPT são:

- Controle de velocidade de ponta, que regula a velocidade de operação para o ponto ótimo;
- Controle de otimização de torque para diferentes velocidades, que ajusta o torque do gerador no ponto ótimo de operação;
- Controle que monitora e perturba o sistema para encontrar o ponto de máxima potência;
- Controle por realimentação de potência, que por meio do mapeamento da curva de máxima potência da turbina consegue realizar ajustes de realimentação até que a potência máxima seja alcançada (Marques, 2004; Junior, 2007).

No estágio III, a potência máxima passa a ser limitada no valor nominal para proteção do aerogerador. O controle perante intempéries é realizado pelo ajuste no ângulo das pás ou pelo controle de estol (Marques, 2004; Junior, 2007).

O último estágio de operação, estágio IV, é conhecido como etapa de *cut off*, e ocorre quando a velocidade de vento supera a velocidade de operação segura do aerogerador. Não há geração de energia nesta etapa. Para segurança do sistema, ocorrem ajustes de ângulo de ataque das pás e ativação de freio mecânico da turbina (Marques, 2004; Junior, 2007).

2.5.1.1 Tipos de Geradores

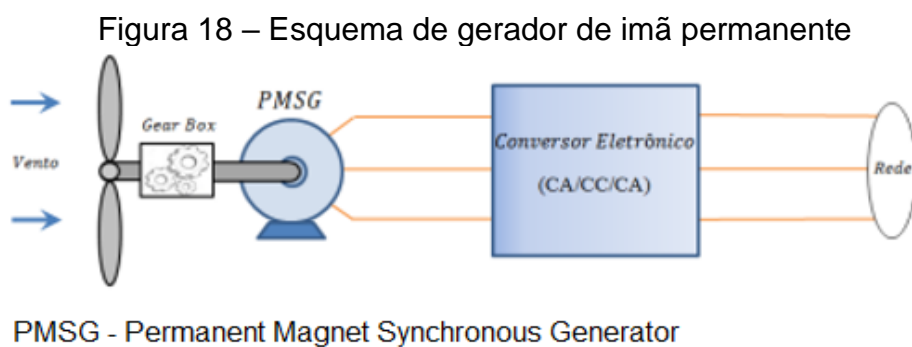
Os geradores eólicos podem ser de quatro tipos:

- Gerador síncrono com ímãs permanentes;
- Gerador síncrono com rotor excitado;
- Gerador de indução com rotor em gaiola (antigamente chamado gaiola de esquilo, *squirrel cage*);
- Gerador de indução duplamente excitado (Santos, 2015).

O gerador síncrono de ímãs permanentes, conectado à rede elétrica por meio de um conversor de potência plena, apresenta as seguintes vantagens em relação aos outros geradores:

- Eliminação da caixa multiplicadora: um gerador com múltiplos polos pode operar em uma ampla faixa de velocidades do vento, não havendo necessidade de uma caixa multiplicadora, de forma que isso reduz perdas mecânicas e custos de manutenção;
- Controle de potência refinado: o conversor de potência plena possibilita um controle preciso da potência ativa e reativa gerada pelo sistema, o que permite qualidade de energia e estabilidade da rede elétrica,
- Redução de componentes mecânicos: a ausência de escovas reduz a quantidade de peças móveis e elimina o desgaste mecânico das escovas, aspecto que melhora a operação e a vida útil do sistema (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011).

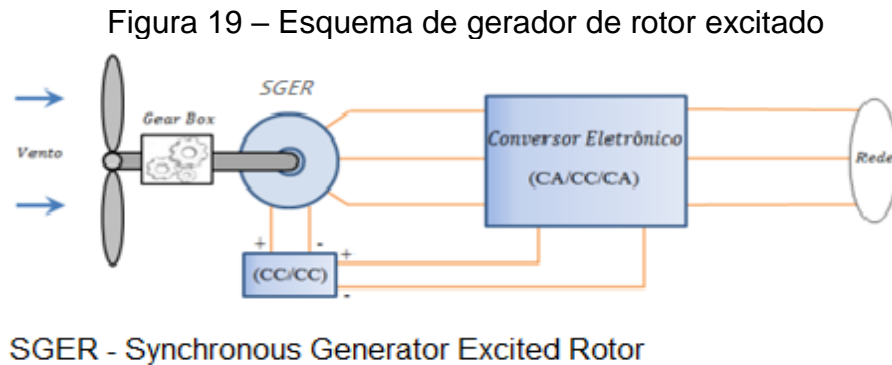
Os geradores de ímãs permanentes e a utilização de um conversor de potência plena tem um valor de mercado considerável em relação a outra tecnologias, além da presença do conversor de potência plena implicar em uma atenção especial na operação e manutenção. A Figura 18 mostra o esquema do gerador de ímã permanente de baixo número de polos com caixa multiplicadora (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011).



Fonte: adaptado de Santos (2015)

Os geradores síncronos de rotor excitado também operam em uma ampla faixa de velocidades. A configuração com múltiplos polos no gerador elimina a necessidade da caixa de multiplicação, no entanto exige aplicação de sistemas de controle de potência ativa e reativa por meio de conversores atuando no circuito de campo (rotor) para garantir um desempenho eficiente e estável. Os conversores do circuito de campo (CC/CC) controlam o campo magnético do gerador e permitem

ajustes precisos da potência reativa e da tensão do sistema. Simultaneamente, atuam conversores estáticos conectados à rede (CA/CC/CA) que convertem a energia gerada pelo gerador para a frequência da rede elétrica, conforme o esquema apresentado na Figura 19 (Pereira *et al.*, 2013).

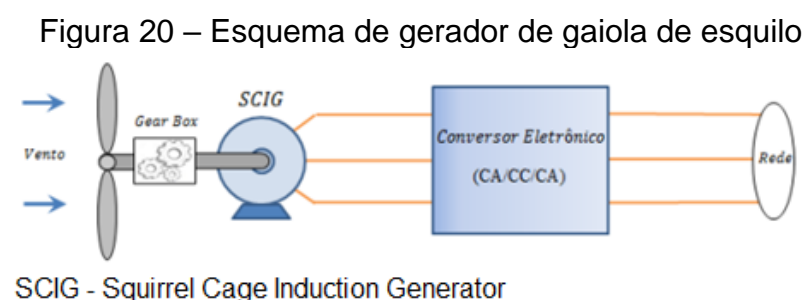


Fonte: adaptado de Santos (2015)

Os geradores de indução com rotor em gaiola (Figura 20) eram amplamente utilizados nos primeiros sistemas de energia eólica, devido à sua fácil integração à rede elétrica. O gerador não necessita de escovas para a transferência de energia entre o rotor e o estator, pelo seu princípio de funcionamento por indução eletromagnética, o que reduz o desgaste mecânico ao longo do tempo (Pereira, 2010).

Para garantir uma operação em ampla faixa de velocidades de vento, os geradores de indução com rotor em gaiola utilizam caixa multiplicadora para manter a produção constante de eletricidade, apesar das perdas mecânicas. Conversores estáticos de potência plena controlam a velocidade do rotor e regulam a potência ativa e reativa fornecida à rede (Pereira, 2010).

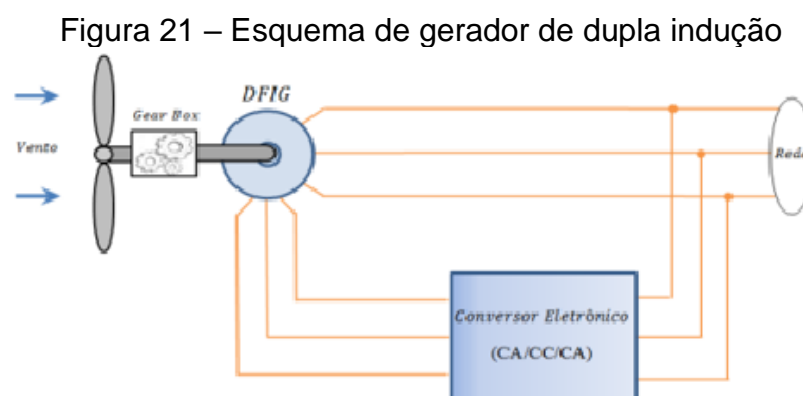
Os geradores de indução com rotor em gaiola têm eficiência inferior comparados com os síncronos, mas sua confiabilidade construtiva resulta em ampla aplicação em sistemas de energia eólica (Pereira, 2010).



Fonte: adaptado de Santos (2015)

Os geradores de indução duplamente alimentados (DFIG, *double fed induction generator*) controlam a potência ativa e reativa, com o estator conectado diretamente à rede elétrica e o rotor alimentado por um conversor estático bidirecional, conforme esquema da Figura 21 (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011).

O conversor estático bidirecional regula a excitação do rotor ao realizar o controle dinâmico sobre a potência gerada, com percentual de 25% à 30% da potência nominal do gerador (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011).



DFIG - Double Fed Induction Generator

Fonte: adaptado de Santos (2015)

Semelhante aos geradores de indução com rotor em gaiola, os geradores de indução duplamente alimentados requerem uma caixa multiplicadora para adaptar a velocidade do rotor e proporcionar eficiência em diversas condições de vento. No entanto, a conexão direta com a rede elétrica pode permitir que distúrbios na rede afetem a operação do gerador (Pereira, 2010).

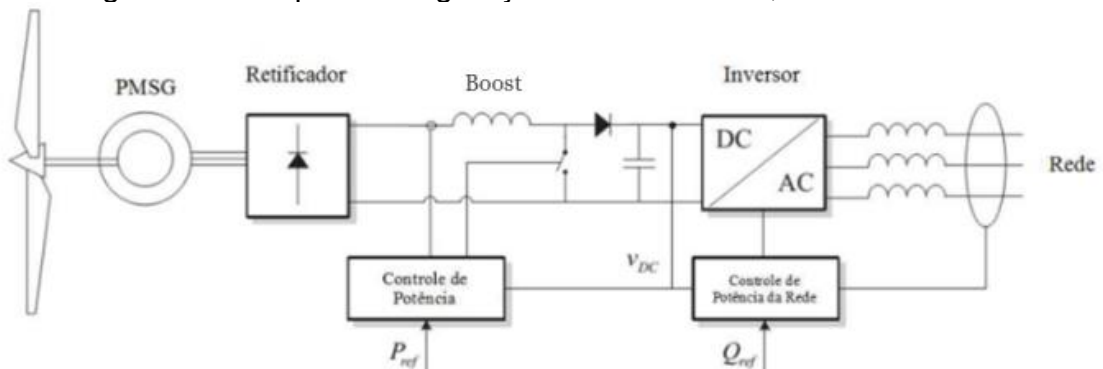
2.5.2 Conversores para Geradores Síncronos

Os três principais tipos de conversores eletrônicos empregados em sistemas eólicos são os conversores retificadores (CA-CC), os conversores *Boost* (CC-CC elevadores de tensão), e os conversores inversores (CC-CA) modulados por PWM (modulação por largura de pulso, *pulse width modulation*) (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011). Os sistemas típicos são mostrados nas Figuras 22 e 23.

Na Figura 22, o retificador a diodo com conversor *Boost* controla a potência destinada à rede elétrica, conectados a um inversor PWM. O sistema é composto por

dois barramentos CC, cada um com uma função específica. O barramento conectado ao retificador opera com tensão variável, enquanto que o barramento ligado à saída do *Boost* mantém uma tensão constante. O conversor *Boost* eleva e regula a tensão do segundo barramento de acordo com a velocidade do gerador. O inversor adequa a tensão e frequência de injeção de potência na rede aos valores de operação da rede (Achilles; Pöller, 2003).

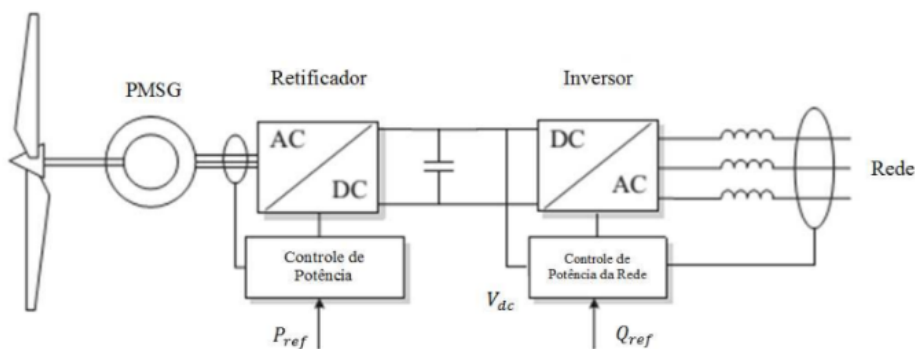
Figura 22 – Esquema de geração com retificador, *Boost* e inversor



Fonte: adaptado de Santos (2015)

Na Figura 23, o conversor retificador é controlado e diretamente conectado ao inversor PWM (Teodorescu; Liserre; Rodriguez, 2011). A regulação da tensão é feita no barramento CC. Por meio de algoritmos de controle, a tensão CC é mantida em níveis desejados de funcionamento do inversor. O fator de potência passa a ser ajustado pelo controle da potência reativa e a sincronização do sistema de conversão com a rede elétrica é realizada por meio de um circuito chamado PLL (*phase locked loop*) (Santos, 2015).

Figura 23 – Esquema de geração com retificador e inversor



Fonte: Santos (2015)

O sistema PLL identifica o ângulo elétrico da rede e sincroniza a fase da energia gerada. Isso permite a injeção de energia de forma sincronizada e em fase, e a adaptação da potência ativa e reativa de acordo com as condições de operação da rede elétrica (Santos, 2015).

2.5.3 Conexão à rede

A energia gerada pelos aerogeradores, com frequência de 50 ou 60 Hz e fases devidamente alinhadas para evitar interferências na rede elétrica, apresenta tensão média de 400 V a 690 V. Essa tensão é elevada por transformadores para valores entre 11 kV e 33 kV (média tensão), adequados à rede de distribuição local, ou para 138 kV (alta tensão), quando destinada à rede de transmissão. Após a elevação da tensão, a energia é conduzida até uma subestação por meio de linhas subterrâneas ou aéreas, onde ocorre o ajuste final dos parâmetros elétricos, garantindo compatibilidade com a rede elétrica e estabilidade da carga (Soares, 2018).

Na subestação, a energia é integrada ao sistema de proteção e controle, que inclui disjuntores, relés e medidores. Esses dispositivos asseguram a injeção segura da energia na rede elétrica, além de possibilitar o desacoplamento automático do aerogerador em situações de falha ou emergência. A conexão definitiva da energia à rede ocorre no ponto de interconexão, local projetado para monitorar e regular o fluxo de energia entre o sistema gerador e a rede elétrica (Soares, 2018).

As normas e regulamentos para conexão à rede elétrica em aspectos internacionais são regidas pela: IEC 61400: utilizada para a conexão de aerogeradores; IEEE 1547: requisitos para interconexão de fontes de geração distribuída, incluindo eólica; Grid Codes: regulamentos para conexão à rede elétrica (Soares, 2018; ANELL, 2023).

No Brasil a regulamentação da conexão à rede elétrica dos aerogeradores tem definição pela:

- Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012: estabelece as condições gerais para a micro e minigeração distribuída, incluindo eólica;
- Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015: atualização que detalha os procedimentos de acesso à rede;

- Procedimentos de Rede da ONS: normas do Operador Nacional do Sistema Elétrico para conexão de fontes renováveis (Soares, 2018; ANELL, 2023).

Os procedimentos de rede da ONS definem requisitos técnicos para garantir a integração ao sistema de forma segura e estável, considerando a intermitência da energia eólica. Os requisitos são:

- Requisitos de conexão que exigem padrões de frequência, tensão, controle de potência ativa e reativa.
- Regras de despacho e integração para ajustar a geração intermitente à demanda do sistema;
- Capacidade de suportar faltas de energia na rede com a garantia de operação em condições de baixa tensão na rede;
- Qualidade da energia com tratamento e limitações de harmônicos e flutuações na rede elétrica (ONS, 2020).

A resolução Normativa ANEEL nº 687/2015, regula o acesso a rede elétrica de fontes renováveis e define condições como:

- Responsabilidades do gerador ou titular do parque eólico e do operador da rede, a distribuidora ou transmissora, à conexão e os custos associados;
- Exige estudos técnicos que avaliem o impacto da conexão do parque eólico na estabilidade, confiabilidade e qualidade do sistema elétrico;
- Obriga os operadores das redes a apresentarem prazos para análise de solicitações e elaboração de propostas de conexão para os geradores;
- Define regras específicas para pequenos sistemas eólicos conectados à rede, promovendo sua expansão no âmbito da geração distribuída (ANELL, 2019).

2.5.4 Sistema de *Pitch*

O sistema de *pitch* controla o ângulo de ataque das pás em relação ao vento, para otimizar a eficiência na captura de energia eólica e garantir a segurança estrutural do aerogerador. O funcionamento desse sistema ocorre em regime permanente, com o uso de algoritmos de controle para monitorar a diferença entre a velocidade rotacional angular atual do rotor e a velocidade de referência ideal do rotor para as velocidades de vento. Com base nessa diferença, o sistema realiza ajustes precisos para manter o aerogerador em funcionamento no ponto de operação desejado (Rexroth, 2010).

Os ajustes angulares das pás (*pitch*) são realizados por meio de motores atuadores, conforme Figura 24. Os atuadores recebem comandos que especificam a magnitude e a direção das correções necessárias (Rexroth, 2010).

Figura 24 – Sistema de *pitch*



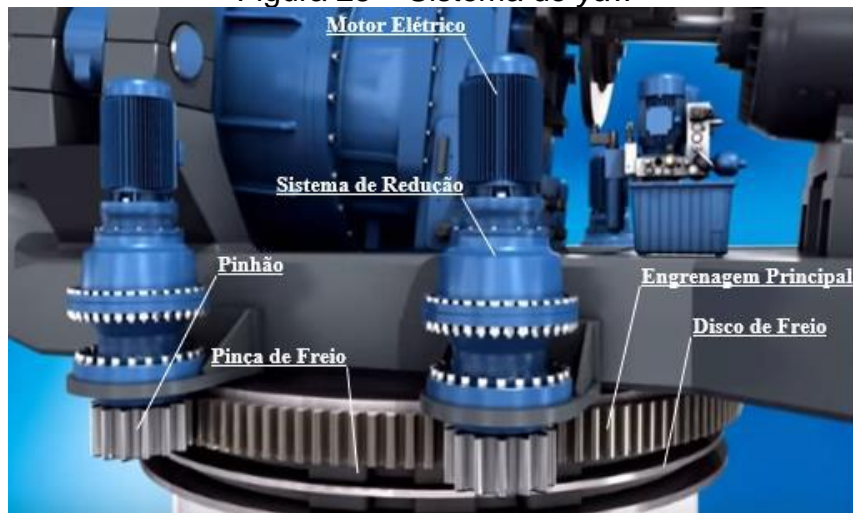
Fonte: Rexroth (2012)

Em situações de rajadas intensas e bruscas o funcionamento em regime permanente não garante proteção. Ocorre, portanto, a compensação de *pitch* pela comparação da potência ativa gerada com a potência nominal esperada. A diferença das potências (sinal de erro no ajuste de *pitch*) é processada pelo controlador do tipo PI (Proporcional-Integral) que aciona os atuadores para regular o ângulo de pá pelo uso dos algoritmos do controle PI, que envia um sinal (soma do sinal do controle permanente com o sinal de compensação de *pitch*) para os atuadores dos motores realizarem o ajuste de ângulo de pá e maximizar a geração de energia (Rodrigues, 2022).

2.5.5 Sistema de Yaw

O sistema de yaw (Figura 25) orienta a nacela para a direção predominante de vento, com base em dados de medição da direção e velocidade do vento. O processamento desses dados faz o sistema de yaw ajustar a orientação da turbina para maximizar a captura de energia. A atuação do sistema também protege o aerogerador em condições adversas. Na ocorrência de ultrapassagem do limite de segurança, representado pelo estágio IV da Figura 19, o sistema pode desalinhar o rotor da turbina. Da mesma forma, em situações de vento muito fraco, o sistema inicia a busca pela direção de vento que permita sua operação (Rexroth, 2010).

Figura 25 – Sistema de yaw



Fonte: Rexroth (2012)

Os motores do sistema de yaw utilizam pinhões que são conectados a uma cremalheira fixa, que gira a nacela. Abaixo da cremalheira, há um disco de freio que serve para travar a nacela na direção ajustada. A quantidade de motores pode variar de acordo com a capacidade da máquina - quanto maior a nacela, maior será o número e o tamanho dos motores (Rexroth, 2010).

2.6 SISTEMA DE MONITORAMENTO METEOROLÓGICO

O sistema de monitoramento meteorológico dos aerogeradores é instalado na parte superior externa da nacela e consiste em instrumentos utilizados para a medição da direção e velocidade do vento. Os equipamentos empregados para essa finalidade incluem:

- Biruta: detectam com precisão a direção do vento incidente. Os dados mensurados são utilizados pelo sistema de controle do aerogerador para ajustar a orientação do rotor com o fluxo do vento;
- Anemômetro de concha: mede a velocidade de vento pela rotação oriunda do ataque do vento nas conchas. Os dados aferidos são utilizados para ajuste de ângulo de pás e para segurança de operação;
- Anemômetro sônico: mensura a direção e velocidade do vento por meio de sensores que medem ondas sonoras (Marduque, 2018; Oliveira; De Araújo, 2015).

As primeiras turbinas eólicas utilizavam instrumentos do tipo anemômetros de concha e biruta (Figura 26) para a medição da velocidade e direção do vento. Com o desenvolvimento tecnológico, houve a substituição desses dispositivos por anemômetros sônicos (Figura 27), que apresentam a vantagem de não possuírem partes móveis, o que minimiza o desgaste mecânico e reduz a necessidade de manutenção. Ademais, anemômetros sônicos garantem maior eficiência por meio de leituras mais rápidas e precisas (Marduque, 2018).

Figura 26 – Instrumentação meteorológica



Fonte: CTGAS-ER (2010)

Figura 27 – Anemômetros sônicos

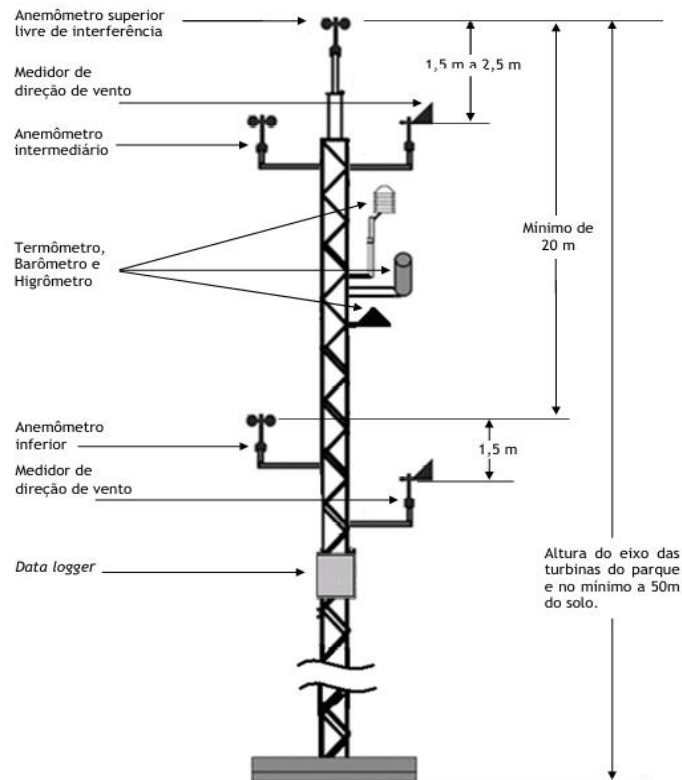


Fonte: Marduque (2018)

A utilização de instrumentos de medição não se aplica apenas ao controle operacional do aerogerador, mas também à prospecção de vento que precede a implantação de um parque eólico, mediante o estudo de viabilidade eólica local e das características climatológicas presentes. A torre meteorológica de prospecção é equipada com anemômetros de concha, birutas, termo-higrômetro e barômetro, que medem a velocidade, direção, temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica. Na geração de energia eólica, não se considera apenas a velocidade média do vento, mas também suas variações temporais (Oliveira; De Araújo, 2015).

A torre meteorológica de prospecção do vento deve ter no mínimo 50 metros de altura. O anemômetro principal deve ser instalado no topo, alinhado com o eixo do rotor, para minimizar interferências de ventos turbulentos. Um segundo anemômetro deve ser posicionado 2,5 metros abaixo do topo, e um terceiro, 20 metros abaixo, próximo à altura mínima da ponta da pá. A biruta deve ser instalada 1,5 metros abaixo do topo, enquanto o barômetro e o termo-higrômetro devem estar entre 1,5 e 10 metros abaixo do topo, conforme ilustração da estação meteorológica na Figura 28 (Oliveira; De Araújo, 2015).

Figura 28 – Torre de prospecção meteorológica



Fonte: EPE (2013)

As diretrizes da EPE para medições anemométricas em parques eólicos exigem que torres de monitoramento sigam normas técnicas, como a IEC 2005, para garantir a precisão dos dados. A estrutura deve minimizar a turbulência e considerar fatores como diâmetro dos suportes dos instrumentos e a instalação adequada de para-raios, com o intuito de atender a qualidade das medições na avaliação do potencial energético local (EPE, 2013).

2.7 SISTEMA DE MONITORAMENTO OPERACIONAL

Nas usinas eólicas, o monitoramento e controle operacional é realizado por meio de um sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que centraliza as informações provenientes de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), responsáveis por armazenar dados de sensores e enviar comandos para os atuadores instalados nos aerogeradores. A aquisição de dados elimina a necessidade de intervenção direta de um operador e permite o gerenciamento remoto por meio de interfaces de *software*. Essas interfaces geram históricos de dados,

emitem relatórios detalhados, oferecem interação gráfica, entre outras funcionalidades (WindBox, 2020).

O sistema SCADA conta com uma interface centralizada que coleta, processa e exibe dados operacionais em tempo real e disponibiliza informações históricas. As principais funcionalidades dos *softwares* SCADA incluem:

- Visualização em tempo real: o sistema apresenta grandezas medidas, como velocidade do vento, produção de energia e situação operacional dos dispositivos em tempo real;
- Análise histórica e gráficos de tendência: o sistema gera gráficos e relatórios que ilustram a evolução das grandezas medidas ao longo do tempo, facilitando a identificação de padrões de desempenho e a avaliação de estratégias de operação;
- Diagramas de topologia e status dos componentes: os sistemas oferecem visualizações gráficas da infraestrutura do parque eólico para facilitar a localização de falhas e a análise de problemas operacionais;
- Relatórios e exportação de dados: o SCADA permite a geração de relatórios detalhados sobre o desempenho operacional, além de possibilitar a exportação de dados para análises adicionais, utilizadas para otimização e tomada de decisões;
- Configuração de alarmes e alertas: os sistemas possibilitam a configuração de notificações para condições operacionais indesejadas, para uma resposta rápida a eventos críticos, como falhas de equipamento ou desvio de parâmetros operacionais;
- Cálculos financeiros e indicadores econômicos: alguns sistemas SCADA oferecem funcionalidades para calcular e exibir informações financeiras, como retorno sobre investimento (ROI) e outros indicadores econômicos baseados nas medições de campo;
- Recursos avançados: isso inclui controle remoto dos equipamentos, análise preditiva de dados para manutenção preventiva, integração com sistemas de gestão de energia e medidas robustas de segurança cibernética para proteger dados e sistemas contra ameaças (Costa *et al.*, 2016; Lima Júnior, 2022).

A transmissão eficiente de dados entre os aerogeradores e o sistema central requer uma rede robusta e confiável para cada unidade. Cada torre eólica é equipada com um Controlador Lógico Programável (CLP), que estabelece comunicação com o software SCADA através de protocolos de redes industriais, como Modbus, DNP3 e OPC (WindBox, 2020).

3 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E RESULTADOS – PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AEROGERADOR EXPERIMENTAL

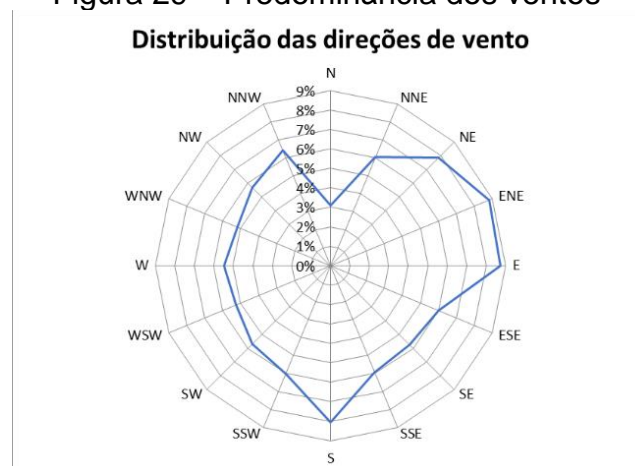
Este capítulo apresenta os aspectos técnicos que embasaram o desenvolvimento de um aerogerador experimental no Campus Araranguá da UFSC, na Unidade Jardim das Avenidas (Araranguá, SC). O sistema implementado é constituído por um aerogerador de três pás, que utiliza uma máquina síncrona de ímãs permanentes, com potência de 5 kW, instalado em uma torre de concreto com 10 metros de altura. Convém ressaltar que o projeto descrito neste capítulo corresponde a uma segunda versão do sistema implementado. A primeira versão possuía uma estrutura de geração diferente, e foi severamente danificada pela ação de um ciclone extratropical com ventos de alta intensidade, em 2021.

3.1 POTENCIAL EÓLICO LOCAL

As características de vento na região de instalação do projeto foram coletadas por uma estação com tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), localizada no Campus Araranguá da UFSC, na Unidade Mato Alto. Para mensurar a média de velocidade de vento e direção foram utilizados dados de abril a dezembro de 2016.

A velocidade média de vento local calculada foi de 2,6 m/s, com direções predominantes de 67° a 170° em relação ao norte magnético (entre lés-nordeste e sul), conforme Figura 29. A velocidade de 2,0 m/s, de maior frequência na direção leste nordeste (Cerutti; Graebin, 2020). O detalhamento do estudo de vento está documentado no Apêndice A.

Figura 29 – Predominância dos ventos



Fonte: o autor (2024)

A velocidade média e mais frequente de vento local pode ser considerada baixa em relação ao padrão dos parques eólicos e de aerogeradores comerciais, que tipicamente têm potências nominais com ventos de 8 a 10 m/s. O estudo preliminar do potencial eólico local levou à indicação de que seria necessário um projeto adequado a baixas velocidades de vento. O local escolhido para a implantação do aerogerador foi a Unidade Jardim das Avenidas do Campus Araranguá da UFSC, localizado a cerca de 3 km do local de medições, em uma área de aproximadamente 100 m² (Figura 30).

Figura 30 – Local da implantação do projeto



Fonte: *Plus Energy* (2020)

A área destinada à construção do aerogerador tem ampla exposição aos ventos de nordeste, leste e norte-nordeste. Além disso, considerando aspectos acadêmicos e a finalidade de uso como experimento, o local é de fácil acesso, próximo ao laboratório do projeto *Plus Energy*, e permite boa visibilidade para a comunidade interna e externa.

3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VENTO

Próximo ao local de instalação do aerogerador, a 20 metros da torre eólica principal, foi construído um sistema próprio de monitoramento das condições de vento. A torre de monitoramento tem altura de 10 m. No topo, estão instalados: uma biruta, um anemômetro de conchas, um pluviômetro, e uma lâmpada de sinalização. A 30 centímetros abaixo do topo, encontra-se uma câmera para supervisão da torre eólica,

conforme Figura 31. A torre possui seis pontos de estaiamento e estrutura tubular de aço galvanizado.

Figura 31 – Torre meteorológica



Fonte: Plus Energy (2022)

Na primeira versão do projeto, os dados da torre meteorológica eram utilizados em um sistema de rede de microcontroladores. Os instrumentos meteorológicos transmitiam sinais analógicos para um quadro de comando na base da torre eólica, que possuía um computador conectado a microcontroladores que atuavam nos sistemas de *pitch* e *yaw*. Um controlador principal, denominado “*master*”, gerenciava a comunicação entre os microcontroladores e realizava o monitoramento dos demais dispositivos elétricos do aerogerador.

Atualmente, a torre meteorológica é utilizada apenas como estação de medição de dados climáticos, sendo que os dados utilizados para o controle do aerogerador são coletados a partir de instrumentos (anemômetro e biruta) instalados na própria nacela.

3.3 TORRE ÉOLICA E SISTEMA DE GERAÇÃO

Essa seção apresenta os principais elementos considerados no projeto do aerogerador construído. A concepção do aerogerador tem como base as características de sistemas eólicos comerciais, considerando - por exemplo - perfis de pás, controle de *yaw* e *pitch*, sistemas de monitoramento, de segurança e da energia gerada.

3.3.1 Torre, Fundação e Quadro de Comando

A torre do aerogerador consiste em um poste de concreto no formato tronco de cone, de 11 metros de altura, conforme Figura 32.

Figura 32 – Torre de concreto utilizada



Fonte: *Plus Energy* (2020)

O poste com formato de tronco de cone, possui 410 mm de diâmetro na base e 190 mm na ponta, pesa aproximadamente 1.310 kg. Fabricado em concreto armado, possui resistência de 600 kgf, o que garante elasticidade, resistência à ruptura e ao torque (Romagnole, 2021).

A perfuração do solo ocorreu com o uso de retroescavadeira com perfuratriz hidráulica (Figura 33), com a utilização da norma NBR 15688 (ABNT, 2012), que define a profundidade como 60 cm mais 10% do comprimento do poste. Para o poste de 11 metros, a profundidade perfurada foi de 1,70 metros.

Figura 33 – Perfuração de solo



Fonte: *Plus Energy* (2022)

O poste de concreto utilizado, típico de uso em redes de distribuição elétrica, foi instalado com ajuda de caminhão *munck* para posicionamento, ancoragem e alinhamento na fundação.

Na base da torre, foi instalada um quadro de comando (Figura 34) que recebe a energia gerada pelo aerogerador. A energia dos terminais do gerador é conduzida por cabos ao longo da torre e segue por um sistema subterrâneo até o quadro de comando. Neste quadro, a energia é direcionada a um conversor retificador, onde é convertida de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), e direcionada a um controlador de carga, responsável pela carga de baterias. A energia armazenada nas baterias pode ser novamente convertida para corrente alternada por meio de um conversor inversor, e alimentar cargas isoladas da rede.

Figura 34 – Quadro de comando



Fonte: *Plus Energy* (2021)

O quadro de comando possui um controlador microprocessador, programado para incluir comandos de emergência e sinalização em caso de falhas. Toda a estrutura elétrica do sistema de geração e do quadro de comando é aterrada.

3.3.2 Gerador e Caixa Multiplicadora (*Gearbox*)

O gerador utilizado no projeto é uma máquina trifásica síncrona, com rotor de ímãs permanentes. Com eixo de baixa inércia, opera em uma faixa de rotação de 100 a 2000 rpm (Oficferreira, 2019). A Figura 35 ilustra o gerador, e a Tabela 2 apresenta seus principais dados técnicos, conforme o fabricante.

Figura 35 – Gerador trifásico síncrono de ímãs permanentes



Fonte: oficferreira (2019)

Tabela 2 – Dados do fabricante do gerador

Gerador de Imã Permanente		
Potência	5	kW
RPM nominal	2000	RPM
Tensão Nominal	240	V
Fases	3	Trifásico
Ligação	Triângulo	-
Corrente Nominal	40	Amp.
Rendimento	0,93	-

Fonte: adaptado de oficferreira (2019)

Uma caixa de engrenagens multiplicadora (*gearbox*) é acoplada à turbina eólica para aumentar a velocidade no eixo do gerador. Ela é importante para que o gerador desenvolva rotações mais próximas ao valor nominal. No caso do projeto, a caixa consiste em uma adaptação, sendo o uso reverso de uma caixa redutora de eixos paralelos com engrenagens embebidas em óleo lubrificante (Figura 36).

Figura 36 – Caixa Multiplicadora (*Gearbox*)

Fonte: SEW (2010)

Os principais dados técnicos da caixa multiplicadora de rotação estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados da caixa multiplicadora

Folha de Dados

CAIXA MULTIPLICADORA SEW EURODRIVE F7 M5 A ÓLEO		
I_{fm}	15,83	Fator de multiplicação
RPM Nominal	1700	RPM
Rendimento	0,91	Conversão de energia

Fonte: adaptado de SEW (2010)

A *gearbox* proporciona uma multiplicação de 15,83 vezes na velocidade do eixo do gerador. Um sistema primário de multiplicação foi desenvolvido (explicado na próxima seção), que adiciona duas rotações no eixo da *gearbox* para cada rotação no eixo do rotor. Assim, para cada rotação do eixo do rotor ocorrem aproximadamente 31 rotações no eixo do gerador.

3.3.3 Sistema Primário de Multiplicação

O sistema primário de rotação foi implementado para amplificar a rotação de entrada na caixa multiplicadora, e consiste em um sistema de engrenagens do tipo coroa-pinhão, adaptado de um sistema de motocicletas, conforme ilustrado na Figura

37. O rendimento deste tipo de configuração é em torno de 97% (Antunes; Freire, 1998, *apud* Wachholz, 2016).

Figura 37 – Peças do sistema primário de multiplicação



Fonte: Havana (2024)

A conexão entre a coroa e o pinhão foi feita com a utilização de uma corrente de transmissão de motocicleta, como ilustra a Figura 38.

Figura 38 – Montagem do sistema primário de multiplicação



Fonte: Plus Energy (2022)

Na Figura 38, a corrente interliga as duas engrenagens (coroa e pinhão) para elevar a rotação no eixo de entrada da *gearbox*. O objetivo final é ampliar a rotação no eixo do gerador, para que este trabalhe próximo às suas condições nominais.

3.3.4 Pás

As pás da turbina eólica foram fabricadas com aerofólio seguindo o padrão NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) 23018, com *design* assimétrico e espesso, para proporcionar sustentação e arrasto em diferentes ângulos de ataque. Sua aplicação se beneficia pelas características de um cilindro rotativo na borda de ataque que melhora o desempenho aerodinâmico ao retardar a separação do fluxo e aumentar a sustentação (Abdullah; Hussain; Mokhtarian, 2020).

A Tabela 4 apresenta as características construtivas das pás da turbina construída para o projeto.

Tabela 4 – Dados aerodinâmicos das pás

Folha de Dados		
Pás do aerogerador		
Número	3	unidades
Largura de ponta	200	mm
Largura de raiz	450	mm
Comprimento	3000	mm
Rendimento	0,30	De conversão em energia

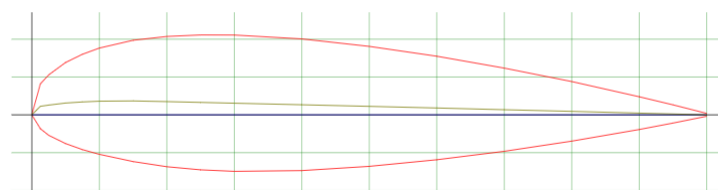
Fonte: o autor

A estimativa de rendimento das pás foi baseada no desempenho global de aerogeradores comerciais, que é em torno de 40% (Gipe, 1995, *apud* Terciote 2002). Para as pás do projeto, estimou-se um rendimento aerodinâmico de 30%, devido à manufatura, à altura da turbina em relação ao solo e ao escoamento turbulento do vento, fatores que influenciam diretamente na eficiência da máquina.

O perfil do aerofólio utilizado na construção das pás tem comprimento de 45 cm de corda na raiz até 20 cm de corda na ponta de pá, conforme modelo apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Aerofólio utilizado nas pás

NACA 23018 - NACA 23018 airfoil



Fonte: Airfoil Tools (2024)

O aerofólio NACA 23018 pertence à série 23000 e é muito utilizado em aplicações aeronáuticas e turbinas eólicas, com eficiência aerodinâmica e resistência a arrasto. O número "23018" traz informações importantes sobre suas características geométricas, na qual a série "23000" indica uma curvatura projetada para otimizar o desempenho em baixas velocidades de vento, e os dois últimos dígitos, "18", representam uma espessura máxima de 18% da corda. O perfil proporciona estabilidade de sustentação em ambientes de vento instável, como os encontrados em turbinas eólicas (Abdullah; Hussain; Mokhtarian, 2020).

Considerado a baixa velocidade de vento médio na região, as pás foram projetadas com comprimento de 3 metros, de forma a ampliar a área de varredura. Para cada pá da turbina, foram utilizadas sete seções com o aerofólio NACA 23018, espaçadas a uma distância de 40 cm entre si. As seções foram fixadas em uma longarina central, constituída por um tubo retangular de alumínio, que fornece uma estrutura rígida e leve para suportar as forças aerodinâmicas durante a operação. A longarina, por sua vez, está acoplada a uma estrutura treliçada, a qual permite a conexão da pá ao cubo da turbina (Figura 40).

Figura 40 – Estrutura das pás



Fonte: *Plus Energy* (2020)

As pás foram revestidas com chapas de alumínio leve e resistente, fixadas com rebite e cola adesiva de alta aderência (Figura 41). Na instalação, o rotor da turbina foi inclinado em torno de 7 graus em relação à torre, para evitar que o empuxo aproxime as pontas das pás da torre.

Figura 41 – Pás revestidas com chapa de alumínio



Fonte: *Plus Energy* (2020)

A análise da taxa de TSR para as três pás considerou não apenas a velocidade da ponta, mas também a carga inercial de sustentação no eixo. Como o aerogerador foi projetado para operar em baixas velocidades de vento, a escolha de um aerofólio com corda mais larga mostrou-se eficiente.

3.3.5 Eficiência Teórica do Sistema Eletromecânico

Nesta seção, foram considerados os rendimentos teóricos dos sistemas de direcionamento (*yaw*), das pás, do sistema primário de multiplicação, *da gearbox*, e a eficiência do gerador, para estimar a eficiência global do sistema construído.

Para o sistema de *yaw*, estimou-se um rendimento de conversão de 85%. De acordo com (Gipe, 1995, *apud* Terciote, 2002) a eficiência comercial é de 95% para grandes aerogeradores. O rendimento estimado do rotor, com as perdas mecânicas nos rolamentos e folgas nos acoplamentos das pás, foi estimado em 90%. O rendimento global do sistema eletromecânico de geração foi estimado conforme a Equação 6:

$$\eta = (\eta_g * \eta_{cx} * \eta_{tcp} * \eta_r * \eta_y) \quad (6)$$

$$\eta = 0,93 * 0,91 * 0,97 * 0,90 * 0,85$$

$$\eta = 0,59$$

onde:

η_g : rendimento do gerador;

η_{cx} : rendimento de caixa multiplicadora (*gearbox*);

η_{tcp} : rendimento da transmissão coroa-pinhão (rotor - *gearbox*);

η_r : rendimento do rotor;

η_y : rendimento do *yaw*.

Considerando o rendimento global (η) de transmissão e geração do sistema construído igual a 59%, e o coeficiente de potência aerodinâmica do rotor (C_p) igual a 33% (valor máximo de 59,3%, definido por Betz). O valor do coeficiente de potência aerodinâmica do rotor de 33% foi arbitrado de forma conservadora em relação aos valores típicos dos aerogeradores comerciais utilizados, que possuem coeficiente potencial máximo de 45%. A potência máxima estimada de geração para diferentes velocidades de vento, está apresentada na Tabela 5.,

Tabela 5 – Dados de potência real de geração estimada

Velocidade do vento (m/s)	Potência (W)
0,5	0,41
1,0	3,29
1,5	11,09
2,0	26,29
2,5	51,36
3,0	88,74
3,5	140,92
4,0	210,35
4,5	299,51
5,0	410,85
5,5	546,84
6,0	709,94
6,5	902,63
7,0	1127,36
7,5	1386,60
8,0	1682,82
8,5	2018,48
9,0	2396,05
9,5	2817,99
10	3286,76

Fonte: o autor

Os valores estimados de potência gerada, para diferentes classes de vento, correspondem à energia gerada nas condições para as quais a turbina foi projetada. Os valores em negrito indicam a estimativa de potência a partir da velocidade de vento de *cut-in* de 2 m/s. Embora a potência nominal do gerador seja de 5 kW, essa capacidade não é totalmente aproveitada devido às limitações mecânicas e de controle do projeto.

3.4 SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE

O principal controle de conversão de energia no aerogerador ocorre por meio dos sistemas de *yaw* e *pitch*, que ajustam automaticamente o posicionamento da turbina para captar a máxima energia possível. Os sensores e controladores garantem o ajuste necessário, conforme apresentado no Capítulo 2.

3.4.1 Sistema de Yaw

O sistema de *yaw* move a nacela, por meio de um motor CC, em torno de uma cremalheira fixa na torre, conforme Figura 42. Para controlar a rotação, foram implementados três sistemas de redução de velocidade:

- Sistema primário: a redução ocorre na caixa redutora acoplada ao motor, com uma relação de 50:1;
- Sistema secundário: a caixa redutora transmite a força para a engrenagem pinhão que rotaciona na cremalheira fixa, com redução da velocidade em uma relação de 10:1;
- Sistema terciário: a cremalheira, fixada no poste, conecta-se à nacela por meio da engrenagem do sistema secundário, com uma relação de 5:1.

A redução total alcançada é 2500:1, ou seja, 2500 rotações do motor resultam em uma rotação da nacela em torno do próprio eixo.

A medição da posição da nacela é feita com um potenciômetro (resistor variável) conectado ao eixo de rotação. À medida que a nacela gira, o potenciômetro acompanha o movimento. A leitura de tensão na saída do potenciômetro permite calcular a posição angular da nacela. Os dados são lidos por um microcontrolador

ESP32¹, com calibração feita na posição zero do norte geográfico. A resistência elétrica aumenta conforme a nacele se move, e a variação é mapeada para determinar a direção, em graus (função *MAP* no código do sistema, em linguagem C)

Em conjunto à operação de direcionamento, opera o freio do *yaw*, que é um freio de disco projetado para travar a nacele na posição desejada. Quando a nacele precisa se reposicionar, o freio abre, permitindo o movimento. Após o posicionamento, o freio se fecha, travando a nacele na nova posição, para evitar que o vento movimente o sistema.

O controle do ângulo de *yaw* é realizado com base na posição atual da nacele em relação à direção predominante do vento, para determinar o sentido do movimento e a correção necessária. O sistema de controle recebe os dados de vento da biruta e anemômetro, e mapeia durante 5 minutos (pela função *MAP*) a direção de vento predominante.

A correção do posicionamento é realizada com o acionamento gradual do motor, sendo que nos primeiros 25% do deslocamento angular, a velocidade aumenta até atingir um limite predeterminado - em função do motor utilizado - e assim se mantém constante até completar 75% do trajeto. Nos últimos 25% do trajeto, o sistema desacelera progressivamente para parar a nacele de forma amortecida e reduzir erro no posicionamento. O movimento angular em torno da cremalheira tem limitação em 360 graus de rotação no avanço e no retorno em relação ao ponto de referência (norte geográfico). Foram deixados 60 cm adicionais nos cabos de energia que saem da nacele, para garantir folga para a movimentação completa da nacele no sistema de *yaw*.

¹ ESP32 é um microcontrolador utilizado para projetos de IoT (Internet das coisas), robótica e diversas aplicações de automação que envolve conexão com *internet*, *wifi* e *bluetooth* (Makiyama, 2023).

Figura 42 – Sistema de direcionamento da nacele (*yaw*)



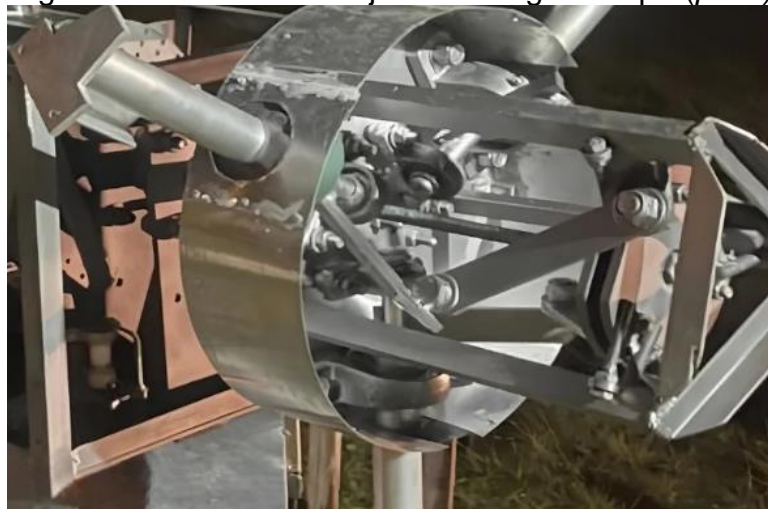
Fonte: *Plus Energy* (2021)

O sistema de engrenagem e cremalheira foi construído em aço de alta resistência, com furos para redução de peso e aproveitamento de material. A engrenagem menor é acoplada ao eixo do sistema motor e a cremalheira (peça maior) é soldada e parafusada ao poste.

3.4.2 Sistema de *Pitch*

O sistema de controle de *pitch* funciona com um fuso de 20 mm que avança e recua no interior do cubo. O movimento realizado é transmitido a uma peça chamada tricentro, que se movimenta axialmente, e movimenta simultaneamente três braços de alavanca e os eixos das três pás, que estão acoplados por mancais e rolamentos ao cubo. O movimento do fuso tem seu avanço e recuo realizado com o uso de um motor CC, localizado na nacele. A Figura 43 ilustra o sistema desenvolvido.

Figura 43 – Sistema de ajuste de ângulo de pá (*pitch*)



Fonte: *Plus Energy* (2020)

O movimento do fuso tem uma redução de 50:1, e é acoplado a uma barra roscada de 18 mm de diâmetro, com passo de rosca de 2 mm. Com uma rotação de 1.500 rpm, o motor movimenta a barra roscada, que desloca o fuso axialmente. O movimento ajusta o ângulo das pás na faixa de 0 a 45 graus, conforme a disponibilidade de vento.

A medição da posição de *pitch* é realizada por um potenciômetro, conectado a uma engrenagem que acompanha o movimento do fuso. O potenciômetro converte variações de resistência em sinais lógicos, que são processados pelo controlador ESP32. O sistema integrado de *pitch* permite ao aerogerador ajustar continuamente o ângulo das pás e melhorar a relação do coeficiente de potência conforme a velocidade de vento.

3.4.3 Medições de vento

Acima da nacelle foi instalada uma estação de medição de vento (Figura 44), composta por um anemômetro de concha, que mede a velocidade do vento com um leitor de rotação, e uma biruta, equipada com um *encoder* rotativo que utiliza o código *Gray* para medir a direção do vento. O *encoder* da biruta tem resolução de 5 bits (32 posições), o que permite para cada bits do *encoder* da biruta, a correção da direção de *yaw* em 11,25 graus de deslocamento angular.

Figura 44 – Estação meteorológica do aerogerador



Fonte: *Plus Energy* (2022)

Os dados de direção e velocidade do vento são registrados em um banco de dados na memória do microcontrolador ESP32, e são utilizados pelo sistema supervisorio para o controle de *pitch* e *yaw*, conforme descrito na próxima seção. A estação também possui uma lâmpada de sinalização e uma câmera de monitoramento, para inspeções visuais remotas do entorno da torre.

3.4.4 Sistema Supervisorio

O sistema supervisorio foi projetado para monitorar as informações de velocidade e direção do vento, rotações do eixo lento - antes da caixa multiplicadora, e do eixo rápido - no gerador, tensão dos sistemas, temperatura, e condições operacionais de *yaw* e *pitch*, entre outras. O sistema permite a visualização dos dados em tempo real, o que possibilita a definição dos modos de operação, classificados como:

- *Offline*: aerogerador totalmente desligado e travado;
- *Online*: aerogerador em operação, com geração de energia.
- *Idle*: aerogerador com orientação para a direção do vento, porém sem produção de energia.

A interface humano-máquina (IHM) desenvolvida demonstrada na Figura 45.

Figura 45 – IHM do sistema supervisorio



Fonte: Plus Energy (2022)

A interface IHM exibe os dados do aerogerador para supervisão. Em caso de falhas de sensores e comandos, a operação pode ser alternada para o modo manual, para ativar o modo *Idle*. A comunicação ocorre via Wi-Fi, com um roteador na base da torre, que está conectado ao ESP32. O acesso à interface acontece via navegador e pelo IP do ESP32.

A automação e comunicação do sistema foram programadas em Linguagem C, com rotinas operacionais no ESP32, que também atua como servidor. Esse servidor hospeda uma interface *web* em HTML e *JavaScript*, ao unir o código C com a interface. A IHM realiza requisições ao servidor do ESP32 para exibir informações. A interface usa *JavaScript* para a interação, HTML para estruturação, e CSS para o visual. Essas particularidades permitem o acesso ao supervísório por meio de dispositivos móveis, como telefones celulares e *tablets*. O *script* programado utiliza bibliotecas nativas e customizadas para integrar os sensores, que coletam dados em tempo real e os armazenam, para serem analisados pelas funções implementadas e requisitados pelo servidor para visualização.

3.5 PRINCIPAIS RESULTADOS DO PROJETO E DISCUSSÃO

A construção do aerogerador no Campus Araranguá ocorreu no período de 2020 a 2022. A primeira versão foi implementada em 2021, mas logo no início da sua operação, esse primeiro sistema foi severamente danificado durante a passagem de um ciclone. Alguns registros e informações desta primeira versão do projeto estão apresentados no Apêndice B. Diante dessa ocorrência, o projeto do aerogerador foi aprimorado, visando a obtenção de um sistema mais resistente e com melhor desempenho.

Os principais aprimoramentos realizados foram:

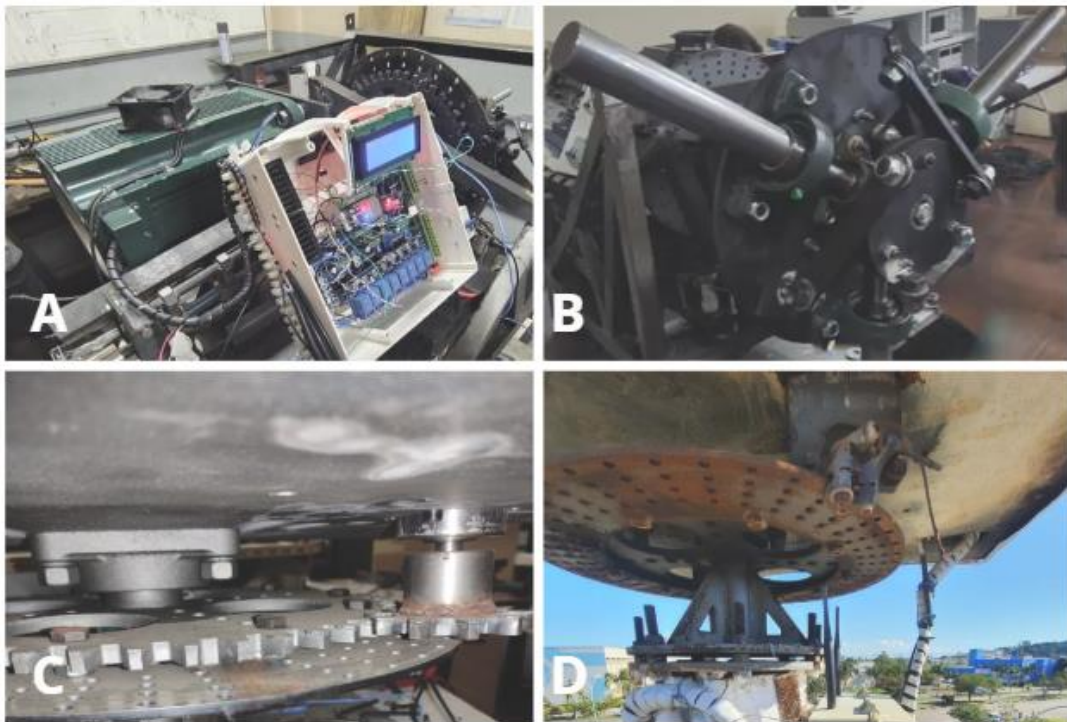
- Sistema de geração: o gerador, que era uma adaptação de um alternador de automóvel com 2 kW de potência, foi substituído por uma máquina síncrona comercial de 5 kW, melhorando o rendimento e aumentando a capacidade de geração.
- Turbina: o número de pás foi reduzido de quatro para três, e o comprimento das pás foi reduzido de quatro metros para três metros. Essas alterações proporcionaram compensação nos esforços de movimentação da nacela, devido à redução de peso da turbina, e também do torque no sistema de *pitch*.

Além disso, a raiz das pás foi reforçada, deixando a estrutura final mais resistente a ventos extremos.

- Sistema de direcionamento (*yaw*): foi implementado o mecanismo composto por uma cremalheira fixa e um pinhão motorizado, uma configuração similar às utilizadas nos aerogeradores comerciais, que proporcionou melhor desempenho no alinhamento correto da nacele. O sistema foi reforçado, com peças mais resistentes. Também foi implementado o sistema de freio a disco, que deixou a estrutura menos sujeita a oscilações de alinhamento durante turbulências.
- Sistema de *pitch*: a estrutura mecânica foi totalmente alterada, com um sistema mais robusto constituído por um único motor, fixo na nacele. Um fuso no eixo do motor movimenta braços de alavanca conectados aos eixos das três pás, fazendo o ajuste do ângulo de ataque simultaneamente. Além de ter sido construído um sistema com maior resistência mecânica, houve a diminuição na quantidade de motores e de comandos para o acionamento de *pitch*, e melhoria na precisão dos ajustes.
- Medição de vento: A instalação de um anemômetro e uma biruta sobre a nacele melhorou significativamente a precisão e confiabilidade dos dados de vento processados pelo sistema de controle do aerogerador. Anteriormente, os instrumentos ficavam em uma torre separada, localizada a 20 metros de distância da torre do aerogerador. Os dados de velocidade e direção do vento eram transmitidos de forma analógica por cabos subterrâneos até o quadro de controle, no pé da torre. A distância afetava a comunicação e o funcionamento dos sistemas de controle. A melhoria da comunicação e da qualidade dos dados processados permitiu ajustes mais rápidos e precisos dos sistemas de *pitch* e *yaw*.

A Figura 46 apresenta alguns detalhes construtivos dos mecanismos desenvolvidos.

Figura 46 – Principais melhorias implementadas no aerogerador



A - Eletrônica de comando dos sistemas *pitch* e *yaw*.

B - Sistema mecânico de ajuste de ângulo de pá (*pitch*).

C - Cremalheira e engrenagem móvel do sistema de orientação (*yaw*).

D - Fixação da nacela na torre e freio do sistema de orientação (*yaw*).

Fonte: *Plus Energy* (2022)

A Figura 47 apresenta uma foto do aerogerador instalado, na qual também aparece (na base do aerogerador) a estrutura onde está instalado o quadro de comando.

Figura 47 – Aerogerador experimental



Fonte: *Plus Energy* (2022)

Durante o desenvolvimento da segunda versão do aerogerador, o sistema de controle também foi modificado. A estrutura inicial era composta por uma rede de microcontroladores. Na segunda versão, apenas um controlador (ESP32) faz o processamento de dados dos instrumentos e gera os comandos para os dispositivos. Além disso, também foi desenvolvido o sistema supervisor, que permite a visualização em página *web* e acesso remoto em tempo real para monitoramento e controle manual de operação do aerogerador. O controle manual realizado pelo operador no sistema supervisor permite atuação em emergências e segurança, e também pode ser usado para fins de demonstração do projeto *Plus Energy*.

O Quadro 1 apresenta um resumo dos principais resultados do projeto, em relação aos aspectos construtivos e operacionais do aerogerador.

Quadro 1 – Resultados Gerais

Item	Resultado
Pás	As pás foram fabricadas com o perfil NACA 23018, devido a sua alta resistência aerodinâmica em diferentes velocidades de vento. O rendimento de conversão foi estimado em 30%, em comparação aos 40% mencionados na literatura, para torres eólicas comerciais.
Sistema primário de multiplicação	Utiliza um sistema composto por coroa, pinhão e corrente para transmitir a rotação de entrada na <i>gearbox</i> . O rendimento foi estimado em 97%, com base na fundamentação teórica para esses sistemas. A mecânica do conjunto requer melhorias para suportar altas relações de torque sem risco de escorregamento.
Gerador e caixa multiplicadora (<i>gearbox</i>)	O gerador é do tipo síncrono, de ímãs permanentes, com rendimento estimado de 93%. A <i>gearbox</i> consiste de uma caixa multiplicadora de eixos paralelos (adaptada de uma caixa redutora), que possui rendimento de 91% na conversão eletromecânica.
Sistema de <i>pitch</i>	Proporciona o movimento de 0 a 45 graus das pás, em torno de seu eixo longitudinal. O rendimento previsto é de 90%, em comparação com os 95% das máquinas comerciais.
Sistema de yaw	Permite rotacionar a nacela, com 11,25° por movimento (360 ° divididos em 32 posições angulares). Há necessidade de melhorias devido a folgas e escorregamento.
Sistema de medição de vento	O sistema está instalado sobre a nacela, e é composto por um anemômetro de concha e uma biruta. Mede as grandezas de velocidade e direção do vento, com sensor de rotação, <i>encoder</i> e disco <i>Gray</i> .
Sistema supervisor	Permite a visualização web dos dados de vento e operacionais da torre, possibilitando o monitoramento e a manipulação dos modos de operação, além de viabilizar a supervisão remota e comandos para demonstração da operação.

Fonte: o autor

O aerogerador operou por um período de 4 meses, no qual foi possível a realização de testes de geração, avaliação da resistência a condições climatológicas severas, bem como do desempenho dos sistemas de controle voltados à segurança operacional. Durante o período de operação, a energia gerada foi armazenada em baterias e empregada em cargas experimentais no laboratório do projeto, bem como na abertura da XII Semana Acadêmica da Engenharia de Energia (SAENE, 2022).

Do ponto de vista dos objetivos de aplicação acadêmica e didática, o projeto proporcionou a seus participantes a experiência prática em processos mecânicos,

elétricos e eletrônicos, incluindo fabricação, montagem, programação, e dimensionamento, de forma multidisciplinar.

O projeto também contribuiu em atividades de ensino, pesquisa e extensão, dentre os quais pode-se destacar:

- Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "Percepção da comunidade discente do campus UFSC Araranguá em relação à Torre Eólica Experimental" (Gonçalves, 2024). Esse trabalho registrou o apoio da comunidade acadêmica ao projeto do aerogerador e o incentivo a novos projetos práticos no Campus.

- Apresentação do aerogerador em parceria com o projeto de extensão "Visitas Guiadas à UFSC Araranguá". Há uma estimativa de visita de mais de mil estudantes de escolas da região ao aerogerador, por ano, com sua demonstração e explicações sobre energias renováveis.

- Projeto de pesquisa intitulado "Tecnologias de automação e comunicação aplicando conceitos das Redes Elétricas Inteligentes e Internet das Coisas em uma unidade prosumidora de energia". Esse projeto teve como base a construção do aerogerador, e foi executado de 20/04/2020 a 20/04/2023.

Ainda em relação aos objetivos didáticos, pode-se destacar a criação do grupo *Plus Energy*, que teve sua origem no projeto do aerogerador. O grupo tornou-se um projeto permanente do Curso de Engenharia de Energia da UFSC/Araranguá, com equipe que é renovada a cada ano, por meio de processo seletivo. A *Plus Energy* mantém o trabalho com o aerogerador, permitindo que mais estudantes do Campus tenham acesso ao projeto e atuação prática na área, além de manter a relação com a comunidade externa.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e construção de um aerogerador, instalado no Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Araranguá (SC).

O aerogerador foi projetado para ventos de baixa velocidade, considerando especialmente a velocidade média de vento local em torno de 2,5 m/s. Esse parâmetro influenciou diretamente no projeto das pás do aerogerador (perfil e tamanho).

O rendimento global, incluindo as conversões mecânicas e elétricas dos sistemas, é estimado em 59%. Com isso, a expectativa é de que a operação do aerogerador aconteça na faixa de 30 à 3200 W, aproximadamente com capacidade prevista de produzir até 164,43 kWh de geração de energia anual.

O projeto do aerogerador contemplou mecanismos presentes em aerogeradores de grande porte utilizados em parques eólicos, como o sistema de direcionamento (*yaw*) e de controle do ângulo de ataque das pás (*pitch*). Também incorpora um sistema de medição de vento, controle automático e um sistema supervisor.

As soluções incorporadas a partir de problemas ocorridos em uma primeira versão do aerogerador permitiram a construção de um sistema robusto e resistente às intempéries, que são comuns na região onde está instalado. Além disso, a capacidade de geração foi ampliada e os sistemas de medição, controle e comunicação foram melhorados.

Do ponto de vista acadêmico, a construção do aerogerador possibilitou aprendizado a dezenas de estudantes que colaboraram com o projeto *Plus Energy*. As habilidades desenvolvidas envolvem o planejamento de atividades, gestão de projeto, conhecimento real da engenharia no desenvolvimento dos sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos para a geração de energia, criatividade em improvisar para produzir solução, trabalho em equipe, experiência técnica na construção de estruturas para geração de energia e conhecimentos para futuros desafios profissionais. A estrutura montada, incentiva novos projetos de ensino com a demonstração prática de sistemas de geração, pesquisas para desenvolvimento e inovação, e extensão.

4.1 CONTINUIDADE DO PROJETO

Até o momento de conclusão deste documento, o aerogerador não estava operacional, o que impossibilitou medições e análise de potência e energia gerada. Durante um período de testes, a energia gerada pelo sistema foi retificada (por meio de um conversor CA-CC) para carregar baterias, que mantinham a alimentação dos sistemas de controle e os motores de *yaw* e *pitch* do próprio aerogerador.

A continuidade do projeto envolve a construção de um ambiente para armazenamento de baterias, controladores de carga e inversores para converter a energia armazenada nas baterias em corrente alternada, para o uso em cargas isoladas da rede.

No sistema de comunicação, sugere-se o desenvolvimento de um *datalogger* para coleta e armazenamento de dados de vento, com um banco de dados que permita acesso remoto via página *web*.

No aspecto construtivo, sugere-se o estudo de materiais mais leves para substituição das pás, como fibra de vidro ou compósitos ecológicos. Uma nova turbina pode contribuir para redução de peso e desgaste nos sistemas de *pitch* e *yaw*.

Com a implantação das melhorias previamente citadas, e com o aerogerador em operação, outros trabalhos poderão abordar estudos de qualidade de energia gerada, potencial eólico do local e avaliação do rendimento real do sistema.

4.2 PUBLICAÇÃO

Parte do desenvolvimento deste trabalho foi publicada em um evento científico, conforme segue:

CERUTTI, Alef Julio Schaefer; GRAEBIN, Sullivan; D'AQUINO, Carla de Abreu; PFITSCHER, Luciano Lopes. **Torre eólica experimental para ventos de baixa velocidade**. 9º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, SICTSUL. 2020.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A.; HUSSAIN, S.; MOKHTARIAN, N. **Experimental Investigation of a Leading Edge Rotating Cylinder Effect on NACA 23018 Aerofoil Performance**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. p.9.
- ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim Anual**. São Paulo, (2023). Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 30 ago.2024.
- ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Energia Eólica: os bons ventos o Brasil**. São Paulo, (2024). Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em 10 out. 2024.
- ABEEólica. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual**. São Paulo, vários anos (2014 - 2023). Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 30 ago.2024.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15688. Rede de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. p.158.
- ACHILLES, Sebastian; PÖLLER, Markus. **Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms**. In: *Proceeding of the 4th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Billund*. Anais [...] Billund. 2003. p.9.
- AIRFOIL TOOLS. **NACA 23018 – NACA 23018 airfoil**. (2024). Disponível em: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23018-il>. Acesso em: 15 mar. 2024.
- ANEEL, 2005. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2ª Edição. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005.
- ANEEL, 2019. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída – Resolução Normativa nº 482/2012**. 2019. <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/air2019003srd.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024
- ANELL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015: Altera as Regras para Micro e Minigeração Distribuída e o Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2023. Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 12 dez. 2024
- BOTICCHIO, Guilherme; ROSA DE CASTRO, Leonardo. **Universidade de Taubaté Sistema de Conversão de Energia Mecânica em Elétrica Proporcionado por um Aerogerador**. 2018. p.49. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Aeronáutica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo.
- BRAZ, Evandro Medeiros.; ROSA, Joatan.; AMARAL, Mariana Bamberg. **Engenharia de Fundações de Aerogeradores de Grande Porte**. XII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas (XXII CBPE). 2021.p.8.

BURTON, Tony; JENKINS, Nick; SHARPE, David; BOSSANYI, Ervin. **Wind Energy Handbook**. 1. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. p.642.

CANAL ENERGIA. **Engie e Weg concluem primeiro ensaio do aerogerador nacional**. (2024). Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53278159/weg-planeja-participar-do-mercado-de-geracao-eolica-nos-eua>. Acesso em: 25 jul. 2024.

CASTRO, Rui M. G. **Introdução à Energia Eólica**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, DEEC/Área Científica de Energia, 2009.p.93 Disponível em: http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/Pos_Tecnico/Especializacao_Energia_Eolica_Turmall_2013/Medicao_Anemometrica/Material%20de%20Consulta/Livros/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Energia%20E%C3%B3lica.pdf. Acesso em: 02 mar. 2018.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Atlas Eólica Minas Gerais** (2021). Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/atlas-eolico-mg.pdf>. Acesso em 08 dez. 2024

CERUTTI, Alef Julio Schaefer, GRAEBIN, Sullivan, D'AQUINO, Carla de Abreu, PFITSCHER, Luciano Lopes. **Torre eólica experimental para ventos de baixa velocidade**. 9º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, SICTSUL. 2020.

COSTA, Fernando; MENHEM, Angelo; RAFAEL, Cloves; VIANA, Simone; MIRANDA, Marcos. **Otimização da Operação e Manutenção de Usinas Eólicas Através do Monitoramento e Gestão Integrada de Ativos**. São Paulo: ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, 2016. p.22.

COTESA. **As funções dos componentes dos aerogeradores**. (2023). Disponível em: <https://cotesa.com.br/2023/04/03/as-funcoes-dos-componentes-dos-aerogeradores/>. Acesso em 05 mai. 2024.

CTGAS-ER. **Especialização técnica em energia eólica**. (2010). Disponível em: <http://www.ctgas.com.br/index.php/2012-04-10-19-15-18/especializacao-tecnica-em-energia-eolica>. Acesso em 03 mar. 2024.

ENERGÊS. **Conheça 7 Componentes do Aerogerador**. (2020). Disponível em: <https://energes.com.br/componentes-aerogerador/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Leilões de Energia: Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos**. Nota técnica DEA 10/13, Rio de Janeiro, 2013. p.17.

FERREIRA, Júlio César de Carvalho. **Aplicação do controle vetorial e teoria PQ no controle de aerogeradores conectados à rede elétrica**. 2005. p. 112. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

G.M., Joselin Hebert; S., Iniyan; E., Sreevalsan; S., Rajapandian ***A review of wind energy technologies***. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 11, 1117–1145, 2005. p.29.

GAIBA DE OLIVEIRA, Rodrigo. **Contribuição ao controle de um sistema de geração a velocidade variável utilizando gerador de indução duplamente excitado**. 2009. p.242. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

GODOI, Mauricio. **Governo publica diretrizes para eólica offshore no Brasil - CanalEnergia**. 2022. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53200642/governo-publica-diretrizes-para-eolica-offshore-no-brasil>>. Acesso em: 09 dez. 2024.

GONÇALVES, Naymary Kerllen. **Percepção da comunidade discente do campus UFSC Araranguá em relação a Torre Eólica Experimental**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Santa Catarina

GWEC. Global Wind Energy Council. **Global Wind Report 2024.**, 2024. p.168. Brussels, Belgium. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>. Acesso em: 30 set. 2024.

HAVANNA MOTO PARTS. **Kit Coroa e Pinhão Yamaha Ybr 125 Ybr Factor 125 45/14**. (2024). Disponível em: <https://www.havannamotoparts.com.br/www-havannamotoparts-com-br/kit-transmissao/kit-coroa-e-pinhao/kit-coroapinhao-ybr-03-4514-428-maxx>. Acesso em: 30 mai. 2024.

INDUSTRIALIZAR EM CONCRETO. **Inovação e Sustentabilidade caracterizam a adoção de pré-fabricado em segmentos que avançam no país**. (2016). Disponível em: <https://industrializaremconcreto.com.br/Edicoes/Exibir/inovacao-e-sustentabilidade-caracterizam-a-adoacao-de-pre-fabricado-em-segmentos-que-avancam-no-pais>. Acesso em: 28 maio 2024.

JUNIOR, Edisio Alves de Aguiar. **Análise Básica de operação do Gerador de Dupla Alimentação**. 2007. p.85. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LIMA JÚNIOR, Arnold Almeida. **Desenvolvimento de uma plataforma web para análise de performance de aerogeradores**. 2022. p.42. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

LISANDRO, Camila Marchetto; MALDANER, Silvana; TEIXEIRA, Marianna Batista. **Simulação Aerodinâmica de Uma Turbina Eólica de Pequeno Porte**. XXVIII CREEM, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS. 2022. p.8.

MAKIYAMA, Marcio. **Placa ESP32: O que é, para que serve e uso!**. (2023). Disponível em: <https://victorvision.com.br/blog/placa-esp32/#comments>. Acesso em: 15 ago. 2024.

MARDUQUE, Max. **Conheça os componentes de um aerogerador.** (2018). Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/conhe%C3%A7a-os-componentes-de-um-aerogerador-max-marduque/>. Acesso em 25 jul.2024.

MARQUES, Jeferson. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação.** 2004 p.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, 2008. p.13.

MELLO, C. **Capacidade instalada de energia eólica no Brasil deve quase dobrar até 2030.** 2024. Disponível em: <https://climainfo.org.br/2024/01/29/capacidade-instalada-de-energia-eolica-no-brasil-deve-quase-dobrar-ate-2030/>>. Acesso em: 10 dez. 2024.

MISHNAEVSKY JR, Leon; BRANNER, Kim; NORGAARD PETERSEN, Helga; BEAUSON; MCGUGAN, Malcolm; F.SORENSEN, Bent. **Materials for Wind Turbine Blades: An Overview.** Material v.10 n.11, MPDI, 2017. p.24. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320965801_Materials_for_Wind_Turbine_Blades_An_Overview. Acesso em: 15 ago. 2024.

MORAIS, George Lopes. **Projeto aerodinâmico de pás de uma turbina eólica.** 2018. p.49. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Caraúbas, Rio Grande do Norte.

MOURA, Sebastião. **Engenheiros formados na USP desenvolvem tecnologia de energia eólica inédita no Brasil.** 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/universidade/engenheiros-formados-na-usp-desenvolvem-tecnologia-de-energia-eolica-inedita-no-brasil/>. Acesso em: 11 dez. 2024.

OFICFERREIRA. **Gerador 5kw Para Roda D'água Roda Pelton E Turbina Eólica.** Disponível em: https://www.oficferreira.com.br/MLB-1587199333-gerador-5kw-para-roda-dagua-roda-pelton-e-turbina-eolica-_JM. Acesso em: 16 fev. 2024.

OLIVEIRA, Clóvis Bôsko Mendonça, DE ARAÚJO, Renato Samuel Barbosa. **Guia do Setor Eólico do Rio Grande do Norte.** Mercado – prospecção – construção e montagem, Operação e manutenção – Barreiras e Perspectivas. 2015. p.206.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede.** 2020. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em: 16 fev. 2024. Acesso em: 11 dez. 2024.

PEREIRA, Heverton Augusto; CUPERTINO, Allan; SOUZA, T.M; OLIVEIRA, R. R. S.; RESENDE, J.T.; SILVA, Selênio Rocha. **Analysis of topologies of synchronous machine with full converters applied in wind power.** In: Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference On. 2013. p.7.

PEREIRA, Heverton Augusto; LIU, Silas Yunghwa; RAMOS, Manoel Candido de Lima; MENDES, Victor Flores; SILVA, Selênio Rocha. ***A comparative analysis of wind turbine technologies in focus on the grid integration***. In: Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on. 2010. p.6.

PESTANA, Diogo Alexandre Correia. **Sistemas estruturais para torres eólicas**. 2016. p.140. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade da Madeira, Funchal, Portugal.

PLUS ENERGY. (2022). **Partes e peças de Modelagem**. Centro de Ciência, Tecnologia e Saúde, UFSC, campus Araranguá. Documento interno.

REIS, Pedro. **Como funciona um Aerogerador**. (2016). Disponível em: <https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>. Acesso em: 23 set. 2024.

RODRIGUES, Michel Ney de Almeida Barroso. **Modelagem e Controle Robusto de Sistema de Pitch de Turbinas Eólicas**. 2022. p.82. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Ceará, Fortaleza, Ceará.

ROMAGNOLE. **Poste de concreto circular tipo R distribuição**. 2021. Disponível em: <https://www.romagnole.com.br/produto/artefatos-de-concreto/poste-de-concreto-circular-tipo-r-distribuicao>. Acesso em: 10 jul. 2024.

REXROTH. **Drive & Control Technology for Wind Turbines**. Bosch Group, 2010. Disponível em: https://airlinemedia.airlinehyd.com/Literature/power_generation/Drive_and_Control_Technology_for_Wind_Turbines.pdf. Acesso em: 08 dez. 2024.

REXROTH. **Rexroth Drive & Control for Wind Turbines**. Bosch Group, 2012. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=_vqRRm3V_yk. Acesso em: 08 dez. 2024

SANTOS, Guilherme. Vianna. **Sistemas de controle aplicados a aerogeradores síncronos com conversores Back-to-Back**. 2015. p.158. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

SANTOS, Priscila Emanuele; ARAÚJO, Francisco José. **O Desenvolvimento da Energia Eólica no Brasil: Uma Revisão Bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação. Periodicorease.pro.br, 24 jul. 2023. p.12.

SANTOS, Nathália. **Energia eólica no Brasil: oportunidades, desafios e potencial econômico**. 2024. Disponível em: <https://opetroleo.com.br/energia-eolica-no-brasil-oportunidades-desafios-e-potencial-economico/>. Acesso em: 08 dez. 2024.

SEW-EURODRIVE. **Motorreductores de veios paralelos F..DR..|SEW-EURODRIVE**. (2024). Disponível em: https://www.sew-eurodrive.pt/produtos/motorreductores/motorreductores_standard/motorreductores_de_

veios_paralelos_fdr/motorreduutores_de_veios_paralelos_fdr.html. Acesso em: 06 mar. 2024.

SILVA, Selênio Rocha. “**Tecnologia em Aerogeradores**”. Curso de Especialização em Energia Eólica. Universidade Federal de Minas Gerais Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, Belo Horizonte, 2013. p.58.

SOARES, Emerson de Lacerda. **Sistemas de Conversão de Energia Eólica com conexão à Rede monofásica Utilizando Gerador de Indução Duplamente Alimentado**. 2018. p.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba.

TEODORESCU, Remus; LISERRE, Marco; RODRIGUEZ, Pedro. **Grid converters for photovoltaic and wind power systems**. John Wiley & Sons, 2011. p.398.

TERCIOTE, Ricardo. **Eficiência Energética de um Sistema Eólico Isolado**. In *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002*, UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo, 2002. p.7. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100056. Acesso em: 03 set. 2024.

THOMAZ JUNIOR; Celso Rangel. **Desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabe**. 2012. p. 216. Tese (Mestrado em Engenharia Civil Mecânica) – Universidade do Chile, Santiago.

WACHHOLZ, Marta Adélia. **Estudo Sobre a Viabilidade de Alteração da Relação de Transmissão de uma Motocicleta**. 2016. p.43. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, Horizontina, Rio Grande Sul.

WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas de eixo horizontal**. 2007. p.76. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande Sul.

WEG. 2021. **WEG e Engie Brasil Energia concluem instalação do primeiro aerogerador nacional**. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-e-engie-brasil-energia-concluem-instalacao-do-primeiro-aerogerador-nacional>. Acesso em: 10 dez. 2024.

WIND TURBINE BLADES. The Blade Handbook™: **A shared lingo of terms and definitions for wind turbine blades**. Developed by Bladema and KIRT x THOMSEN in LEX, RATZ, EWIC and CORTIR projects mainly funded by EUDP (Energy Technology Development and Demonstration Programme), 2019. p.124.

WINDBOX. **Qual a importância do sistema SCADA para parques eólicos? - Windbox**. Disponível em: <https://windbox.com.br/blog/sistema-scada-para-parques-eolicos/>. Acesso em: 5 jun. 2024.

WindCycle. ***The Evolution of Wind Turbine Technology: Past, Present, and Future***. (2022). Disponível em: <https://windcycle.energy/evolution-of-wind-turbine-technology/>. Acesso em: 5 out. 2024.

WINDPOWER. ***Close Up – Nordex Launches Delta Turbine Series at EWEA***. (2013). Disponível em: <https://www.windpowermonthly.com/article/1169324/close---nordex-launches-delta-turbine-series-ewea>. Acesso em: 20 fev. 2018.

APÊNDICE A – ESTUDO DE VENTO NA REGIÃO DO PROJETO

Esta seção apresenta a base de dados utilizada para estudo da viabilidade de implantação do aerogerador experimental.

Os dados de vento, para 10 metros de altura, foram coletados de um *datalogger* da estação LIDAR (*Light Detection and Ranging*), localizado na Unidade Mato Alto do Campus Araranguá da UFSC, para os meses de abril à dezembro de 2016. Para o cálculo de potência, foi considerada a densidade local do ar igual a 1,192 kg/m³, na temperatura de 25°C e na pressão de 1 atm, e a área varrida pelas pás igual a 28,27 m² (correspondente a uma pá de 3 metros de comprimento). A potência máxima e teórica calculada é apresentada na Tabela 7.

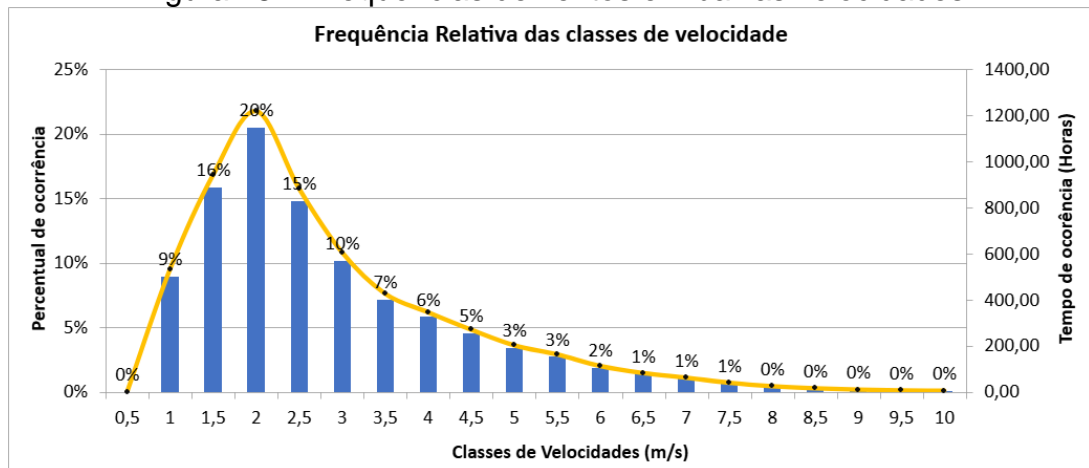
Tabela 6 – Potência teórica estimada extraída do vento

Velocidade de vento (m/s)	P (W)
0,5	2,11
1,0	16,85
1,5	56,87
2,0	134,81
2,5	263,30
3,0	454,98
3,5	722,49
4,0	1078,46
4,5	1535,55
5,0	2106,38
5,5	2803,59
6,0	3639,82
6,5	4627,71
7,0	5779,90
7,5	7109,02
8,0	8627,72
8,5	10348,62
9,0	12284,38
9,5	14447,63
10,0	16851,01

Fonte: Cerutti; Graebin (2020)

O potencial eólico obtido pela estação LIDAR indicou que as velocidades de vento mais frequentes variam entre 1,5 e 2,5 m/s (Figura 49), possibilitando a construção de uma torre eólica experimental para baixas velocidades.

Figura 48 – Frequências de ventos em baixas velocidades



Fonte: Cerutti; Graebin (2020)

A curva de tendência mostra um aumento na frequência das classes de baixa velocidade de vento e uma redução nas velocidades acima de 3 m/s. Essa queda não impede a operação em velocidades mais altas, desde que as condições garantam a segurança da máquina. Os valores médios e predominantes estão na Tabela 8.

Tabela 7 – Parâmetros de dados de vento

Dados Mensurados

	Velocidade (m/s)	Direção (°)	Densidade de Potência (W/m ²)
Média	2,5	170,35	10,48
Frequente	2,00	78,75	4,77

Fonte: Cerruti; Graebin (2020)

A velocidade média do vento local é de 2,5 m/s, vindo da direção de 170,35° em relação ao norte magnético, ou seja, do sul-sudeste. O vento predominante, no entanto, ocorre por um período de dois meses, principalmente na direção leste-nordeste, com uma velocidade média de 2 m/s.

APÊNDICE B – PRIMEIRA VERSÃO DO PROJETO

O primeiro protótipo do aerogerador foi projetado com quatro pás de alumínio, de 4 metros (Figura 50), com a mesma estrutura de pá da versão atual, reforçadas internamente com uma longarina tubular retangular e com perfis aerodinâmicos fixados. As pás eram conectadas à estrutura por um encaixe rápido de aço soldado a uma barra de sustentação.

Figura 49 – Turbina de quatro pás



Fonte: *Plus Energy* (2021)

O acoplamento da turbina eólica no cubo foi realizado por ancoragem e utilização de cordas para ajudar na regulagem de balanço da estrutura (Figura 51).

Figura 50 – Instalação da turbina eólica



Fonte: *Plus Energy* (2021)

A nacele era compacta e contava com um alternador de automóvel para geração de energia, um freio hidráulico de motocicleta para o sistema de direcionamento, e um cubo com aproximadamente metade do diâmetro do modelo atual. O controle de *pitch* das pás era individual e acionado por meio de motores que possibilitavam ajustes angulares de até 45 graus. A Figura 52 apresenta mais imagens da primeira versão do projeto.

Figura 51 - Primeira versão da torre experimental



Fonte: Plus Energy (2021)

A estrutura inicialmente proposta apresentava fragilidades, como folgas e escorregamentos mecânicos. Além disso, a estrutura não era resistente o suficiente para suportar ventos extremos. Poucos dias após a instalação e o início de operação, a estrutura foi severamente danificada por um ciclone, com a queda das pás, rompimento do sistema de *pitch* e quebra da caixa redutora do sistema de direcionamento (Figura 53).

Figura 52 – Danos estruturais na primeira versão do projeto



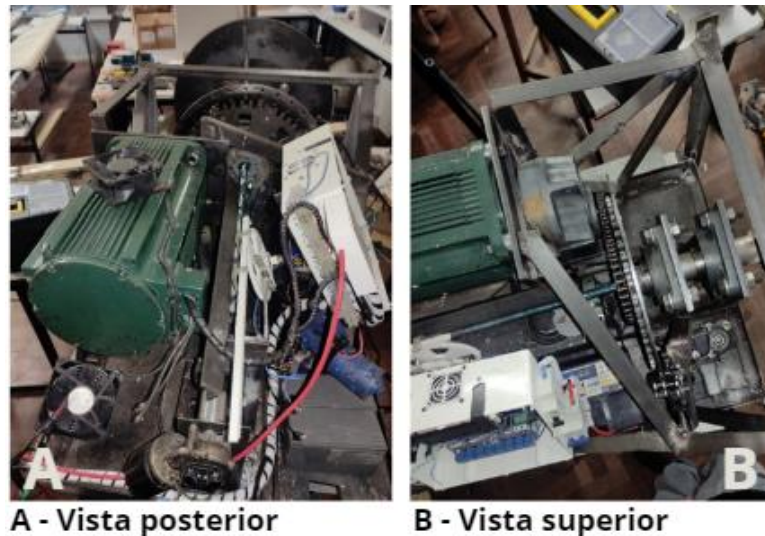
Fonte: *Plus Energy* (2021)

O desenvolvimento da segunda, e atual, versão do aerogerador foi iniciado imediatamente após o evento supracitado, com os aprimoramentos mencionados no trabalho.

APÊNDICE C – MONTAGEM DO AEROGERADOR ATUAL

A fabricação dos componentes foi realizada em duas salas (Laboratório do projeto *Plus Energy* e Laboratório de Ensino de Energia Elétrica). A nacelle (Figura 54) foi construída utilizando processos como usinagem e soldagem, além da montagem dos sistemas descritos no trabalho (*yaw* e *pitch*) e acoplamentos (eixo do rotor da turbina, gerador, *gearbox*, motor na caixa redutora do sistema de *yaw*, entre outros).

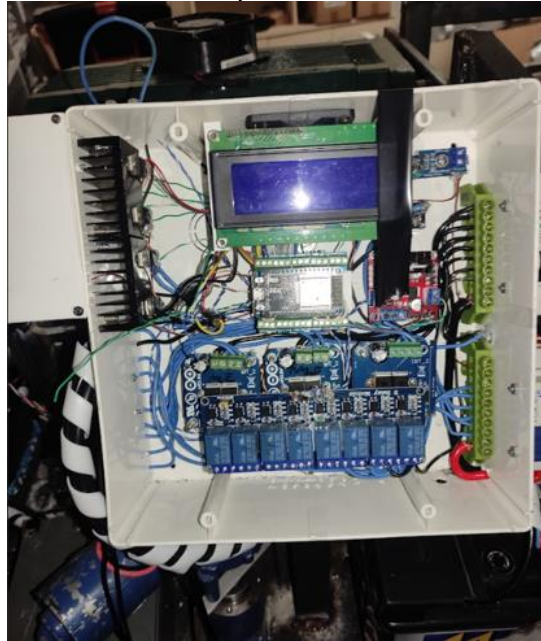
Figura 53 – Nacelle com o sistema eletromecânico e de controle montados



Fonte: *Plus Energy* (2022)

Um microcontrolador ESP32 processa e armazena dados meteorológicos e de geração de energia e gera comandos para ajuste de *yaw* e *pitch*, além de diretivas de segurança. Também são utilizadas três unidades de controladores Arduino, que fazem a interface entre o ESP32 e os sistemas de medição e controle, e de visualização em display. Conectados aos microcontroladores estão relés (acionadores dos motores de *yaw* e *pitch*), módulo de potência (ajuste da velocidade dos motores com controle de PWM), transistores (controle do fluxo de corrente elétrica), medidores e sensores, dissipadores térmicos, e disjuntores para ligar e desligar o sistema de controle, durante inspeções e manutenções (Figura 55).

Figura 54 – Eletrônica de potência do sistema de controle



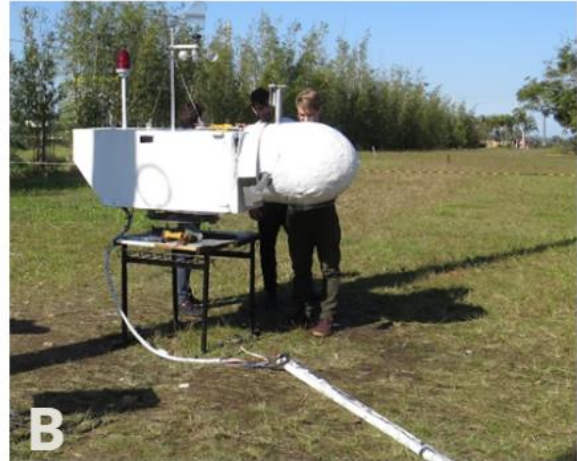
Fonte: *Plus Energy* (2022)

A nacele foi levada para campo para ajustes e acabamentos finais, conforme Figura 56.

Figura 55 – Nacele em campo para ajustes finais



A - Durante os trabalhos



B - Finalizando os trabalhos

Fonte: *Plus Energy* (2022)

A instalação da nacele foi realizada com caminhão Munck, com cesto guarda corpo, do mesmo tipo utilizado para manutenção de redes elétricas (Figura 57).

Figura 56 – Instalação da nacele



Fonte: *Plus Energy* (2022)

O acoplamento da nacele foi realizada com a utilização de parafusos e porcas travantes que asseguram resistência a tração e arrasto na estrutura montada. A base que suporta a nacele teve sua face preparada superficialmente para facilitar o encaixe das furações.

A Figura 58 apresenta as pás, reduzidas para três metros de comprimento em relação à primeira versão, antes da instalação.

Figura 57 – Pás do aerogerador



Fonte: *Plus Energy* (2022)

As pás foram instaladas individualmente, uma a uma, por meio de ancoragem por corda e acoplamento rápido ao cubo, conforme Figura 59. Foi utilizado um encaixe mecânico que acopla as estruturas (pás e cubo) com seis parafusos por pá.

Figura 58 – Instalação das pás

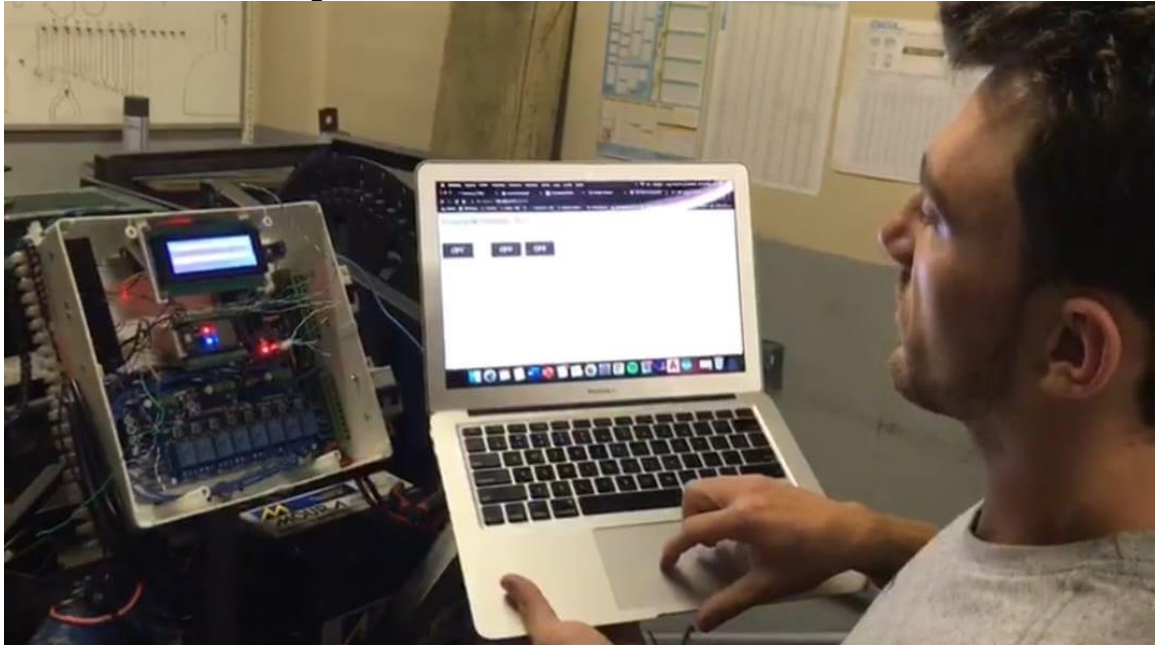


Fonte: *Plus Energy* (2022)

Diversos materiais e serviços utilizados no projeto foram provenientes de doações e apoio de empresas. Dentre tais, destaca-se: Industrial Pagé – indústria do mercado agrícola (doação de chapas de aço, *gearbox* e serviços de corte a *laser* das engrenagens e estrutura da nacele); Engetom – empresa do ramo de construção civil (doação do poste de concreto usado como torre, componentes elétricos, estruturas metálicas, e serviços de perfuração do solo e instalação do poste), Coopera – cooperativa de eletrificação (doação de cabos, quadro de comando e componentes elétricos), e Retífica de Motores Teixeira (doação de baterias). Registra-se o agradecimento a essas empresas, pela viabilização da construção do aerogerador.

Por fim, em especial, registra-se o agradecimento aos acadêmicos do Curso de Engenharia de Energia que participaram do projeto: André Valerim de Freitas, pelo desenvolvimento do sistema supervisor, e Alef Júlio Schaefer Cerutti, pelo desenvolvimento da automação dos sistemas de controle (Figura 60) e colaboração na construção do aerogerador.

Figura 59 – Testes do sistema de controle



Fonte: *Plus Energy* (2021)

Com a reconstrução dos sistemas de controle e das pás, o projeto foi finalizado no início de 2022 e inaugurado em 31 de agosto de 2022.