

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



João Arthur de Oliveira Assis

**ESTUDO DE DESEMPENHO E APLICAÇÃO PRÁTICA DE UMA
PLANTA DE ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE CONTROLADO**

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: João Arthur de Oliveira Assis

Matrícula: 20171040100221

Título do Trabalho: Estudo de Desempenho e Aplicação Prática de Uma Planta de Energia Eólica em Ambiente Controlado.

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 04/11/2025.
Local Data

Documento assinado digitalmente
 JOAO ARTHUR DE OLIVEIRA ASSIS
Data: 04/11/2025 16:32:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

João Arthur de Oliveira Assis

**ESTUDO DE DESEMPENHO E APLICAÇÃO PRÁTICA DE UMA PLANTA DE
ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE CONTROLADO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a banca avaliadora, parte
dos requisitos para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Controle
e Automação junto ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

Orientador: Prof. Victor Régis Bernardeli.

ITUMBIARA-GO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A848e Assis, João Arthur de Oliveira

Estudo de desempenho e aplicação prática de uma planta de energia eólica em ambiente controlado. / João Arthur de Oliveira Assis. – Itumbiara, 2025.

52 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli.

1. Energia eólica. 2. Energia - Armazenamento. 3. Eficiência energética. I. Título. II. Bernardeli, Victor Régis. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.3121

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

João Arthur de Oliveira Assis

ESTUDO DE DESEMPENHO E APLICAÇÃO PRÁTICA DE UMA PLANTA DE ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE CONTROLADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 29 de agosto de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Victor Régis Bernadelli - orientador

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Hugo Xavier Rocha - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Ma. Thaissa de Melo Cesar - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO

2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Thaissa de Melo Cesar**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/11/2025 09:03:12.
- **Hugo Xavier Rocha**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/11/2025 08:26:50.
- **Victor Regis Bernardeli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/11/2025 08:24:37.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/11/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 711691

Código de Autenticação: 9618188547



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5622 (ramal: 5622)

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus por me acompanhar desde o início da minha jornada nessa instituição. Foram alguns longos anos e ele sempre esteve ao meu lado. Me dando saúde, paz, sabedoria e força para conclusão desse trabalho que representa significativamente um capítulo importante da minha jornada acadêmica. Sou extremamente grato a todos que direta ou indiretamente, contribuíram nessa fase.

Agradeço aos meu pais Daubenir Bezerra de Assis e Neide Aparecida de Oliveira Bezerra e minha irmã, Ana Julia de Oliveira Assis, por todo amor, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida, principalmente no nosso tão sonhado curso superior de Engenharia de Controle e Automação. Vocês são minha força, minha base, meu tudo.

A minha namorada Kamilla Teresa Sousa Silva, por todo apoio, paciência e companheirismo, por sempre acreditar em mim e me dar forças em todos os momentos, principalmente nesses últimos períodos que foram de maior sofrimento e angústia. Seu apoio foi fundamental para que eu pudesse concluir essa etapa em minha vida.

Agradeço a toda minha família, por sempre estarem presente e dispostos em ajudar de alguma forma. Em especial meus avós José Bezerra de Assis, Adelina Bezerra de Assis e Elza Maria de Oliveira por fazerem do meu sonho o de vocês também. Por não medirem esforços em me apoiar e me incentivar independente de qualquer situação.

Por fim, agradeço imensamente ao meu orientador e amigo Victor Regis Bernardeli, por toda paciência, ensinamentos, por me orientar, por nortear meu trabalho, por todas as dicas de excelência e por todos os conselhos ao longo dessa árdua graduação. Sua orientação foi essencial para o meu aprendizado.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso analisa o desempenho e a aplicação prática de uma planta de energia eólica em ambiente controlado, utilizando uma bancada experimental que simula condições reais de geração de energia a partir do vento. A energia eólica é destacada como uma fonte renovável promissora para a transição energética global, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa e atendendo à demanda crescente por eletricidade de forma sustentável. A abordagem em ambiente controlado permite o ajuste preciso de variáveis como velocidade do vento, ângulo de ataque das pás, carga aplicada e integração com sistemas de armazenamento, como baterias, facilitando a obtenção de dados confiáveis para otimização de projetos. O estudo aborda a história da energia eólica, desde moinhos antigos até turbinas modernas, e enfatiza sua relevância no contexto brasileiro, especialmente no Nordeste, onde o potencial eólico é elevado, apesar de desafios como adaptação local e capacitação técnica. Bancadas experimentais, como as da De Lorenzo do Brasil, são exploradas para testes em pequena escala, reduzindo riscos e custos antes de implementações em campo. Além disso, discute-se a integração com baterias para mitigar a intermitência da geração eólica, promovendo sistemas híbridos para aplicações em comunidades isoladas ou microgeração urbana. Os resultados visam contribuir para a literatura científica, subsidiando inovações em energias renováveis e fortalecendo a infraestrutura tecnológica nacional.

Palavras chave: Energia eólica; Bancada experimental; Ambiente controlado; Eficiência energética; Armazenamento de energia.

ABSTRACT

This final course project analyzes the performance and practical application of a wind energy plant in a controlled environment, using an experimental bench that simulates real conditions of energy generation from wind. Wind energy is highlighted as a promising renewable source for the global energy transition, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and meeting the growing demand for electricity in a sustainable way. The controlled environment approach allows precise adjustment of variables such as wind speed, blade pitch angle, applied load, and integration with storage systems like batteries, facilitating the collection of reliable data for project optimization. The study addresses the history of wind energy, from ancient mills to modern turbines, and emphasizes its relevance in the Brazilian context, especially in the Northeast, where wind potential is high, despite challenges such as local adaptation and technical training. Experimental benches, such as those developed by De Lorenzo do Brasil, are explored for small-scale testing, reducing risks and costs before field implementations. In addition, the integration with batteries is discussed as a way to mitigate the intermittency of wind generation, promoting hybrid systems for applications in isolated communities or urban microgeneration. The results aim to contribute to the scientific literature, supporting innovations in renewable energy and strengthening the national technological infrastructure.

Keywords: Wind energy; Experimental bench; Controlled environment; Energy efficiency; Energy storage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Painéis que avaliam desempenho	18
Figura 2 - Planta de Energia Eólica em ambiente controlado	19
Figura 3 - Baterias Freedom DF300 conectadas em paralelo	20
Figura 4 - Turbina Eólica.....	21
Figura 5 - Painel de alimentação e proteção elétrica	22
Figura 6 - Interface Homem-Máquina.....	23
Figura 7 - Turbina Eólica de Pequeno Porte.....	24
Figura 8 - Ventilador Frontal	25
Figura 9 - Inversor de Frequência.....	26
Figura 10 - Inversor de Frequência	26
Figura 11 - Interface Homem-Máquina.....	26
Figura 12 - Painel de Simulação de Rede Elétrica	28
Figura 13 - Conversor de Corrente Controlada	29
Figura 14 - Conversor de Energia.....	30
Figura 15 - Bancada Híbrida.....	31
Figura 16 - Bancada Híbrida.....	31
Figura 17 - Sistema Eólico.....	32
Figura 18 - Sistema Eólico.....	32
Figura 19 - Subsistema Fotovoltáico	33
Figura 20 - Subsistema Fotovoltáico	33
Figura 21 - Osciloscópio Digital Portátil	34
Figura 22 - Interface Homem-Máquina.....	35
Figura 23 - Controle MPPT.....	36
Figura 24 - Painel Fotovoltáico.....	37
Figura 25 – 100% da Velocidade da Carga.....	38
Figura 26 – 100% da Velocidade da Carga.....	39

Figura 27 – 75% da Velocidade da Carga.....	39
Figura 28 - 75% da Velocidade da Carga.....	40
Figura 29 - 75% da Velocidade da Carga.....	40
Figura 30 - 75% da Velocidade da Carga.....	40
Figura 31 - 75% da Velocidade sem carga.....	40
Figura 32 - 75% da Velocidade sem carga.....	41
Figura 33 - 75% da Velocidade sem carga.....	41
Figura 34 – 50% da Velocidade para 2 cargas.....	41
Figura 35 – 50% da Velocidade para 2 cargas.....	42
Figura 36 – 50% da Velocidade para 2 cargas.....	42
Figura 37 – 50% da Velocidade para 2 cargas.....	42
Figura 38 – 50% a vazio.....	42
Figura 39 – 50% a vazio.....	40
Figura 40 – 25% da Velocidade para 2 cargas.....	41
Figura 41 – 25% da Velocidade para 2 cargas.....	41
Figura 42 – 25% da Velocidade para 2 cargas.....	41
Figura 43 – 25% da Velocidade para 2 cargas.....	41
Figura 44 – 100% da Velocidade.....	42
Figura 45 – 75% da Velocidade.....	42
Figura 46 – 75% da Velocidade.....	42
Figura 47 – 75% da Velocidade.....	42
Figura 48 – 75% da Velocidade.....	43
Figura 49 – 75% da Velocidade.....	43
Figura 50 – 50% da Velocidade.....	43
Figura 51 – 50% da Velocidade.....	43
Figura 52 – 50% da Velocidade.....	44
Figura 53 – 50% da Velocidade.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (Estado da Arte)	13
CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DA BANCADA.....	17
2.1 – Sistema Off-Grid	17
2.2 – Sistema On Grid	27
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
3.1 – Resultados do Sistema Off Grid	39
3.2 – Resultados do Sistema On Grid	44
CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica tem se destacado como uma das fontes renováveis mais promissoras no contexto da transição energética global, oferecendo uma alternativa sustentável para atender à crescente demanda por eletricidade sem comprometer os recursos naturais. Com o avanço tecnológico e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, sistemas eólicos têm sido amplamente estudados e implementados, tanto em larga escala, como em parques eólicos, quanto em pequena escala, como em ambientes controlados para pesquisa e desenvolvimento.

O presente trabalho propõe uma análise detalhada do desempenho e da aplicação prática de uma planta de energia eólica em ambiente controlado, utilizando uma bancada experimental que simula condições reais de geração de energia a partir do vento. Essa abordagem permite um controle rigoroso das variáveis envolvidas, como velocidade do vento e carga aplicada, facilitando a obtenção de dados precisos para otimização de projetos e validação de teorias.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a exaustão de fontes fósseis têm impulsionado investimentos em energias renováveis, sendo a eólica uma das mais viáveis devido à sua abundância e à possibilidade de integração em diferentes escalas. No entanto, para que os sistemas eólicos alcancem sua máxima eficiência, é fundamental compreender como fatores como o design das turbinas, a qualidade dos materiais e as condições ambientais influenciam a geração de energia. Ambientes controlados, como laboratórios equipados com túneis de vento ou bancadas experimentais, tornam-se ferramentas indispensáveis nesse processo, pois permitem replicar cenários específicos e isolar variáveis que, no campo, seriam influenciadas por fatores imprevisíveis. Assim, este estudo busca explorar essas dinâmicas em um contexto controlado, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico na área de energia renovável.

A história da energia eólica remonta a séculos, com os primeiros usos documentados em moinhos de vento para moagem de grãos e bombeamento de água. Com a Revolução Industrial e os avanços na engenharia, as turbinas eólicas evoluíram para gerar eletricidade, especialmente a partir do século XX, com destaque para os modelos de eixo horizontal e vertical. Hoje, a pesquisa em energia eólica foca não apenas na eficiência energética, mas também na durabilidade e na adaptação a diferentes ambientes, desde zonas rurais até áreas urbanas. Nesse sentido, o uso de bancadas experimentais, como a apresentada neste trabalho, representa um marco no desenvolvimento de tecnologias que podem ser escaladas para aplicações práticas, oferecendo uma base sólida para inovações futuras no setor.

A relevância deste trabalho reside na possibilidade de testar e otimizar sistemas eólicos em um ambiente controlado, onde os resultados podem ser replicados e analisados com maior precisão do que em condições naturais. Diferentemente de testes em campo, que dependem de variáveis como direção e intensidade do vento, uma bancada experimental permite ajustar parâmetros como a velocidade do ar e a resistência da carga, proporcionando dados confiáveis para o desenvolvimento de turbinas mais eficientes. Além disso, o estudo em ambiente controlado é uma etapa crucial antes da implementação de projetos em larga escala, reduzindo custos e riscos associados a falhas em sistemas reais. Assim, este trabalho almeja preencher lacunas no entendimento do desempenho de plantas eólicas, especialmente em configurações de pequena escala.

O contexto brasileiro também justifica a importância deste estudo, dado o potencial eólico do país, que possui áreas com ventos constantes e intensos, especialmente no Nordeste. Apesar desse potencial, o desenvolvimento de tecnologias eólicas no Brasil ainda enfrenta desafios, como a necessidade de adaptação a condições locais e a formação de profissionais qualificados. A utilização de bancadas experimentais, como as fabricadas pela De Lorenzo do Brasil, vislumbradas nas imagens fornecidas, permite que estudantes e pesquisadores explorem essas tecnologias em um ambiente acadêmico, contribuindo para a capacitação técnica e para a inovação no setor energético nacional. Este trabalho, portanto, se insere nesse cenário, buscando gerar conhecimentos aplicáveis ao contexto brasileiro.

Outro aspecto relevante é a integração de sistemas de armazenamento de energia, como baterias, que complementam a geração eólica ao estabilizar a oferta de eletricidade em momentos de baixa velocidade do vento. As imagens fornecidas mostram baterias Freedom conectadas à bancada, indicando a possibilidade de estudar o desempenho de sistemas híbridos que combinam geração e armazenamento. Essa abordagem é essencial para superar uma das limitações da energia eólica, que é a intermitência, e pode ser um diferencial para aplicações em comunidades isoladas ou em microgeração urbana. Assim, o presente estudo não se limita à geração de energia, mas também explora a gestão energética em um sistema integrado.

Por fim, este trabalho se propõe a contribuir para a literatura científica ao documentar os resultados obtidos em uma planta eólica experimental, oferecendo uma base para comparações com estudos anteriores e para o desenvolvimento de novas pesquisas. A análise detalhada do desempenho da turbina, combinada com a

descrição da bancada e dos equipamentos utilizados, permitirá uma compreensão mais profunda das dinâmicas envolvidas na conversão de energia eólica em eletricidade. Com isso, espera-se que os resultados possam subsidiar projetos futuros, seja na academia ou na indústria, promovendo o uso sustentável da energia eólica e fortalecendo a infraestrutura tecnológica brasileira.

1.1 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho e a aplicação prática de uma planta de energia eólica em ambiente controlado, utilizando uma bancada experimental, com foco na eficiência energética, na otimização de parâmetros operacionais e na integração com sistemas de armazenamento, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico na área de energias renováveis.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliou-se de maneira clara a influência de diferentes velocidades de vento e ângulos de ataque das pás na geração de energia da turbina eólica, utilizando a bancada experimental.
- Foi investigado o impacto da carga aplicada e da integração com baterias no desempenho do sistema eólico, considerando a estabilidade da geração de eletricidade.
- Documentou-se e descreveu os componentes e o funcionamento da bancada experimental, fornecendo uma base técnica para replicação e aprimoramento de estudos futuros.

CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (Estado da Arte)

A energia eólica é gerada a partir da conversão da energia cinética do vento em energia mecânica por meio de turbinas, que subsequentemente transformam essa energia em eletricidade por meio de geradores. O princípio básico envolve a ação do vento sobre as pás da turbina, que giram em torno de um eixo, transferindo movimento ao gerador. A eficiência desse processo depende de fatores como a velocidade do vento, a área varrida pelas pás e o coeficiente de potência (C_p), que representa a fração de energia cinética capturada pela turbina (ALMEIDA, 2017).

Este coeficiente é limitado teoricamente pelo limite de Betz, que estabelece que nenhum sistema pode capturar mais de 59,3% da energia disponível no vento, um marco importante para o design de turbinas. O limite de Betz estabelece que, independentemente do design ou da tecnologia, uma turbina eólica ideal só pode converter, no máximo, 59,3% da energia cinética do vento que passa por sua área de captação. Isso ocorre porque parte da energia do vento precisa continuar fluindo para manter o movimento do ar após a turbina (se todo o vento fosse parado, não haveria fluxo, e a turbina não funcionaria) (ALMEIDA, 2017).

O design das pás é um dos elementos mais cruciais no desempenho de uma turbina eólica, influenciando diretamente a aerodinâmica e a eficiência energética. As pás são projetadas com perfis aerodinâmicos que otimizam o levantamento (*lift*) e minimizam o arrasto (*drag*), permitindo maior rotação com menor resistência. O ângulo de ataque, ou o ângulo entre a pá e a direção do vento, é ajustado para maximizar a captura de energia em diferentes velocidades de vento. Em ambientes controlados, como os simulados em bancadas experimentais, é possível testar diversas configurações de ângulos e materiais, como compósitos leves e resistentes, para determinar a melhor performance em condições específicas (ALMEIDA, 2017).

A velocidade do vento é outro fator determinante na geração de energia eólica, seguindo uma relação cúbica com a potência gerada ($P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$), onde ρ é a densidade do ar, A é a área varrida e v é a velocidade do vento. Essa relação implica que pequenas variações na velocidade podem resultar em grandes mudanças na potência produzida, destacando a importância de sistemas que operem de forma eficiente em uma ampla gama de velocidades. Em ambientes controlados, como laboratórios, é possível simular ventos de diferentes intensidades usando ventiladores ou túneis de vento, permitindo a análise do comportamento da turbina em condições ideais e adversas (OLIVEIRA, 2022).

Embora vantajoso para independência energética, o sistema off-grid eólico apresenta desafios como a necessidade de dimensionamento preciso do

armazenamento para lidar com a intermitência do vento, evitando subutilização ou falhas em períodos de calmaria, o que exige análises detalhadas em ambientes controlados para otimizar capacidades de bateria e prever demandas de carga. Custos iniciais elevados para equipamentos robustos e manutenção regular em locais remotos podem ser barreiras, mitigadas por avanços em tecnologias de armazenamento de longa duração, como baterias de fluxo ou supercapacitores, testados em laboratórios para durabilidade (CAVALCANTI, 2017).

Ambientalmente, embora reduza emissões, requer considerações sobre o descarte de baterias e o impacto local da instalação, com estudos controlados ajudando a desenvolver soluções eco-friendly, como turbinas de materiais recicláveis. No panorama global, o sistema off-grid empodera regiões subdesenvolvidas, apoiado por programas como o da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), e evolui com integrações de IA para previsão de padrões climáticos, solidificando sua importância na construção de comunidades resilientes e sustentáveis (ALMEIDA, 2017).

Os sistemas de controle são essenciais para ajustar o funcionamento da turbina e proteger os componentes contra sobrecarga ou falhas. Dispositivos como freios e sistemas de orientação das pás (*pitch control*) são usados para regular a rotação e evitar danos em ventos muito fortes. Além disso, controladores eletrônicos, como os MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), otimizam a transferência de energia para o gerador, maximizando a eficiência em diferentes condições operacionais. A integração desses sistemas em uma bancada experimental, como as mostradas nas imagens, permite estudar sua eficácia em tempo real, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais robustas (OLIVEIRA, 2022).

A intermitência da energia eólica, decorrente da variabilidade do vento, é uma das principais limitações dessa fonte renovável. Para mitigar esse problema, sistemas de armazenamento, como baterias, são frequentemente acoplados às turbinas, armazenando energia excedente para uso em períodos de baixa geração (CAVALCANTI, 2017).

A teoria de Betz, desenvolvida em 1919, fornece a base teórica para entender os limites da extração de energia eólica. Segundo essa teoria, a turbina extrai energia do vento ao desacelerá-lo, mas apenas uma fração desse fluxo pode ser convertida devido à necessidade de manter o fluxo de ar contínuo. Esse limite é atingido quando a velocidade do vento *downstream* da turbina é reduzida a um terço da velocidade *upstream*. Em experimentos controlados, é possível verificar se o desempenho da turbina se aproxima desse limite, ajustando variáveis como o diâmetro das pás e a densidade do ar no ambiente simulado (OLIVEIRA, 2022).

Modelos como o de Schmitz complementam a teoria de Betz, considerando

aspectos mais detalhados da aerodinâmica das pás, como o efeito de estol (*stall*) e a distribuição da pressão ao longo da superfície. Esses modelos são validados experimentalmente em laboratórios, onde sensores e anemômetros medem a velocidade e a pressão do ar em torno da turbina. As imagens da bancada mostram um anemômetro e controle de aerogerador, indicando que o sistema permite monitorar essas variáveis, fornecendo dados para comparar os resultados experimentais com as previsões teóricas (ALMEIDA, 2017).

A integração de sistemas AC/DC é outra área importante na geração eólica, pois as turbinas produzem eletricidade em corrente alternada (AC), que precisa ser convertida para corrente contínua (DC) para armazenamento em baterias ou ajustada para uso em redes. Equipamentos como os mostrados na bancada, com conectores para 220 Vac e cargas AC/DC, permitem estudar essas conversões e suas perdas energéticas. Essa análise é crucial para otimizar a eficiência global do sistema, especialmente em configurações híbridas que combinam geração e armazenamento (CAVALCANTI, 2017).

A instrumentação avançada, como interfaces homem-máquina (IHM) e controladores PLC, é essencial para monitorar e ajustar o desempenho da planta eólica. As imagens mostram uma tela X2base da *Altus*, sugerindo que a bancada é equipada com tecnologia de automação industrial. Esses sistemas permitem registrar dados em tempo real, como potência gerada e velocidade de rotação, facilitando a análise detalhada e a otimização contínua do sistema (OLIVEIRA, 2022).

A pesquisa em energia eólica também envolve a análise de materiais, que devem ser leves, resistentes à corrosão e capazes de suportar esforços mecânicos. Em experimentos controlados, é possível testar diferentes materiais para pás, como fibra de vidro ou carbono, e avaliar sua durabilidade ao longo do tempo. A bancada experimental pode ser adaptada para simular condições de estresse, contribuindo para o desenvolvimento de turbinas mais eficientes e econômicas (ALMEIDA, 2017).

A planta de microgeração eólica representa uma solução inovadora e sustentável para a produção de energia renovável em escalas menores, ideal para ambientes residenciais, comerciais ou experimentais controlados, como o proposto no estudo de desempenho de uma usina eólica simulada. Essa configuração envolve a instalação de turbinas eólicas de pequeno porte, geralmente com potências variando de 1 kW a 50 kW, projetadas para capturar a energia cinética do vento e convertê-la em eletricidade utilizável (MACHADO, 2015).

Essa abordagem não apenas facilita o estudo acadêmico, mas também promove a integração com sistemas híbridos, como painéis solares ou baterias de armazenamento, contribuindo para a autonomia energética em locais remotos ou

urbanos com restrições de espaço. Além disso, a microgeração eólica alinha-se aos objetivos globais de redução de emissões de carbono, conforme estabelecido em acordos internacionais como o Acordo de Paris, incentivando a adoção de tecnologias limpas que minimizem a dependência de combustíveis fósseis e promovam a resiliência energética em comunidades vulneráveis a interrupções no fornecimento tradicional (BARBOSA, 2016).

Sistemas de controle eletrônico, como inversores e reguladores de tensão, garantem a estabilidade da saída de energia, protegendo contra sobrecargas ou variações excessivas. Em um setup controlado, sensores de anemômetros, acelerômetros e medidores de potência são incorporados para monitorar em tempo real parâmetros como velocidade do vento, torque e eficiência de conversão, permitindo a coleta de dados para modelagem matemática e otimização (OLIVEIRA, 2022).

Essa estrutura modular facilita a escalabilidade, onde múltiplas unidades podem ser conectadas em rede para aumentar a capacidade total, e integra-se perfeitamente com softwares de simulação como o *MATLAB* ou *ANSYS* para prever comportamentos sob diferentes cenários, tornando-a uma ferramenta valiosa para pesquisas em engenharia energética (BARBOSA, 2016).

O funcionamento de uma planta de microgeração eólica em ambiente controlado baseia-se nos princípios aerodinâmicos da lei de Betz, que estabelece um limite teórico de 59,3% na eficiência de extração de energia do vento, embora na prática valores atinjam cerca de 30-45% devido a perdas mecânicas e elétricas. No ambiente simulado, um túnel de vento ou ventiladores industriais geram fluxos controlados, permitindo testes repetíveis que avaliam o coeficiente de potência (C_p) em função da razão de velocidade de ponta (TSR) (BRITO, 2019).

O processo inicia com a captura do vento pelas pás da turbina, que giram o rotor conectado ao gerador, produzindo eletricidade que é então retificada e invertida para compatibilidade com a rede ou cargas locais. Sistemas de controle avançados, como MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), otimizam a operação ajustando o ângulo das pás ou a carga elétrica para maximizar a saída em ventos variáveis. Essa configuração controlada é crucial para identificar pontos de falha, como vibrações excessivas ou fadiga material, e para validar modelos computacionais que preveem o desempenho em condições reais, contribuindo para o aprimoramento de designs mais robustos e eficientes em termos de custo-benefício (BARBOSA, 2016).

CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DA BANCADA

2.1 – Sistema Off-Grid

O sistema off-grid de geração eólica oferece uma solução autônoma e independente para a produção de energia em locais remotos ou isolados da rede elétrica convencional, onde as turbinas eólicas capturam o vento para gerar eletricidade que é armazenada e consumida localmente, promovendo a autossuficiência energética em cenários como fazendas rurais, ilhas ou estações de pesquisa antárticas. Nesse modelo, a energia é convertida por meio de controladores de carga e inversores off-grid, que transformam a corrente alternada em contínua para baterias de armazenamento, como as de íon-lítio ou chumbo-ácido, permitindo o suprimento contínuo mesmo em períodos sem vento.

Em ambientes controlados experimentais, como túneis de vento ou simuladores climáticos, é possível testar a resiliência do sistema sob condições variáveis, analisando a eficiência de conversão e a durabilidade dos componentes sem depender de infraestrutura externa, o que facilita o refinamento de designs para maximizar a autonomia. Essa abordagem alinha-se a objetivos de sustentabilidade, reduzindo a dependência de geradores a diesel poluentes e contribuindo para a inclusão energética em comunidades vulneráveis, conforme iniciativas globais como o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 da ONU, que visa acesso universal a energia acessível e limpa.

Os elementos fundamentais de um sistema off-grid eólico abrangem a turbina adaptada para operação isolada, frequentemente do tipo VAWT para melhor desempenho em ventos turbulentos, conectada a geradores de baixa velocidade que minimizam perdas mecânicas, e integrada a bancos de baterias com sistemas de gerenciamento de bateria (BMS) para prevenir sobrecargas ou descargas profundas. Sensores IoT e controladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) otimizam a captura de energia, ajustando dinamicamente a carga para extrair o máximo do vento disponível, enquanto inversores puros senoidais garantem a qualidade da eletricidade para aparelhos sensíveis.

Em setups controlados, esses componentes são monitorados por softwares como o Arduino ou Raspberry Pi para coletar dados sobre ciclos de carga, eficiência e fadiga material, permitindo simulações de longo prazo que validam a viabilidade em condições extremas. Essa modularidade facilita a escalabilidade, onde múltiplas turbinas podem ser combinadas com painéis solares em sistemas híbridos, aumentando a confiabilidade e reduzindo custos operacionais ao longo do tempo,

tornando-o ideal para aplicações educacionais e de pesquisa que exploram a transição para energias renováveis independentes.

A bancada experimental apresentada nas imagens é um sistema desenvolvido pela De Lorenzo do Brasil, projetado para simular o funcionamento de uma planta de energia eólica em ambiente controlado. O conjunto inclui diversos módulos e componentes interligados, como um aerogerador, baterias de armazenamento, controladores e interfaces de monitoramento, permitindo uma análise detalhada do processo de geração e conversão de energia. A estrutura amarela característica da marca é visível em todos os equipamentos, indicando um design padronizado e robusto, adequado para uso em laboratórios acadêmicos ou de pesquisa.

A figura 1 apresenta um painel de cargas AC/DC fabricado pela De Lorenzo do Brasil, modelo DLB 1183, utilizado em experimentos controlados para simulação de sistemas elétricos, como os encontrados em uma planta de energia eólica em ambiente controlado. O equipamento possui múltiplas conexões configuradas para operar com potências de 50 Watts a 12V e 220V, incluindo pontos de ventilação, o que sugere sua aplicação em testes que envolvem dissipação de calor e cargas variáveis.

Esses painéis são essenciais para avaliar o desempenho de componentes elétricos, permitindo a simulação de condições reais de operação, como a geração e consumo de energia em turbinas eólicas, alinhando-se diretamente ao tema do estudo de desempenho em ambientes controlados.

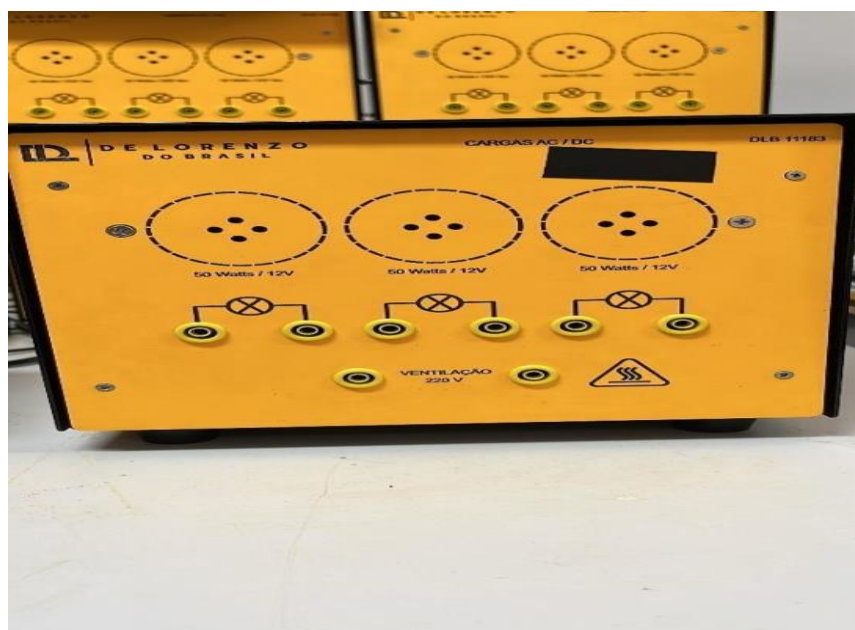


Figura 1: Painéis que avaliam cargas

Já a imagem seguinte mostra o laboratório equipado com uma planta de energia eólica em ambiente controlado, destacando uma turbina eólica de pequeno porte montada sobre um suporte, fabricada pela De Lorenzo do Brasil (modelo DLB GENT-155-BR). O sistema inclui painéis de controle, baterias (como as da marca Freedom), e uma série de cabos e instrumentos de medição, sugerindo um setup para testes de geração e armazenamento de energia.



Figura 2: Planta de Energia Eólica em ambiente controlado

A presença de um ventilador e de dispositivos de monitoramento, como multímetros e displays digitais, indica que o ambiente é projetado para simular condições operacionais reais, permitindo a análise do desempenho da turbina sob diferentes cargas e velocidades de vento controladas. Esse arranjo é fundamental para o estudo do tema do TCC, pois possibilita a avaliação prática da eficiência energética e da integração de componentes em uma planta eólica em escala reduzida.

Agora apresento duas baterias Freedom, modelo DF300, conectadas em paralelo por meio de cabos vermelho e preto, configuradas dentro de um laboratório de engenharia elétrica equipado com equipamentos da De Lorenzo do Brasil. As baterias, posicionadas sobre suportes amarelos, servem como sistema de armazenamento de energia, um componente essencial em plantas eólicas para estabilizar a geração intermitente de energia.



Figura 3: Baterias Freedom DF300 conectadas em paralelo

A conexão em paralelo sugere a intenção de aumentar a capacidade de armazenamento, enquanto os cabos indicam integração com outros dispositivos, como inversores ou cargas, permitindo a simulação de um sistema híbrido em ambiente controlado. Esse arranjo é fundamental para o estudo do desempenho de uma planta eólica, pois permite avaliar a eficiência do armazenamento e a resposta do sistema a variações de carga.

É necessário uma turbina eólica, conforme imagem a seguir, protegida por uma estrutura transparente, possui um rotor de múltiplas pás e um motor integrado, projetado para simular a geração de energia em condições de vento controlado. Ao fundo, observa-se a presença de baterias Freedom e painéis de controle, indicando que o sistema está integrado a um arranjo de armazenamento e monitoramento, essencial para avaliar o desempenho da planta eólica em ambiente controlado. Essa configuração permite a simulação de diferentes cenários de operação, alinhando-se diretamente ao objetivo do TCC de estudar a aplicação prática de sistemas eólicos.



Figura 4: Turbina Eólica

A integração com baterias e controladores sugere a capacidade de testar a estabilidade do sistema sob variações de carga e a viabilidade de armazenamento de energia excedente. O suporte ajustável e a proteção transparente facilitam a manipulação e a observação segura durante os experimentos, enquanto os painéis ao fundo fornecem dados críticos para otimização do sistema. Assim, a imagem ilustra uma aplicação prática que suporta a validação de modelos teóricos e a identificação de melhorias em plantas eólicas em ambiente controlado.

A imagem a seguir mostra um painel de alimentação e proteção elétrica, modelo DLB 02024, fabricado pela De Lorenzo do Brasil, configurado para operar em 220 Vac e fornecer uma saída de 24 Vcc. O painel inclui um disjuntor C10 da WEG para proteção contra sobrecarga, um botão vermelho "Ligado" com indicação de energia energizada, e conectores para as fases L1 e L2, além de um terminal de aterramento.



Figura 5: Pannel de alimentação e proteção elétrica

A conexão de entrada de 220 Vac está visível, sugerindo que o equipamento é projetado para integrar sistemas elétricos em ambiente controlado, como uma planta de energia eólica, fornecendo energia estável para componentes como controladores e sensores. Essa configuração é essencial para garantir a segurança e a funcionalidade contínua dos experimentos.

Já a interface homem-máquina (IHM) de um equipamento DLB GENT 155-BR, fabricado pela De Lorenzo do Brasil, utilizada para monitoramento e controle de uma planta de energia em ambiente controlado. A tela exibe uma análise de corrente contínua (CC) com uma representação esquemática de uma turbina eólica conectada a um controlador e uma carga simulada (representada por uma lâmpada), indicando zero watts de geração e consumo.



Figura 6: Interface Homem-Máquina

Esse sistema, integrado a um simulador de painel fotovoltaico, sugere uma configuração híbrida que combina energia eólica e solar, permitindo a avaliação do desempenho em diferentes cenários operacionais. A interface, com indicadores de potência e ícones de controle, é essencial para coletar dados em tempo real.

Interessante também demonstrar o painel de controle DLB GENT-155-BR, fabricado pela De Lorenzo do Brasil, configurado em um laboratório para o estudo de uma planta de energia eólica em ambiente controlado. O painel inclui uma interface homem-máquina com displays digitais, um controlador MPPT, e conexões com baterias Freedom, sugerindo um sistema integrado para geração, conversão e armazenamento de energia.

Ao lado, uma turbina eólica de pequeno porte, equipada com um anemômetro e ventilador, simula a captação de vento, enquanto os cabos coloridos indicam a interconexão com os componentes elétricos. Essa configuração permite a simulação de condições operacionais reais.



Figura 7: Turbina Eólica de Pequeno Porte

Este setup é uma ferramenta prática para analisar o desempenho de uma planta eólica em ambiente controlado, possibilitando a medição de parâmetros como potência gerada e velocidade do vento. O controlador MPPT otimiza a extração de energia da turbina, enquanto as baterias armazenam a energia excedente, simulando um sistema híbrido funcional. A presença de múltiplos displays e interruptores facilita o monitoramento e o ajuste das condições experimentais, como carga e velocidade do rotor, contribuindo para a validação de modelos teóricos e a identificação de melhorias no sistema.

O equipamento, equipado com um ventilador frontal e conectores de cabos, é projetado para simular a geração de energia eólica em ambiente controlado, com um anemômetro visível à esquerda para medir a velocidade do vento artificial. Os controles manuais e a indicação de energia sugerem que o sistema permite ajustes precisos das condições operacionais, enquanto os cabos conectam o módulo a outros componentes, como baterias ou painéis de controle.



Figura 8: Ventilador Frontal

Este módulo é uma peça central para a análise prática de uma planta eólica em ambiente controlado, permitindo a simulação de diferentes velocidades de vento e a avaliação da resposta da turbina. O ventilador assegura a dissipação de calor durante os testes, um fator crítico para a operação contínua, enquanto o anemômetro fornece dados essenciais para correlacionar a velocidade do vento com a geração de energia. A interconexão com outros equipamentos facilita a integração do sistema com baterias e controladores, suportando a pesquisa de otimização e estabilidade.

Nas figuras a seguir apresento um inversor de frequência, modelo DLB INV-01, fabricado pela De Lorenzo do Brasil, configurado em um laboratório de engenharia elétrica para uso em uma planta de energia eólica em ambiente controlado. O equipamento exibe uma tela digital com indicadores de tensão e frequência, conectada por cabos a um motor elétrico simulado, sugerindo sua função de converter a energia gerada pela turbina em uma forma utilizável para cargas AC. A presença de um ventilador interno e botões de controle manual indica que o inversor é projetado para operar em condições de teste variadas, com proteção térmica e ajustes precisos.

Este inversor desempenha um papel essencial na pesquisa prática de plantas eólicas, permitindo a análise da conversão eficiente de energia de corrente contínua (CC) para alternada (AC) em ambiente controlado. A capacidade de ajustar a frequência e a tensão, conforme indicado na tela, é crucial para otimizar a integração da turbina com a rede ou cargas simuladas, enquanto o ventilador garante a

estabilidade térmica durante longos períodos de operação. Essa configuração suporta a validação de modelos de desempenho e a experimentação de soluções para melhorar a eficiência energética, contribuindo diretamente para os objetivos do estudo sobre plantas eólicas.

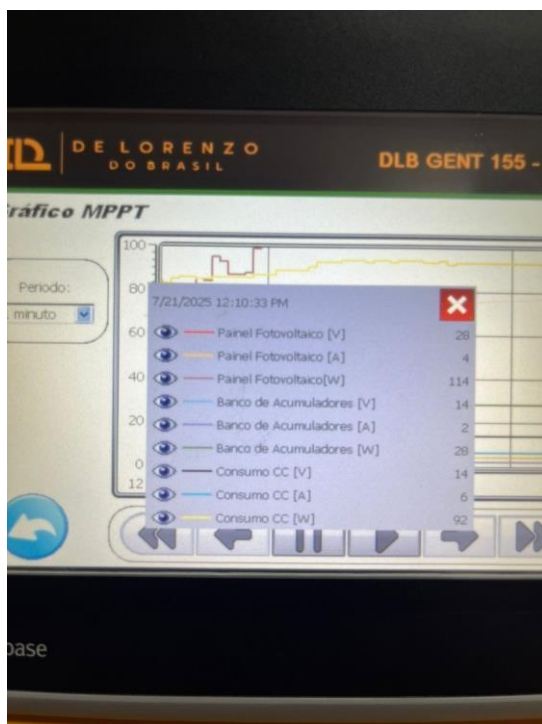


Figura 9: Inversor de Frequência



Figura 10: Inversor de Frequência

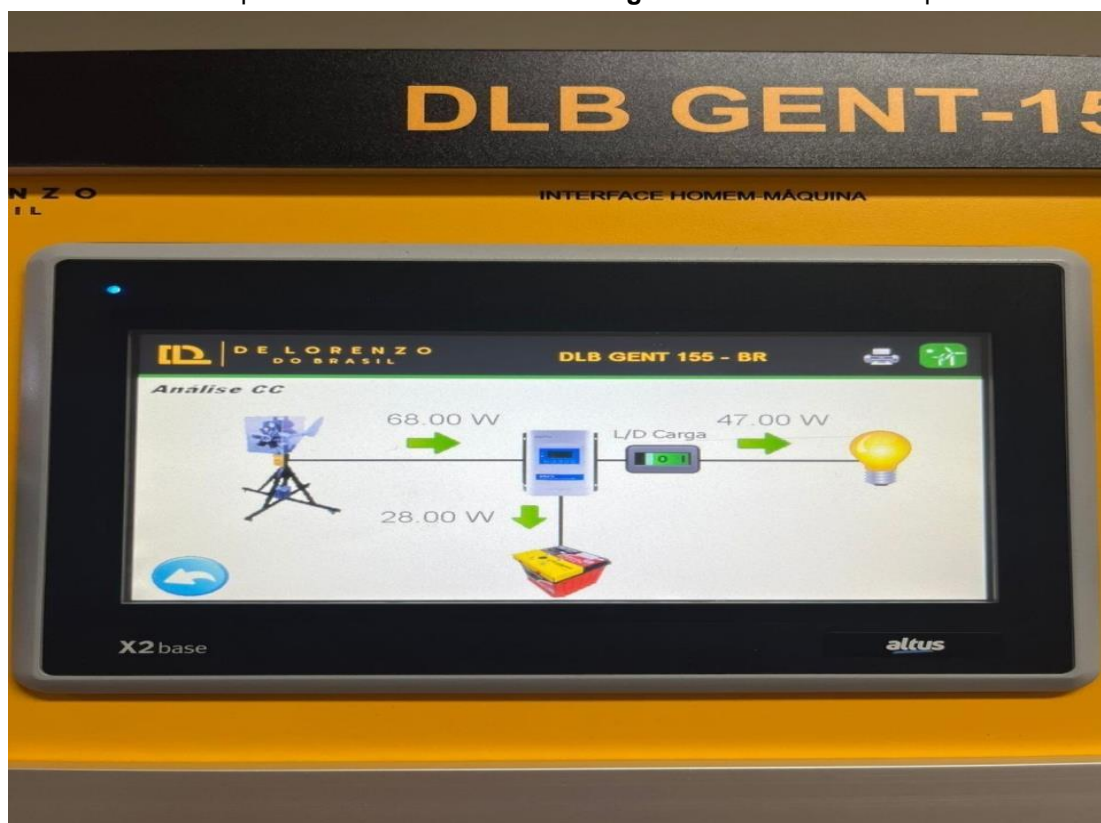


Figura 11: Interface Homem-Máquina

2.2 – Sistema On Grid

O sistema on-grid de geração eólica representa uma abordagem integrada e eficiente para a produção de energia renovável, onde as turbinas eólicas são diretamente conectadas à rede elétrica pública, permitindo que a energia gerada seja injetada na infraestrutura existente e utilizada de forma compartilhada. Nesse modelo, a microgeração eólica opera em sincronia com a rede, convertendo a energia cinética do vento em eletricidade alternada por meio de inversores grid-tie, que ajustam a frequência e a tensão para compatibilidade com os padrões da concessionária local.

Uma das principais vantagens é o mecanismo de net metering ou compensação energética, adotado em diversos países como o Brasil sob a Resolução Normativa 482 da ANEEL, substituída pela REN 1059 de fevereiro de 2023, onde o excedente de energia produzido é creditado na conta do consumidor, reduzindo custos e incentivando a adoção de tecnologias sustentáveis.

Em ambientes controlados, como laboratórios ou instalações experimentais, esse sistema facilita testes de integração, simulando variações de carga e analisando a estabilidade da rede sob injeções intermitentes de energia eólica, o que contribui para o desenvolvimento de algoritmos de controle que minimizam flutuações e otimizam a eficiência global. Além disso, o sistema on-grid promove a descentralização da geração de energia, aliviando a pressão sobre usinas centralizadas e fomentando a transição para uma matriz energética mais verde, alinhada a metas globais de redução de emissões de carbono, como as estabelecidas pelo Acordo de Paris.

Os componentes chave de um sistema on-grid eólico incluem a turbina propriamente dita, equipada com geradores síncronos ou assíncronos que produzem corrente alternada, conectados a inversores inteligentes capazes de detectar a presença da rede e desligar automaticamente em casos de falhas para evitar ilhamento. Sensores de monitoramento, como anemômetros e medidores de potência, são integrados para rastrear em tempo real a produção e o consumo, permitindo ajustes dinâmicos via sistemas de gerenciamento de energia (EMS) que utilizam protocolos como Modbus ou IoT para comunicação remota.

Apesar dos benefícios, a implementação de sistemas on-grid eólicos enfrenta desafios regulatórios e técnicos, como a dependência da estabilidade da rede pública, que pode ser afetada por interrupções ou variações de tensão, exigindo proteções adicionais como relés anti-ilhamento e filtros harmônicos para manter a qualidade da energia injetada. Em ambientes controlados, estudos de desempenho revelam que

fatores como a intermitência do vento demandam modelagens preditivas baseadas em machine learning para prever a geração e otimizar a injeção, evitando penalidades por excedentes não gerenciados.

Além disso, questões ambientais, como o impacto visual e acústico das turbinas em áreas densamente povoadas, necessitam de soluções mitigadoras, como designs aerodinâmicos avançados ou posicionamento estratégico validado por simulações CFD (Computational Fluid Dynamics). No contexto global, incentivos fiscais e subsídios, como os oferecidos pela União Europeia via o Green Deal, aceleram a adoção, enquanto pesquisas em ambientes controlados pavimentam o caminho para inovações, como turbinas de eixo vertical mais adaptáveis a ventos urbanos, fortalecendo o papel do sistema on-grid na promoção de uma economia circular e na luta contra as mudanças climáticas.

A seguir exibe um painel de simulação de rede elétrica, modelo DLB 08035, fabricado pela De Lorenzo do Brasil, instalado em um laboratório de engenharia elétrica. O equipamento apresenta interruptores, medidores analógicos de tensão e corrente, e conexões configuradas para simular uma rede elétrica de 220 Vac, com terminais de entrada e saída bem visíveis. Um disjuntor de proteção destaca-se como recurso de segurança, enquanto os cabos conectam o painel a outros componentes, sugerindo um sistema integrado para testar a distribuição e estabilidade de energia. A estrutura robusta e os indicadores claros tornam o painel ideal para simular condições reais de operação em um ambiente controlado.

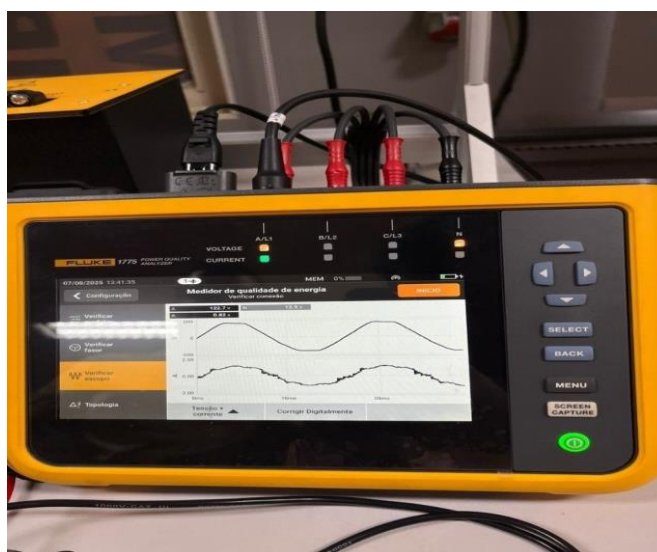


Figura 12: Painel de Simulação de Rede Elétrica

Um conversor de corrente controlada para corrente alternada (CC para CA) é um dispositivo eletrônico utilizado para transformar energia elétrica de corrente contínua, gerada por fontes como turbinas eólicas ou painéis solares, em corrente alternada compatível com a rede elétrica. Esse processo, conhecido como inversão, é essencial

para injetar energia renovável de forma eficiente e segura na rede, ajustando parâmetros como frequência e tensão através de técnicas avançadas como o controle MPPT (Maximum Power Point Tracking).

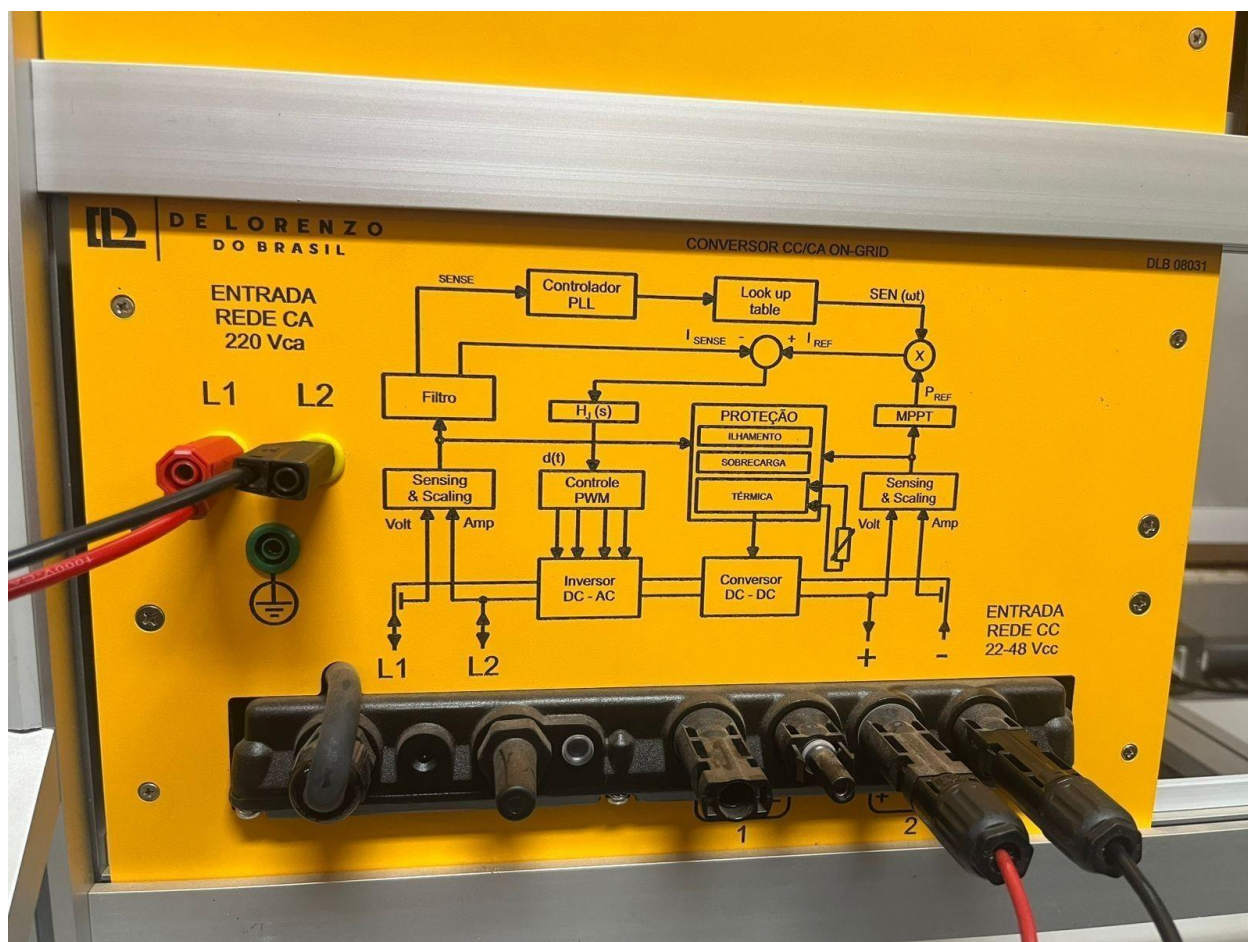


Figura 13: Conversor de Corrente Controlada

Na imagem, o inversor de frequência DLB INV-01, fabricado pela De Lorenzo do Brasil, destaca-se com sua tela digital mostrando medições de tensão e frequência, conectado a um motor simulado, sugerindo um ambiente de teste onde a conversão e a integração com a rede são avaliadas em condições controladas, simulando a operação real de uma planta eólica.

O painel didático apresenta um conversor de energia que possibilita a análise da entrada em corrente alternada (CA) e da saída em corrente contínua (CC), simulando de forma prática a conversão necessária para o aproveitamento da energia elétrica gerada por turbinas eólicas. O multímetro digital, posicionado em primeiro plano, registra uma tensão de aproximadamente 220v, evidenciando o monitoramento da energia produzida em condições específicas do experimento. Além disso, o anemômetro mecânico, visível à esquerda, é utilizado para aferir a velocidade do vento artificial gerado, fator determinante no desempenho da turbina.

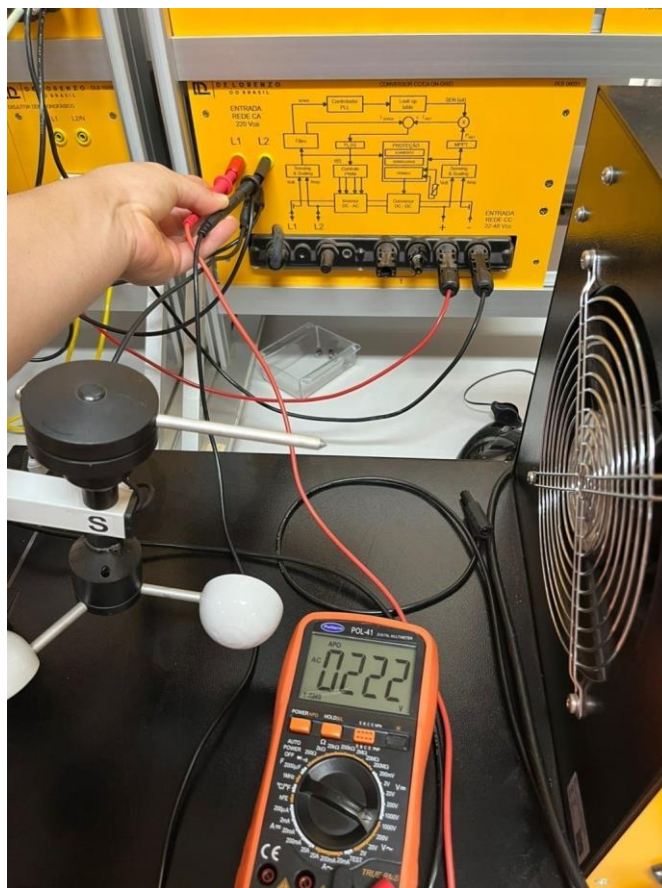


Figura 14: Conversor de Energia

Este tipo de ensaio é essencial no campo da engenharia de controle e automação, pois permite compreender o comportamento dos sistemas de conversão e os efeitos da variação da velocidade do vento sobre a produção de energia. Em um ambiente controlado, como o demonstrado, é possível realizar medições precisas, avaliar perdas de conversão e verificar a eficiência dos componentes do sistema.

Dessa forma, a prática auxilia na compreensão da dinâmica entre energia mecânica e elétrica, oferecendo uma base sólida para a análise de desempenho de plantas eólicas em condições reais. O experimento reforça a importância da instrumentação adequada e do uso de equipamentos de medição confiáveis para validação dos dados e otimização do processo de geração de energia renovável.

A sequência de telas do sistema “DLB GENT-155 – BR” mostra a operação de uma bancada didática híbrida, que integra geração eólica e fotovoltaica com banco de acumuladores e instrumentação para supervisão. Esse tipo de bancada é voltado justamente para exercícios de medição, conversão e controle (on/off-grid), permitindo estudar cada fonte de forma isolada e também o sistema completo — com aquisição de dados e visualização gráfica em IHM (Interface Homem-Máquina). Isso fica alinhado à descrição técnica do conjunto DLB GENT-155, concebido para experimentos práticos de energia eólica/solar e avaliação de desempenho sob condições controladas de

ensaio.

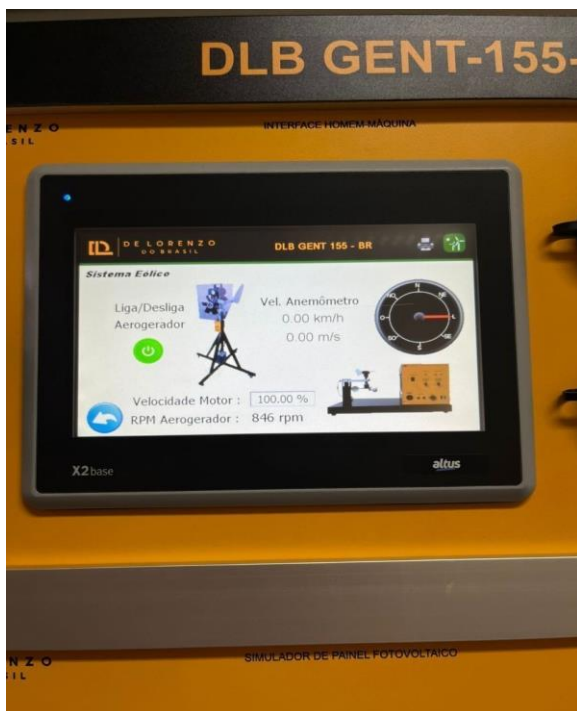


Figura 15: Bancada Híbrida



Figura 16: Bancada Híbrida

Nas telas “Gráfico MPPT”, observam-se curvas históricas (em minutos) com grandezas elétricas rotuladas como tensão, corrente e potência do painel e do banco de acumuladores, além de consumo em corrente contínua (V, A e W). A presença desse módulo gráfico indica que a bancada registra e plota, em tempo real, o comportamento das variáveis enquanto se manipula a fonte primária (no caso eólico, a velocidade de vento simulada) e a estratégia de controle. Em bancadas acadêmicas desse tipo, a IHM X2 base faz a ponte entre o controlador, os sensores e o usuário, exibindo tendências, alarmes e comandos — uma função típica desse terminal de operação.

Nos frames em que surgem valores como “Painel Fotovoltaico [V]”, “Banco de Acumuladores [A]” e “Consumo CC [W]”, depreende-se que o sistema registra simultaneamente a fonte, o estado de carga/descarga do banco e a demanda do barramento CC. Para uma planta eólica em ambiente controlado, esse arranjo é útil para quantificar perdas na cadeia eletromecânica-eletrônica (aerogerador → retificação/estágio CC → armazenamento/carga) e para observar como a estratégia de MPPT e a limitação do estágio de potência se refletem nas grandezas do lado CC.

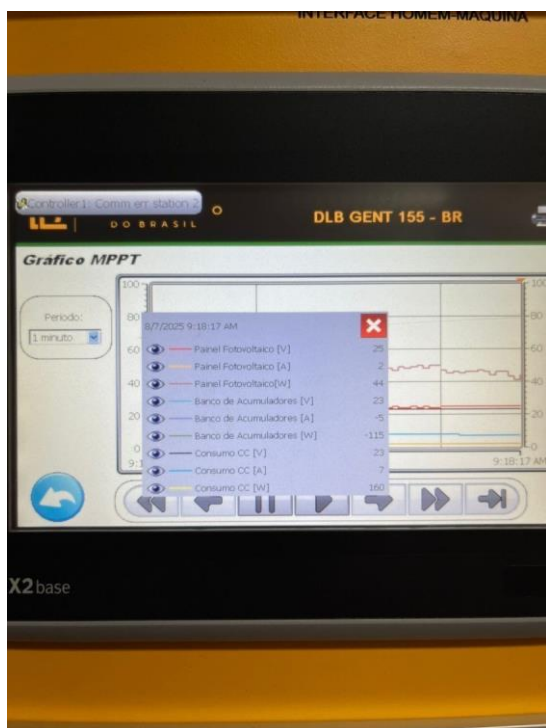


Figura 17: Sistema Eólico

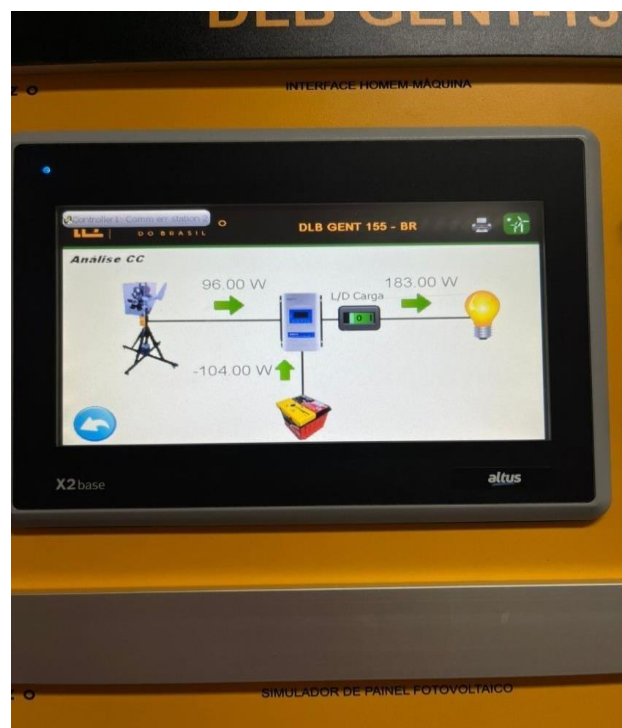


Figura 18: Sistema Eólico

As telas “Sistema Eólico” exibem comandos de “Liga/Desliga Aerogerador”, indicador de “Vel. Anemômetro” e leituras como “Velocidade Motor: 25%...100%” e “RPM Aerogerador: 297...846 rpm”. Em bancadas controladas, o “motor” representa o soprador/atuador que gera o vento de forma reprodutível, permitindo varrer velocidades e registrar a resposta elétrica com repetibilidade — uma exigência para experimentos de desempenho. Essa configuração também viabiliza exercícios de controle de passo (pitch) e comparações entre leis de controle para otimização do ponto de operação, prática relatada em anais de eventos técnicos nacionais que utilizam a mesma família de bancadas didáticas.

Isso é didaticamente valioso, porque permite discutir arquiteturas de microrredes e sistemas híbridos eólico-FV-bateria, comum em aplicações isoladas e pré-comerciais, e comparar estratégias de *MPPT* entre fontes de natureza diferente (vento variável versus irradiância/temperatura variáveis). Essa abordagem integrada está alinhada ao escopo oficial do conjunto DLB GENT-155, que prevê estudos individuais e combinados das fontes.



Figura 19: Subsistema Fotovoltáico

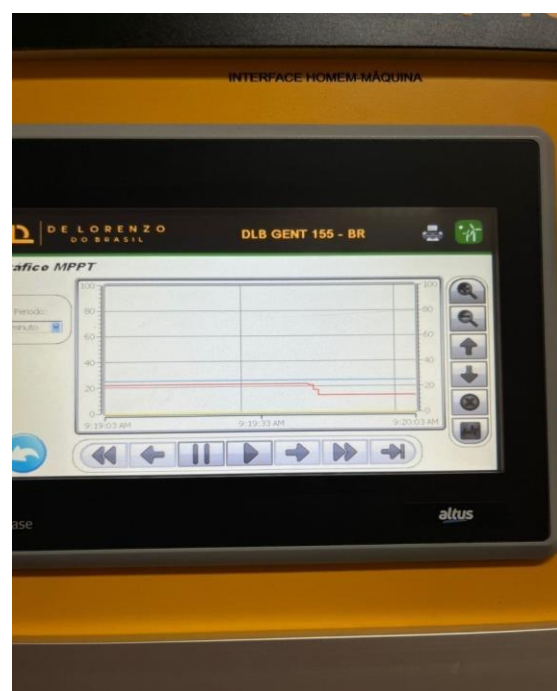


Figura 20: Subsistema Fotovoltáico

O uso de *IHM* para playback de dados (botões de retroceder/pausar/avançar) e seleção de janela temporal (“Período: 1 minuto”) facilita comparar patamares de operação (25%, 50%, 100% de velocidade de vento) com o comportamento elétrico, inclusive transientes. Em ensaios de desempenho, recomenda-se consolidar esses dados em tabelas com estatísticas (média, variância) e gráficos potência-vs- velocidade, destacando o ganho de *MPPT* e os limites por saturação de conversores/armazenamento. Essa prática é coerente com o propósito pedagógico da *IHM* e com as recomendações de instrumentação e validação em estudos nacionais de *MPPT*.

Para contextualizar a relevância dos ensaios, cabe lembrar que a eólica é uma das colunas da expansão elétrica brasileira recente. O Boletim Anual 2024 da ABEEólica indica participação da fonte em torno de 15% da matriz e crescimento contínuo de capacidade e geração; notícias setoriais apontam avanço de dois dígitos em 2024 e mais de mil parques em operação. Em termos de planejamento, os Planos Decenais da EPE projetam a continuidade da expansão e, mais recentemente, o MME/EPE vêm estruturando metodologia para seleção de áreas para eólica offshore — um campo que também se beneficia de competências de controle e instrumentação desenvolvidas em laboratório.

Finalmente, o recorte histórico-institucional brasileiro mostra como a indústria eólica nacional se consolidou com políticas públicas, queda de preços e aumento expressivo de capacidade — uma trajetória que reforça a importância de formar engenheiros aptos a medir, controlar e otimizar o desempenho de plantas, inclusive em ambientes de teste como o que as fotos exibem.

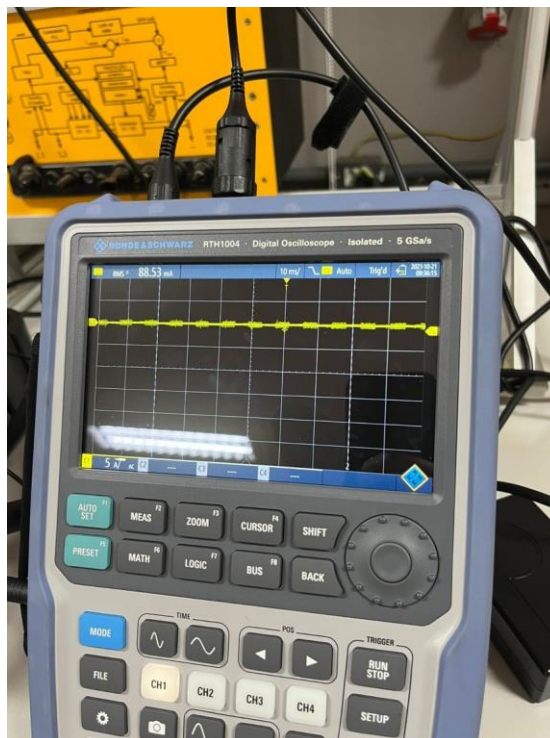


Figura 21: Osciloscópio Digital Portátil

O painel frontal do osciloscópio apresenta diversos botões de controle, como ajustes de canal, funções matemáticas, zoom, cursor e disparo (trigger), além de controles específicos para análise de barramentos lógicos e funções de medição automática. Esse tipo de instrumento é amplamente utilizado em laboratórios de eletrônica e engenharia elétrica para observar o comportamento temporal de sinais elétricos, permitindo análises detalhadas de circuitos, sistemas de comunicação e equipamentos eletrônicos em geral.

O equipamento a seguir conta com uma interface homem-máquina (IHM), onde aparece a tela "Análise CC", representando o fluxo de energia em corrente contínua (CC). Na tela, é possível visualizar os componentes do sistema: uma fonte de energia (simulada por painel fotovoltaico ou gerador), um medidor intermediário, uma chave de carga (L/D Carga) e uma lâmpada como elemento consumidor. Os valores exibidos (0,00 W) indicam que, no momento do registro, não havia potência sendo fornecida ou consumida.

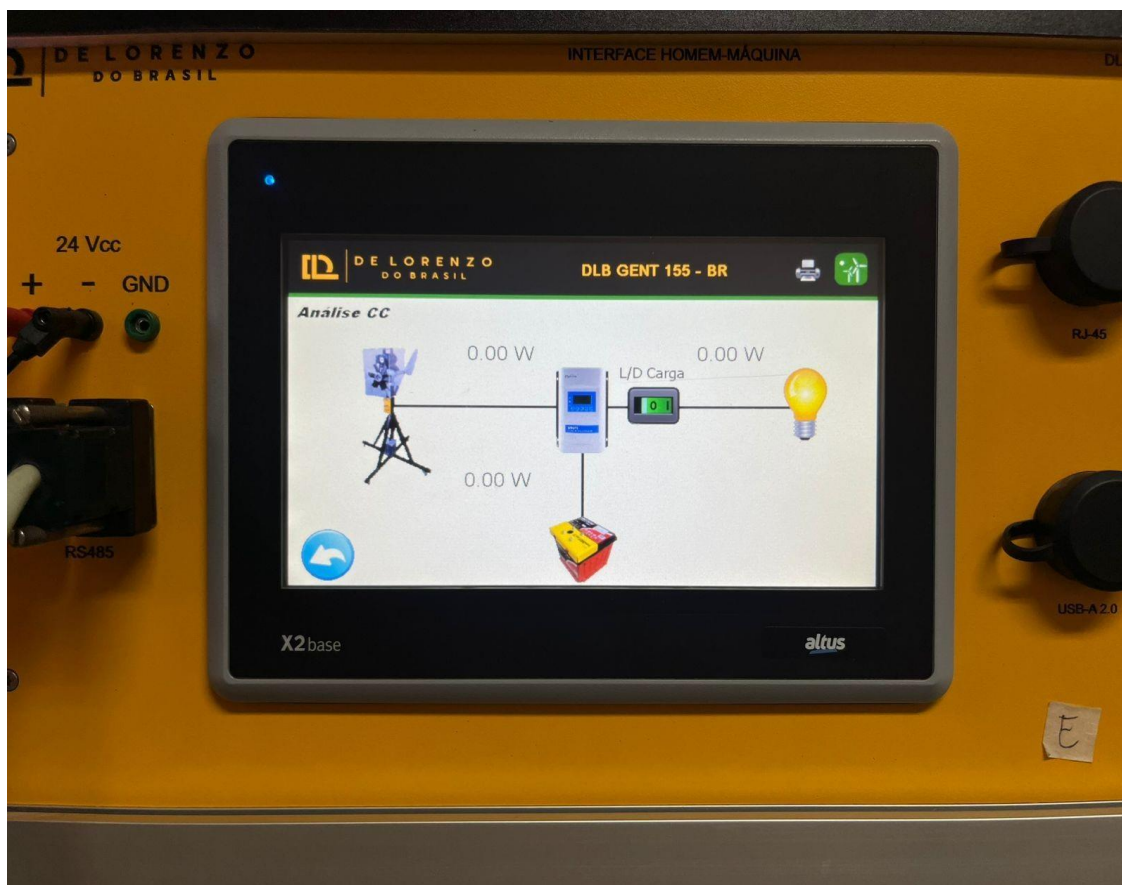


Figura 22: Interface Homem-Máquina

Esse tipo de bancada didática é amplamente utilizado no ensino de energias renováveis e eletrônica de potência, pois permite simular condições reais de geração e consumo de energia elétrica, principalmente em sistemas fotovoltaicos e de baterias. O estudante pode acompanhar em tempo real como a energia é gerada, medida, controlada e finalmente consumida por uma carga, facilitando a compreensão prática de conceitos de potência, eficiência e funcionamento de sistemas em corrente contínua.

Já na tela a seguir está sendo exibido um gráfico em tempo real, provavelmente relacionado ao controle *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*), técnica usada em sistemas fotovoltaicos para extrair a máxima potência possível de um painel solar. O gráfico apresenta curvas em diferentes cores, que representam variáveis monitoradas como tensão, corrente e potência ao longo do tempo, com registros entre 7:11:17 AM e 7:12:17 AM.

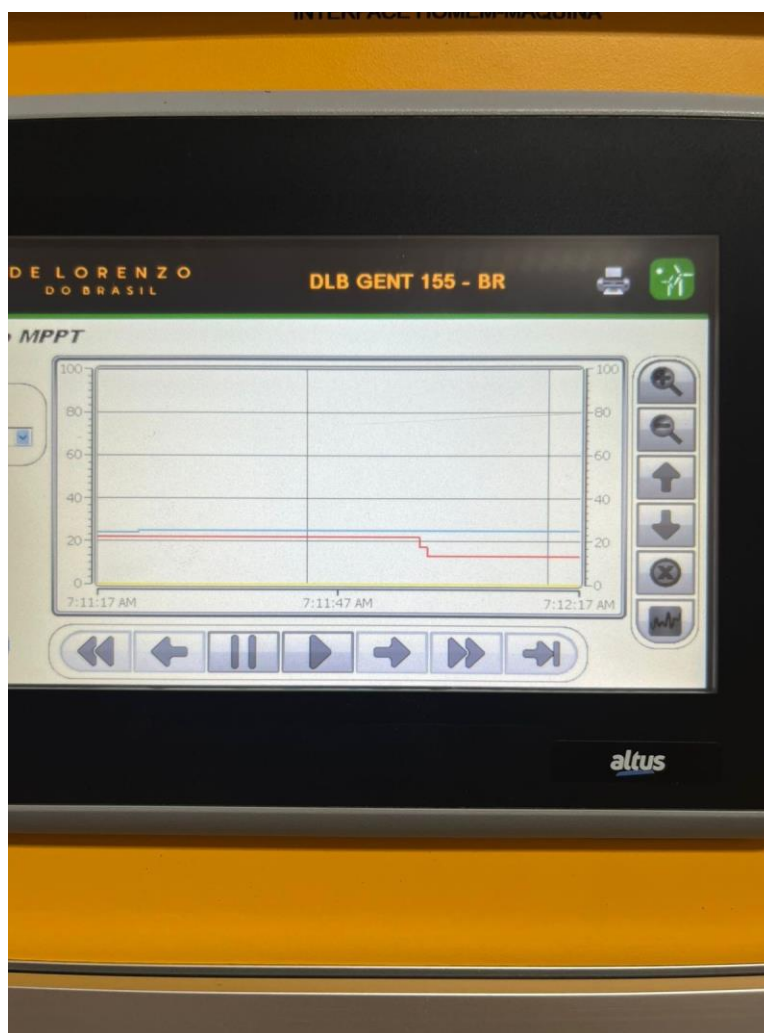


Figura 23: Controle MPPT

Nota-se uma queda abrupta em uma das linhas do gráfico (possivelmente corrente ou potência), indicando que houve alteração na condição de operação do sistema, seja pela variação da fonte de energia (como mudança de luminosidade) ou pelo acionamento de carga. Essa tela permite ao usuário analisar dinamicamente o desempenho do sistema em corrente contínua, acompanhando como o MPPT reage a essas mudanças para manter a eficiência energética e assegurar melhor aproveitamento da geração.

A imagem a seguir mostra novamente a interface, desta vez exibindo um gráfico de monitoramento do sistema fotovoltaico em corrente contínua (CC). No painel da tela, aparecem variáveis relacionadas ao painel fotovoltaico, banco de acumuladores (baterias) e consumo em CC, com medições em volts (V), amperes (A) e watts (W). No momento registrado, o painel fotovoltaico apresenta 13 V, porém 0 A e 0 W, indicando ausência de corrente e potência gerada. Já o banco de acumuladores está com 25 V, mas sem fornecimento ou consumo de corrente, o que sugere que o sistema está energizado, porém sem carga conectada ou sem geração ativa.

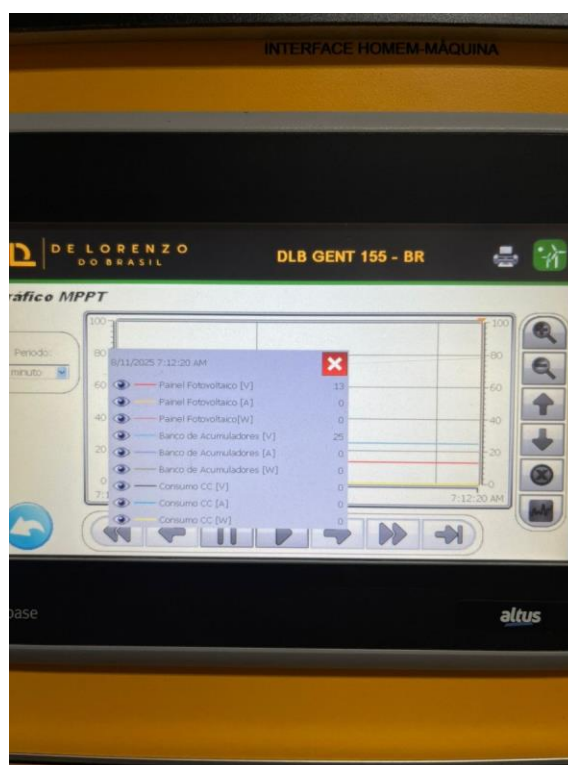


Figura 24: Painel Fotovoltaico

Esse tipo de recurso é importante no ensino de energia solar fotovoltaica, pois permite ao aluno acompanhar em tempo real as grandezas elétricas envolvidas no processo de geração, armazenamento e consumo de energia. Com essa interface, é possível identificar situações de funcionamento normal, sobrecarga ou ausência de geração, facilitando o entendimento prático da dinâmica entre painel solar, baterias e cargas em corrente contínua. Trata-se de uma ferramenta didática fundamental para compreender o comportamento de sistemas fotovoltaicos isolados e integrados.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo marca a transição da fase metodológica para a apresentação e análise crítica dos dados obtidos. Conforme estabelecido, o objetivo principal deste trabalho foi analisar o desempenho e a aplicação prática de uma planta de energia eólica em ambiente controlado. Dando seguimento à descrição detalhada da bancada experimental e dos procedimentos de teste expostos no Capítulo 2, este segmento dedica-se a expor os resultados práticos derivados dos experimentos realizados no sistema De Lorenzo do Brasil, simulando as condições de geração e armazenamento de energia eólica.

Os dados apresentados resultam de uma série de testes sistemáticos projetados para avaliar a eficiência energética e a estabilidade operacional do aerogerador sob diferentes cenários. Para isso, foram variados intencionalmente parâmetros operacionais cruciais, como a velocidade do vento simulada (em percentuais como 100%, 75%, 50% e 25%) e a carga aplicada (com e sem carga, e com diferentes números de cargas).

A imagem a seguir apresenta os alternadores ENERSUD modelo EN2, utilizados em sistemas de conversão de energia renovável, como aerogeradores. Esses equipamentos são fundamentais para transformar a energia mecânica do vento, captada pelas pás do rotor, em energia elétrica. As especificações destacam dois modelos, de 24 V e 48 V, com potências nominais de 800 W e 900 W, respectivamente, o que os torna adequados para simulações em bancada de plantas eólicas em ambiente controlado, permitindo a análise de eficiência energética em diferentes regimes de rotação.

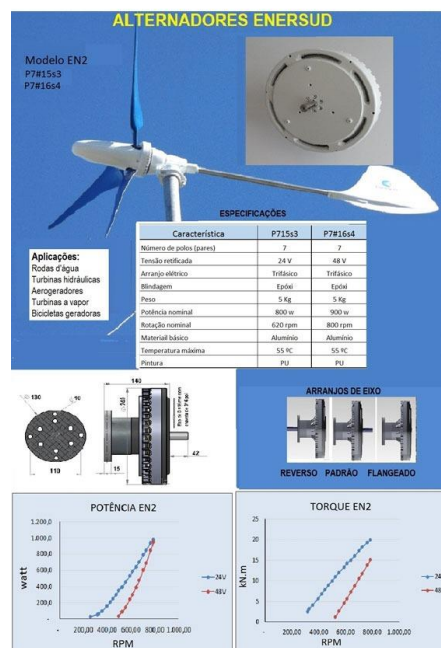


Figura 25

3.1 – Resultados do Sistema Off Grid

100% de velocidade para carga

O experimento realizado sob a condição de 100% de velocidade do vento simulada e com a aplicação de carga representa o cenário de máxima exigência operacional da planta eólica em bancada. Esta fase do teste foi crucial para determinar a capacidade máxima de geração de potência do aerogerador e para analisar o seu comportamento sob condições de pico. Ao expor a turbina à sua velocidade nominal máxima, enquanto se conecta a carga, o objetivo primário é quantificar a potência elétrica efetivamente entregue ao sistema, verificar a velocidade máxima de rotação alcançada e avaliar a estabilidade da tensão e da frequência da energia gerada.

Os resultados obtidos nesta condição de desempenho máximo são fundamentais, pois estabelecem o limite superior de eficiência do sistema e permitem a comparação direta com os modelos teóricos (como o Limite de Betz), identificando o quão próximo a bancada experimental se aproxima de seu potencial ideal de geração.



Figura 26



Figura 27

O experimento conduzido com 75% da velocidade do vento simulada e a aplicação da carga teve como foco a análise do desempenho da planta eólica sob uma condição operacional mais realista e intermediária (parcialmente carregada). Neste cenário, a turbina não está operando em sua capacidade máxima, o que permite investigar o decréscimo na potência gerada em função da redução da velocidade do vento e como a eficiência de conversão é afetada. A comparação direta dos resultados de 75% com os de 100% de

velocidade fornece *insights* valiosos sobre a sensibilidade do sistema às variações na velocidade do vento, informando o quão bem a bancada simula a intermitência natural da fonte eólica.

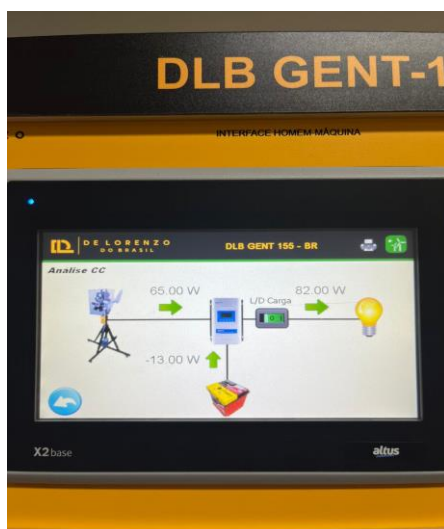


Figura 28

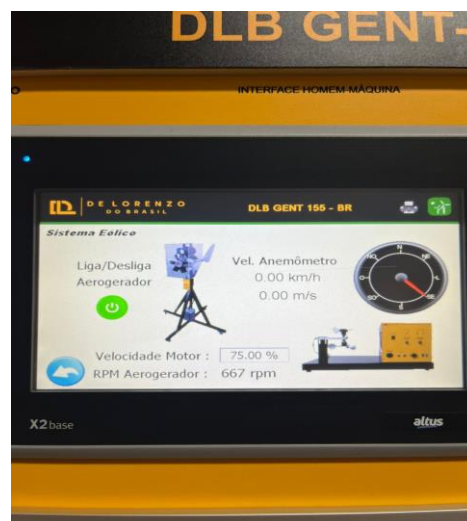


Figura 29



Figura 30

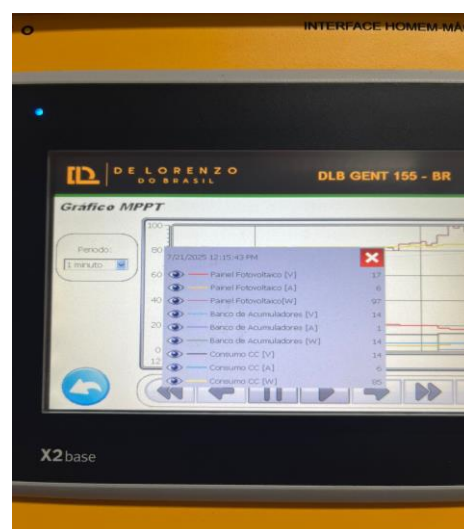


Figura 31

O experimento na condição de 75% da velocidade do vento simulada e sem a aplicação de cargas é particularmente relevante para a investigação da operação em vazio (ou *no-load*) da turbina em um cenário de recurso eólico reduzido. O principal objetivo desta fase é medir as perdas inerentes ao sistema e a potência disponível para o sistema de armazenamento de energia (baterias), uma vez que a energia gerada não é consumida instantaneamente por uma carga externa



Figura 32



Figura 33



Figura 34

O experimento focado na condição de 50% da velocidade do vento simulada e com o acoplamento de duas cargas representa um ponto de análise de desempenho sob estresse e recurso eólico moderado. Com apenas metade da velocidade nominal disponível, a potência gerada pela turbina é significativamente menor, conforme a relação cúbica do vento. No entanto, o desafio de alimentar duas cargas exige que o sistema mantenha a estabilidade mesmo com um *input* de energia reduzido.



Figura 35



Figura 36



Figura 37

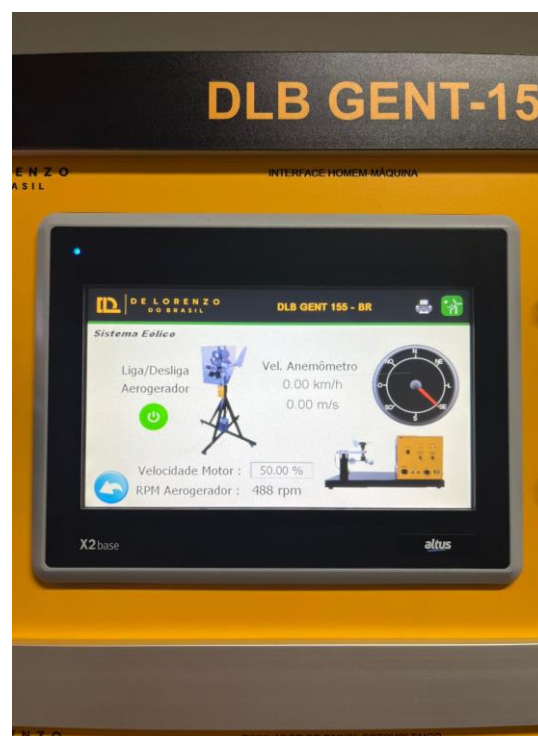


Figura 38

O experimento na condição de 50% da velocidade do vento simulada e a vazio (sem cargas) estabelece o teste de potência mínima do sistema em um cenário de recurso eólico significativamente reduzido. Sendo a condição mais baixa com a turbina ainda em rotação, esta fase é fundamental para isolar as características intrínsecas de geração da máquina. O foco primário é medir a tensão de circuito aberto e a velocidade de rotação do eixo em um ponto onde o coeficiente de potência pode estar longe do ideal.



Figura 39

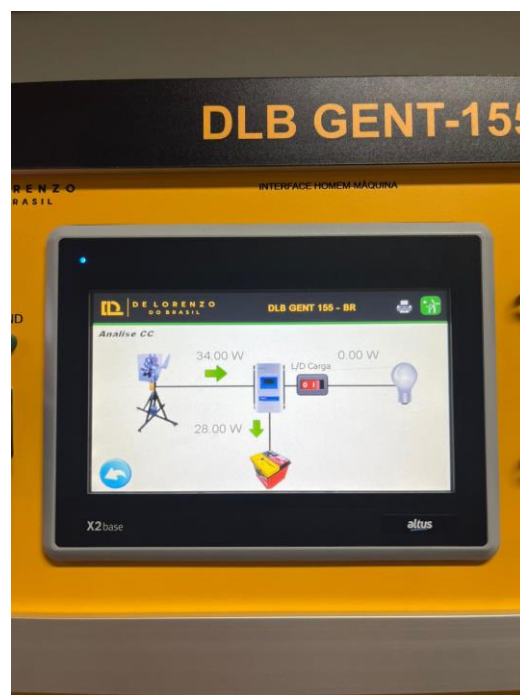


Figura 40

O experimento realizado na condição de 25% da velocidade do vento simulada e com duas cargas acopladas representa o cenário mais desafiador e de maior probabilidade de falha ou interrupção de serviço no sistema. Com a entrada de energia eólica reduzida a apenas um quarto da capacidade máxima, espera-se que a potência gerada seja extremamente baixa e, em muitos casos, insuficiente para atender a demanda combinada das duas cargas. Esta fase crítica visa determinar o ponto de *cut-out* prático do sistema, ou seja, o limite inferior de recurso eólico em que a turbina consegue manter a operação com um consumo elevado.



Figura 41



Figura 42



Figura 43



Figura 44

3.2 – Resultados do Sistema On Grid

O experimento na condição de 100% da velocidade do vento simulada, operando no sistema on-grid (conectado à rede elétrica) é o cenário ideal para avaliar o desempenho máximo e a qualidade da energia injetada pela planta eólica. O principal objetivo desta fase é testar o inversor de grid-tie, verificando sua capacidade de sincronizar a energia gerada pela turbina (em potência máxima) com os parâmetros da rede (frequência, fase e tensão).

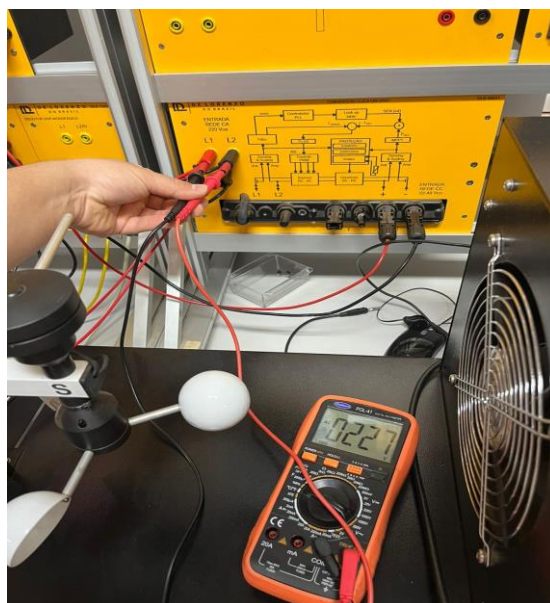


Figura 45

O experimento na condição de 75% da velocidade do vento simulada, operando no sistema *on-grid*, foca na avaliação da eficiência de injeção em carga parcial. Este cenário é extremamente representativo das condições operacionais mais comuns em um parque eólico, onde a velocidade do vento raramente se mantém no máximo. O objetivo é analisar como o decréscimo de 25% no recurso eólico afeta a potência ativa e reativa injetada na

rede, e como o inversor gerencia essa transição.

A análise dos dados desta fase é crucial para verificar se o inversor mantém a qualidade da energia (fator de potência e harmônicas) dentro dos limites regulatórios, mesmo quando a turbina está gerando abaixo da capacidade máxima. Os resultados obtidos em 75% da velocidade, quando comparados com os de 100%, fornecem *insights* valiosos sobre a curva de eficiência do inversor e a otimização do ponto de máxima potência (MPPT) sob condições eólicas variáveis.



Figura 46

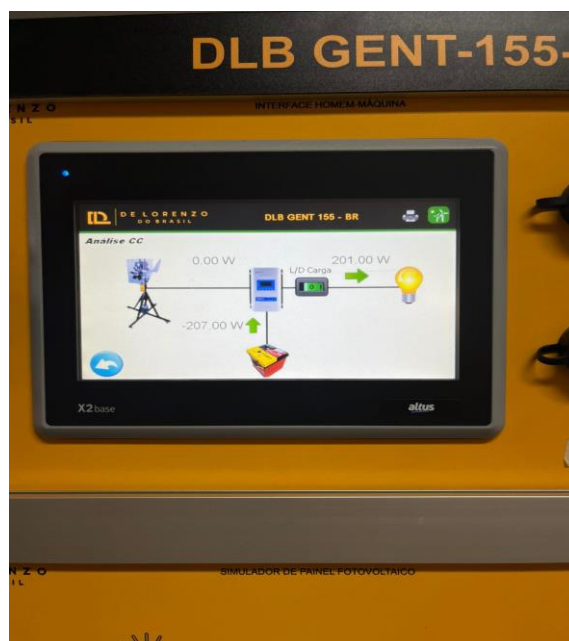


Figura 47



Figura 48

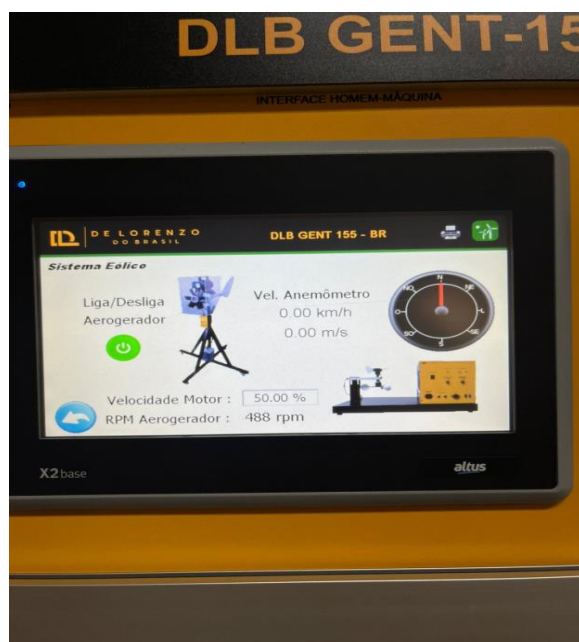


Figura 49



Figura 50

O experimento na condição de 50% da velocidade do vento simulada, operando no sistema *on-grid*, serve para investigar a eficiência e a estabilidade da injeção de potência sob um regime de recurso eólico mediano. Com a metade da velocidade nominal, a potência gerada é significativamente reduzida, o que testa a capacidade do sistema de MPPT (Maximum Power Point Tracking) do inversor em operar de forma eficiente longe do pico de desempenho.

Os dados coletados nesta fase permitirão analisar se o inversor consegue manter um alto fator de potência e uma baixa distorção harmônica total (THD), mesmo quando a quantidade de energia a ser sincronizada com a rede é baixa. Este teste é fundamental para validar a viabilidade operacional do sistema em condições atmosféricas normais, onde 50% da velocidade máxima é um valor frequente, demonstrando a habilidade do inversor de contribuir com energia de qualidade para a rede em cenários de geração mais modestos.



Figura 51



Figura 52



Figura 53

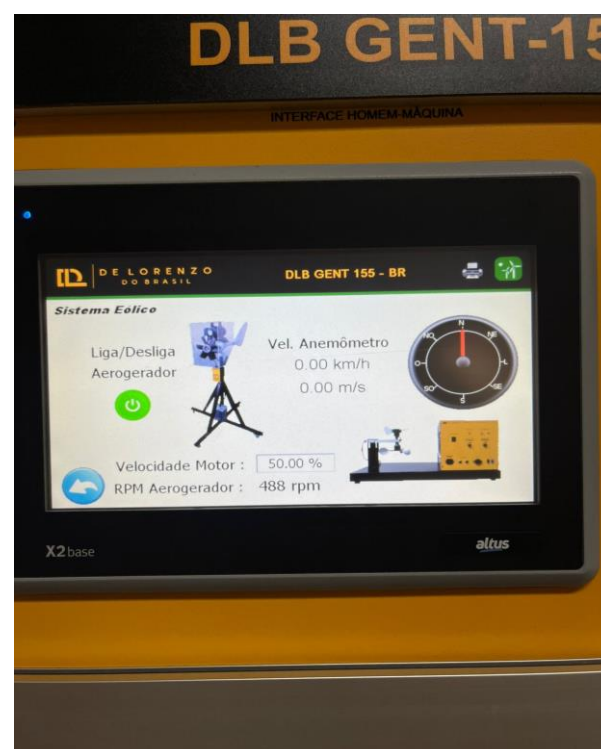


Figura 54

Os ensaios realizados na planta de energia eólica em ambiente controlado evidenciaram a importância da instrumentação precisa para a avaliação de desempenho. Nas medições iniciais com o multímetro digital, observou-se a geração de tensões alternadas ainda em baixos valores de vento, o que confirma a sensibilidade do aerogerador e sua capacidade de responder a pequenas variações de velocidade.

Essa fase experimental é crucial para verificar a coerência entre a velocidade do

anemômetro, a rotação do eixo do gerador e a tensão elétrica induzida, validando o funcionamento do conjunto de conversão eletromecânica. Além disso, o uso do simulador de vento permitiu reproduzir condições de ensaio padronizadas, garantindo repetibilidade e confiabilidade na coleta dos dados.

Os resultados também destacaram o papel fundamental do algoritmo de MPPT, que atuou para maximizar a potência extraída em diferentes condições simuladas. Quando o sistema foi operado sem o controle ativo, as curvas de potência apresentaram queda significativa, evidenciando perdas energéticas. Já com o MPPT em operação, a potência manteve-se próxima ao valor de referência, mesmo em condições de oscilação do vento, o que confirma a relevância desse tipo de estratégia para otimizar o desempenho de sistemas eólicos em pequena e grande escala. Essa constatação corrobora a literatura nacional que aponta o MPPT como tecnologia essencial para elevar o fator de capacidade de parques eólicos e reduzir desperdícios energéticos.

Outro aspecto relevante observado foi a interação entre a fonte primária e o banco de acumuladores, monitorada em tempo real pela IHM. Em diferentes estágios de rotação, verificou-se a variação da corrente de carga direcionada às baterias, o que demonstra a capacidade do sistema em gerenciar o fluxo energético entre geração, armazenamento e consumo em corrente contínua. Esse comportamento é essencial para sistemas híbridos eólicos-solares isolados, em que a estabilidade de fornecimento depende do equilíbrio entre as fontes renováveis e a capacidade de armazenamento. Nos ensaios, os dados de tensão e corrente do banco confirmaram a absorção adequada de energia, reforçando a confiabilidade da planta em simular condições de operação prática.

A análise da rotação do aerogerador em diferentes patamares de velocidade de vento também trouxe resultados importantes. Observou-se que o sistema apresentou rotação de aproximadamente 297 rpm em baixa velocidade até valores próximos a 846 rpm em regime elevado. Essa faixa operacional está de acordo com a literatura sobre aerogeradores de pequeno porte, que descreve a necessidade de converter baixas rotações em potência elétrica utilizável por meio de estágios de retificação e conversão CC-CA. Além disso, a possibilidade de controlar a intensidade do vento de forma gradual permitiu verificar a curva característica do gerador, evidenciando o ponto ótimo de operação em que a potência gerada se estabiliza.

Durante os ensaios, foi registrado também um evento de falha de comunicação na IHM, indicado pela mensagem de erro "Comm err station 2". Apesar de representar uma limitação pontual, esse resultado contribui para a discussão sobre a importância da integração confiável entre hardware e software em sistemas de geração distribuída. Em um contexto real, falhas de comunicação podem comprometer a estabilidade da

operação eólica, reforçando a necessidade de redundância em protocolos de rede e de sistemas de supervisão robustos. O registro e tratamento desse evento no ambiente controlado acrescentam valor ao trabalho, pois evidenciam que, além da conversão energética, a confiabilidade dos canais de comunicação é fator crítico de sucesso em plantas eólicas.

Outro ponto de discussão relevante é a visualização das curvas de desempenho em “playback” no supervisório. Essa funcionalidade possibilitou rever cenários específicos de ensaio, permitindo a comparação entre diferentes patamares de velocidade de vento e a resposta correspondente em potência e tensão. Essa ferramenta de análise histórica é útil não apenas em ambiente acadêmico, mas também em plantas reais, onde o monitoramento contínuo e o armazenamento de dados são utilizados para manutenção preditiva e diagnóstico de falhas. Assim, os resultados reforçam a importância de integrar soluções de supervisão avançadas a sistemas de geração renovável.

Além do aspecto técnico, os resultados também dialogam diretamente com o contexto energético brasileiro. Ao observar experimentalmente o ganho proporcionado pelo MPPT e pela gestão do banco de acumuladores, é possível estabelecer paralelos com a necessidade de aumentar a eficiência dos parques eólicos conectados à rede. Dados da ABEEólica indicam que o Brasil já possui participação expressiva da fonte eólica em sua matriz, e que o desempenho desses sistemas impacta diretamente o equilíbrio entre oferta e demanda no Sistema Interligado Nacional. Dessa forma, os resultados de bancada não apenas comprovam a eficiência do controle em ambiente laboratorial, mas também destacam a importância dessa tecnologia no cenário nacional.

Um aspecto interessante observado foi a integração da planta eólica com o simulador fotovoltaico existente no mesmo arranjo didático. Ainda que o foco deste trabalho seja a geração eólica, a possibilidade de operar de forma híbrida demonstra a aplicabilidade do sistema em estudos de microrredes, nas quais fontes distintas compartilham o mesmo barramento CC e são gerenciadas de forma coordenada. Os resultados sugerem que, em futuras pesquisas, pode-se explorar cenários híbridos eólicos-fotovoltaicos com análise de fluxo energético, impacto no banco de acumuladores e estratégias de despacho coordenado. Essa discussão amplia o alcance do trabalho, relacionando os experimentos laboratoriais com tendências atuais do setor elétrico.

O documento também traz informações sobre a construção e a flexibilidade de instalação dos alternadores, evidenciada pelos arranjos de eixo (reverso, padrão e flangeado) e pelo detalhamento dimensional. Esses dados são essenciais em estudos

acadêmicos, pois permitem compreender a integração do alternador ao conjunto da turbina eólica experimental, assegurando compatibilidade mecânica e elétrica. Além disso, o uso de materiais como alumínio e revestimento em epóxi reforça a robustez do equipamento para ensaios repetitivos em condições laboratoriais.

Por fim, os gráficos de potência e torque em função da rotação (RPM) apresentam o desempenho do alternador em diferentes tensões de saída. Essa informação é crucial no contexto do TCC, pois possibilita correlacionar o aumento da velocidade do vento (convertida em rotação do eixo) com a resposta elétrica do sistema, permitindo avaliar a eficiência da conversão de energia. Dessa forma, a análise gráfica serve como base comparativa entre teoria e prática, contribuindo para validar a viabilidade do uso de plantas eólicas em ambientes controlados e simulados.

Os resultados alcançados demonstram que a utilização de uma planta eólica em ambiente controlado oferece condições seguras e precisas para validar conceitos de desempenho e controle aplicáveis em sistemas reais. A análise detalhada das curvas de potência, a resposta dinâmica ao *MPPT*, a interação com o banco de acumuladores e até mesmo as falhas de comunicação registradas configuram um conjunto de evidências técnicas robustas. Tais evidências permitem não apenas comprovar o funcionamento dos algoritmos e componentes, mas também refletir sobre os desafios e soluções aplicáveis à realidade brasileira, em que a expansão da geração eólica exige mão de obra qualificada e domínio das tecnologias de supervisão e controle.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu compreender de forma aprofundada o desempenho de uma planta de energia eólica em ambiente controlado, ressaltando a importância dos estudos experimentais como ferramentas para validar teorias e aprimorar tecnologias aplicáveis à realidade brasileira. Os ensaios realizados demonstraram a eficácia da utilização de bancadas didáticas no processo de ensino-aprendizagem, bem como na análise de variáveis críticas para a eficiência energética, como a velocidade do vento, o ângulo das pás e a integração com sistemas de armazenamento.

A análise da turbina em diferentes condições de vento evidenciou a relevância da instrumentação precisa e do controle por algoritmos de rastreamento de máxima potência (MPPT). Esses mecanismos mostraram-se fundamentais para otimizar a extração de energia e garantir a estabilidade do sistema, o que é particularmente significativo quando se pensa na expansão da energia eólica em contextos reais e na necessidade de reduzir desperdícios energéticos.

Os resultados também confirmaram a importância da integração com bancos de acumuladores, que viabilizam a continuidade do fornecimento em momentos de baixa geração. Essa característica reforça a pertinência de sistemas híbridos, capazes de atender comunidades isoladas e reduzir a dependência de fontes fósseis, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade globais e nacionais.

Outro ponto relevante foi a identificação de falhas de comunicação na IHM, que, embora representem limitações, também revelam a necessidade de desenvolver sistemas de supervisão e controle mais robustos. Esses aspectos, quando tratados em ambiente controlado, fornecem insumos valiosos para aprimorar a confiabilidade das futuras instalações eólicas conectadas à rede.

O estudo demonstrou ainda que a utilização de plantas de microgeração eólica em laboratórios pode contribuir para a formação de engenheiros mais preparados para lidar com os desafios tecnológicos e ambientais do setor energético. Dessa forma, o trabalho reforça o papel da academia na integração entre teoria e prática, criando soluções aplicáveis tanto em pequena quanto em larga escala.

No contexto nacional, o Brasil apresenta grande potencial eólico, sobretudo em regiões como o Nordeste, e a realização de pesquisas em ambientes controlados possibilita adaptar tecnologias às condições locais. Esse aspecto é estratégico para a consolidação da energia eólica como uma das principais fontes da matriz elétrica brasileira nos próximos anos.

Além dos resultados técnicos, o trabalho também aponta para a relevância educacional da pesquisa, uma vez que permite o aprendizado prático dos conceitos de

geração renovável. A experiência laboratorial aproxima o estudante das tecnologias emergentes, estimulando a inovação e a busca por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis.

Por fim, conclui-se que o estudo de desempenho de uma planta de energia eólica em ambiente controlado é de fundamental importância para a evolução das pesquisas acadêmicas, para a consolidação de novos modelos de geração limpa e para a formação de profissionais aptos a enfrentar os desafios da transição energética. Os resultados alcançados reforçam o papel da energia eólica como um dos pilares da sustentabilidade e da segurança energética no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. J. **Energia eólica: fundamentos e aplicações no Brasil**. São Paulo: Atlas, 2017.
- ANDRADE, L. C. **Sistemas de energia renovável: uma abordagem prática**. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- ARAÚJO, P. R. **Energia elétrica e sustentabilidade**. Curitiba: Appris, 2018.
- BARBOSA, R. M. **Engenharia elétrica aplicada à geração de energia**. São Paulo: Érica, 2016.
- BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? Para quem?** 2. ed. São Paulo: Senac, 2018.
- BRITO, D. F. **Geração distribuída e energias renováveis**. Belo Horizonte: UFMG, 2019.
- CARVALHO, J. S. **Fontes alternativas de energia no Brasil**. Goiânia: Kelps, 2020.
- CAVALCANTI, M. F. **Sistemas elétricos de potência: operação e análise**. Recife: EdUFPE, 2017.
- CORRÊA, A. P. **Automação aplicada à energia renovável**. Florianópolis: UFSC, 2016.
- CUNHA, E. L. **Energia e meio ambiente: desafios contemporâneos**. Brasília: UnB, 2021.
- FERREIRA, A. C. **Introdução à energia renovável**. São Paulo: Blucher, 2016.
- GOMES, H. F. **Engenharia eólica: teoria e prática**. Porto Alegre: Bookman, 2020.
- LIMA, T. S. **Tecnologias limpas e desenvolvimento sustentável**. Fortaleza: UFC, 2019.
- MACHADO, I. R. **Energia solar e eólica: fundamentos e projetos**. São Paulo: Érica, 2015.
- MENDES, R. J. **Energia eólica no Brasil: desafios e perspectivas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- OLIVEIRA, A. G. **Sustentabilidade energética e inovação tecnológica**. Campinas: Papirus, 2022.
- PEREIRA, J. R. **Energia renovável: conceitos e aplicações**. Belo Horizonte: Fumarc, 2018.
- SILVA, D. M. **Engenharia de energias renováveis**. Salvador: EDUFBA, 2019.
- SOUZA, P. A. **Energias alternativas: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2015.
- TEIXEIRA, C. F. **Matriz energética brasileira: sustentabilidade e inovação**. Brasília: Ipea, 2021.