

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



Felipe de Castro Teixeira

**Análise Experimental de Microgeração Eólica com Conversão CC-CA e
Diferentes Condições de Carga**

ITUMBIARA/GO

2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLOGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E
PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

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: Felipe de Castro Teixeira

Matrícula: 201810401000199

Título do Trabalho: Análise Experimental de Microgeração Eólica com Conversão CC-CA e Diferentes Condições de Carga

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, 13/02/2026.
Local Data



Documento assinado digitalmente
FELIPE DE CASTRO TEIXEIRA
Data: 13/02/2026 11:15:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Felipe de Castro Teixeira

**Análise Experimental de Microgeração Eólica com Conversão CC-CA e
Diferentes Condições de Carga**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à 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. Dr. Victor Régis Bernadeli

ITUMBIARA/GO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

T266a Teixeira, Felipe de Castro

Análise experimental de microgeração eólica com conversão CC-CA e diferentes condições de carga. / Felipe de Castro Felipe. – Itumbiara, 2025.

75 p. : il.

Trabalho de conclusão do curso (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernadeli.

1. Energia. 2. Energia eólica. 3. Correntes contínuas. I. Título. II. Bernadeli, Victor Régis. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 333.92

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

Felipe de Castro Teixeira

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE MICROGERAÇÃO EÓLICA COM CONVERSÃO CC-CA E DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARGA

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 Bernadeli - 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

2026

Documento assinado eletronicamente por:

- **Thaissa de Melo Cesar**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/03/2026 16:12:54.
- **Hugo Xavier Rocha**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/03/2026 15:41:06.
- **Victor Regis Bernardeli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/03/2026 15:24:40.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/03/2026. 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: 755626

Código de Autenticação: e2a7a20cc1



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5654 (ramal: 5654)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida, pela saúde e por me conceder a sabedoria e a perseverança necessárias para concluir esta etapa. Sua presença foi essencial para que eu mantivesse a fé e a determinação diante dos desafios.

Aos meus pais, registro minha mais profunda gratidão. Foram vocês que me ensinaram, pelo exemplo, o valor do trabalho, da honestidade e da persistência. O apoio, o carinho e os conselhos que recebi ao longo desta jornada foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao Instituto Federal de Goiás – Câmpus Itumbiara, manifesto meu sincero reconhecimento por ter me proporcionado um ambiente rico em aprendizado, pesquisa e desenvolvimento pessoal. Foi nesta instituição que encontrei não apenas conhecimento técnico, mas também oportunidades de crescimento e amadurecimento para minha vida profissional.

Aos professores, técnicos e demais colaboradores, meu agradecimento por todo o empenho e dedicação na transmissão do conhecimento. Em especial, ao meu orientador Dr. Victor Régis Bernardelli, pela paciência, incentivo e competência com que conduziu a orientação deste trabalho, contribuindo não apenas com seu conhecimento técnico, mas também com conselhos valiosos para minha formação.

Aos colegas de curso, que se tornaram parceiros de estudo e amigos, agradeço pelas trocas de ideias, pela ajuda mútua e pelos momentos que tornaram esta caminhada mais leve e motivadora.

Aos amigos e familiares que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial, minha gratidão por cada palavra de incentivo e por todo suporte, mesmo nos períodos mais difíceis.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada gesto, cada conselho e cada apoio recebido fez parte desta conquista, que levo não apenas como um título acadêmico, mas como uma etapa significativa da minha vida.

“Não há fatos eternos,
como não há verdades absolutas.”

- Friedrich Nietzsche

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise experimental do desempenho de um sistema de microgeração eólica em bancada didática, operando em diferentes condições de carga e conversão de energia. Foram realizados ensaios em corrente contínua (CC) com cargas resistivas e em corrente alternada (CA), por meio de conversão CC-CA para alimentação de um motor trifásico com partidas estrela e triângulo. O sistema utilizado é composto por um aerogerador, banco de acumuladores, conversores e módulos de controle, permitindo medições diretas pela Interface Homem-Máquina (IHM). As variáveis monitoradas incluem tensão, corrente, potência e rotação, possibilitando comparações de desempenho entre as diferentes configurações. Os resultados indicaram que, no regime de corrente contínua (CC) com cargas resistivas, a variação de carga e velocidade impacta significativamente a potência entregue e a estabilidade operacional. Já na conversão CC-CA, a configuração em triângulo apresentou maior potência no consumo de corrente contínua (CC), enquanto a partida em estrela ofereceu operação mais estável e com menor exigência elétrica. Os ensaios realizados contribuem para a compreensão do comportamento de sistemas eólicos de microgeração, auxiliando na otimização de projetos para aplicações off-grid.

Palavras chave: Energia Eólica, Microgeração, Conversão CC-CA, Partida Estrela-Triângulo, Bancada Didática.

ABSTRACT

This paper presents an experimental analysis of the performance of a wind microgeneration system on a teaching bench, operating under different load and energy conversion conditions. Tests were carried out in direct current (DC) with resistive loads and in alternating current (AC), using DC-AC conversion to power a three-phase motor with star and delta starts. The system used consists of a wind turbine, battery bank, converters, and control modules, allowing direct measurements through the Human-Machine Interface (HMI). The variables monitored include voltage, current, power, and rotation, enabling performance comparisons between different configurations. The results indicated that, in direct current (DC) mode with resistive loads, load and speed variation significantly impacts the power delivered and operational stability. In DC-AC conversion, the delta configuration showed higher power in direct current (DC) consumption, while the star start offered more stable operation and lower electrical demand. The tests performed contribute to the understanding of the behavior of microgeneration wind systems, helping to optimize designs for off-grid applications.

Keywords: Wind Energy, Microgeneration, DC-AC Conversion, Star-Delta Starting, Educational Bench.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Endereços Modbus da bancada DLB GENT-155-BR para integração com CLPs e sistemas supervisórios.	41
Tabela 2 - Resultados obtidos com duas cargas resistivas de 50 W / 12 V conectadas em paralelo.	51
Tabela 3 - Resultados obtidos com uma cargas resistivas de 50 W / 12 V conectadas em paralelo.	54
Tabela 4 - Resultados obtidos com o sistema em vazio.	57
Tabela 5 - Parâmetros configurados no CFW500 para o motor DLB11149.	65
Tabela 6 - Resultados obtidos no modo estrela.	69
Tabela 7 - Resultados obtidos no modo triângulo.	71

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bancada DLB GENT-155-BR montada e desligada.	26
Figura 2 – Bancada DLB GENT-155-BR montada e ligada.	26
Figura 3 – Aerogerador da bancada didática DLB GENT-155-BR, utilizado para simulação de geração eólica em ambiente controlado.	28
Figura 4 – Módulo DLB08029 - Controle de Carga (Conversor CC/CC).	29
Figura 5 – Bateria estacionária Freedom DF300 (12 V), utilizada no banco de baterias da bancada DLB GENT-155-BR.	30
Figura 6 – Vista superior da bateria estacionária Freedom DF300 acoplada ao módulo DLB08033 da bancada DLB GENT-155-BR.	31
Figura 7 – Vista frontal do módulo de cargas CA/CC DLB11183.	32
Figura 8 – Vista traseira do módulo DLB11183, com saída de ventilação.	33
Figura 9 – Tela principal da IHM exibindo os módulos conectados via Modbus na bancada DLB GENT-155-BR.	34
Figura 10 – Tela da IHM mostrando o fluxo de potência em corrente contínua (CC) entre o gerador, o banco de acumuladores e as cargas.	34
Figura 11 – Tela de controle do aerogerador com opções de ajuste de velocidade e estado de operação.	35
Figura 12 – Tela da IHM apresentando gráficos de tensão, corrente e potência para o gerador, banco de acumuladores e cargas.	36
Figura 13 – Tela da IHM apresentando a legenda das variáveis exibidas no gráfico de desempenho energético.	36
Figura 14 – Módulo DLB08030 - Conversor CC/CA 12 V Off-Grid com inversor externo.	37
Figura 15 – Módulo DLB11129 - Partida Estrela/Triângulo e CFW500.	38
Figura 16 – Módulo DLB11149 - Motor trifásico de indução.	39
Figura 17 – Placa de identificação do motor trifásico (dados técnicos).	40
Figura 18 – Tela da IHM com ilustração do fluxo de energia do sistema para o Cenário 1, operando com o aerogerador em 100% da velocidade.	49
Figura 19 – Gráfico MPPT exibido na IHM para o Cenário 1, representando a variação de tensão, corrente e potência ao longo do tempo (1 minuto), com o aerogerador em 100% de velocidade.	50

Figura 20 – Tela da IHM com os valores instantâneos de tensão, corrente e potência do painel (aerogerador), banco de baterias e consumo de corrente contínua (CC) para o Cenário 1, operando a 100% da velocidade.	50
Figura 21 – Gráfico comparativo das grandezas elétricas em função da rotação do aerogerador (Cenário 1).	51
Figura 22 – Tela da IHM com ilustração do fluxo de energia do sistema para o Cenário 2, operando com aerogerador em 100% de velocidade.	52
Figura 23 – Gráfico MPPT exibido na IHM para o Cenário 2, representando a variação de tensão, corrente e potência ao longo do tempo (1 minuto), com o aerogerador em 100% de velocidade.	53
Figura 24 – Tela da IHM com os valores instantâneos de tensão, corrente e potência do painel (aerogerador), banco de baterias e consumo de corrente contínua (CC) para o Cenário 2, operando a 100% da velocidade.	53
Figura 25 – Gráfico comparativo das grandezas elétricas em função da rotação do aerogerador (Cenário 2).	54
Figura 26 – Tela da IHM com ilustração do fluxo de energia do sistema para o Cenário 3, operando com aerogerador em 100% de velocidade.	55
Figura 27 – Gráfico MPPT exibido na IHM para o Cenário 3, representando a variação de tensão, corrente e potência ao longo do tempo (1 minuto), com o aerogerador em 100% de velocidade.	56
Figura 28 – Tela da IHM com os valores instantâneos de tensão, corrente e potência do painel (aerogerador), banco de baterias e consumo de corrente contínua (CC) para o Cenário 3, operando a 100% da velocidade.	56
Figura 29 – Gráfico comparativo das grandezas elétricas em função da rotação do aerogerador (Cenário 3).	57
Figura 30 – Comparação da potência gerada em função da rotação do aerogerador para os três cenários.	58
Figura 31 – Comparação da potência gerada em função da rotação do aerogerador para os três cenários.	61
Figura 32 – Tela da IHM mostrando o fluxo de energia no modo estrela.	67
Figura 33 – Tela da IHM mostrando o gráfico MPPT no modo estrela.	68
Figura 34 – Tela da IHM com os valores medidos no modo estrela.	68

Figura 35 – Variação das grandezas elétricas em função da rotação no modo estrela.	69
Figura 36 – Tela da IHM mostrando o fluxo de energia no modo triângulo.	70
Figura 37 – Tela da IHM mostrando o gráfico MPPT no modo triângulo.	70
Figura 38 – Tela da IHM com os valores medidos no modo triângulo.	71
Figura 39 – Variação das grandezas elétricas em função da rotação no modo triângulo.	72
Figura 40 – Comparação da potência do consumo de corrente alternada (CA) nos modos estrela e triângulo em função da rotação do aerogerador.	73
Figura 41 – Comparação da potência do consumo de corrente contínua (CC) em função da rotação do motor para partida Estrela e Triângulo.	75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CLP – Controlador Lógico Programável

GWEC – Conselho Global de Energia Eólica (*Global Wind Energy Council*)

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*)

IEA – Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*)

IoT – Internet das Coisas (*Internet of Things*)

IHM – Interface Homem-Máquina

IRENA – Agência Internacional de Energias Renováveis (*International Renewable Energy Agency*)

MPPT – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking*)

SCADA – Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2 PROBLEMAS DE PESQUISA	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.4 JUSTIFICATIVA	18
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2. CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE EM MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA ON-GRID E OFF-GRID	20
2.1 INTRODUÇÃO A MICROGERAÇÃO DE ENERGIA	20
2.2 SISTEMAS ON-GRID: ARQUITETURA E CONTROLE	20
2.3 SISTEMAS OFF-GRID: AUTONOMIA E SUSTENTABILIDADE	21
2.4 INTEGRAÇÃO HÍBRIDA: VANTAGENS E DESAFIOS	22
2.5 CONTROLE AVANÇADO E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL	22
2.6 AUTOMAÇÃO, SCADA E INTERNET DAS COISAS (IoT)	23
2.7 SUSTENTABILIDADE, NORMATIZAÇÃO E DESAFIOS AMBIENTAIS	23
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
3. CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DA BANCADA	25
3.1 INTRODUÇÃO	25
3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA BANCADA DLB GENT-155-BR	25
3.3 COMPONENTES DA BANCADA	27
3.3.1 GERADOR EÓLICO SIMULADO - AEROGERADOR TRIFÁSICO	27
3.3.2 CONVERSORES DE POTÊNCIA	28
3.3.3 BANCO DE BATERIAS	29
3.3.4 CARGAS RESISTIVAS	31
3.3.5 INSTRUMENTOS DE MEDIDA E INTERFACE	33

3.3.6	MÓDULO DLB08030 - CONVERSOR CC/CA 12V OFF-GRID	37
3.3.7	MÓDULO DLB11129 - PARTIDA ESTRELA/TRIÂNGULO E ACIONAMENTO DO MOTOR TRIFÁSICO	38
3.3.8	MÓDULO DLB11149 - MOTOR TRIFÁSICO	39
3.3.9	CLP E SUPERVISÃO	40
3.4	ARQUITETURA DE CONTROLE E FLUXO DE ENERGIA	42
3.4.1	VISÃO GERAL DO SISTEMA	42
3.4.2	FLUXO DE ENERGIA	42
3.4.3	ARQUITETURAS DE CONTROLE	43
3.4.4	MODOS DE OPERAÇÃO	43
3.5	POSSIBILIDADES DIDÁTICAS E EXPERIMENTAÇÕES	44
3.5.1	APLICAÇÕES NO ENSINO	44
3.5.2	TIPOS DE EXPERIMENTOS POSSÍVEIS	44
3.5.3	BENEFÍCIOS DIDÁTICOS	45
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
4.	CAPÍTULO IV - ANÁLISE EXPERIMENTAL EM CORRENTE CONTÍNUA (CC) COM CARGAS RESISTIVAS	47
4.1	INTRODUÇÃO	47
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	47
4.3	RESULTADOS OBTIDOS	48
4.3.1	CENÁRIO 1 - DUAS CARGAS DE 50W/12V	48
4.3.2	CENÁRIO 2 - UMA CARGA DE 50W/12V	52
4.3.3	CENÁRIO 3 - SISTEMA EM VAZIO	55
4.3.4	COMPARAÇÃO GERAL	58
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
4.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS	61
5.	CAPÍTULO V - CONVERSÃO CC-CA E PARTIDA ESTRELA/TRIÂNGULO DE MOTOR TRIFÁSICO	63

5.1	INTRODUÇÃO	63
5.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	63
5.3	RESULTADOS OBTIDOS	66
5.3.1	RESULTADOS EM LIGAÇÃO ESTRELA	66
5.3.2	RESULTADOS EM LIGAÇÃO TRIÂNGULO	70
5.3.3	COMPARAÇÃO ENTRE MODOS DE PARTIDA	72
5.4	ANÁLISES DOS RESULTADOS	73
5.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS	75
6.	CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO	77
6.1	TRABALHOS FUTUROS	77

1. CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renovável tem incentivado o estudo e desenvolvimento de tecnologias que aproveitam recursos naturais de forma eficiente e sustentável. Entre essas fontes, a energia eólica destaca-se por seu baixo impacto ambiental e potencial de aplicação em diferentes escalas, desde grandes parques de geração até sistemas de microgeração.

Os sistemas de microgeração eólica oferecem soluções viáveis para locais remotos ou aplicações isoladas, onde o acesso à rede elétrica não é possível ou economicamente inviável. Em especial, configurações off-grid demandam estratégias eficientes de conversão e armazenamento para atender diferentes perfis de carga e garantir estabilidade na entrega de energia.

No campo da Engenharia de Controle e Automação, a análise experimental de sistemas eólicos em bancadas didáticas permite investigar seu comportamento sob diferentes condições de operação, oferecendo dados concretos para otimização de desempenho e desenvolvimento de soluções aplicáveis.

1.2 PROBLEMAS DE PESQUISA

Apesar da consolidação da tecnologia eólica, sistemas de microgeração ainda apresentam desafios relacionados à adaptação para cargas variadas e à eficiência da conversão de energia. Fatores como velocidade do vento, tipo de carga e método de conversão impactam diretamente o desempenho global.

Nesse contexto, surge a questão central:

“Como diferentes configurações de carga e métodos de conversão de energia afetam o desempenho de um sistema de microgeração eólica em bancada didática?”

1.3 OBJETIVOS

- Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de um sistema de microgeração eólica em bancada didática, operando com diferentes cargas e métodos de conversão de energia.

- Objetivos Específicos

- ❖ Analisar o comportamento do sistema operando em corrente contínua (CC) com cargas resistivas;
- ❖ Avaliar a conversão CC-CA para alimentação de motor trifásico com partidas estrela e triângulo;
- ❖ Comparar os resultados obtidos nas diferentes configurações quanto à potência entregue, estabilidade e exigência elétrica;
- ❖ Identificar limitações e potencialidades do sistema para aplicações off-grid.

1.4 JUSTIFICATIVA

O estudo de microgeração eólica em escala didática permite reproduzir e analisar cenários próximos da realidade, de forma controlada e segura. Isso possibilita compreender como a interação entre gerador, conversores e cargas influencia o desempenho global, fornecendo subsídios para a otimização de sistemas isolados.

Os resultados podem contribuir para melhorar a eficiência e confiabilidade de soluções aplicadas em regiões remotas, além de fortalecer a formação acadêmica e técnica na área de energias renováveis.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos:

- Capítulo I – Introdução: apresenta o contexto, a problemática, os objetivos e a justificativa do estudo;
- Capítulo II – Estado da Arte em Microgeração de Energia Eólica On-Grid e Off-Grid: aborda fundamentos teóricos, tecnologias e estudos relacionados;
- Capítulo III – Descrição da Bancada: detalha a composição e o funcionamento dos módulos utilizados;
- Capítulo IV – Análise Experimental em Corrente Contínua (CC) com Cargas Resistivas: apresenta procedimentos, resultados e análise dessa configuração;
- Capítulo V – Conversão CC-CA e Partida Estrela/Triângulo de Motor Trifásico: descreve os ensaios, resultados e comparações para essa configuração;
- Capítulo VI – Conclusão: sintetiza os principais achados e propõe perspectivas para trabalhos futuros.
- Capítulo VII - Referências Bibliográficas

2. CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE EM MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA ON-GRID E OFF-GRID

2.1 INTRODUÇÃO A MICROGERAÇÃO DE ENERGIA

A necessidade global de diversificação da matriz energética e de redução das emissões de gases de efeito estufa tem impulsionado o uso de fontes renováveis de energia, especialmente em regiões onde a infraestrutura de distribuição é limitada. A microgeração eólica, definida como a geração descentralizada de energia por meio de turbinas eólicas de microgeração (tipicamente com potência até 100 kW), tem ganhado destaque tanto em aplicações urbanas quanto rurais.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), a energia eólica já representa mais de 13% da geração elétrica nacional. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2022) aponta que o Brasil ocupa a quarta posição mundial em capacidade instalada, impulsionado especialmente pelos parques da região Nordeste. A Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2023) confirma esse crescimento, reforçando o potencial competitivo do setor.

Com a evolução das tecnologias de controle, armazenamento e comunicação, os sistemas de microgeração eólica podem operar em duas configurações principais: on-grid (conectados à rede elétrica) e off-grid (isolados). Este capítulo apresenta uma revisão detalhada do estado da arte de aproximadamente 20 estudos recentes sobre o tema, destacando aspectos técnicos, avanços em automação, controle inteligente e tendências futuras.

2.2 SISTEMAS ON-GRID: ARQUITETURA E CONTROLE

Sistemas on-grid estão conectados diretamente à rede de distribuição de energia. A principal vantagem desses sistemas é a possibilidade de injetar o excedente da energia gerada na rede, garantindo maior eficiência econômica por meio de mecanismos como o net metering. Diversos estudos têm abordado o papel dos inversores inteligentes nesses sistemas, que são responsáveis por adaptar a

energia gerada em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) sincronizada com os parâmetros da rede.

Segundo Zhang et al. (2023), os algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) têm papel essencial na eficiência dos sistemas on-grid, pois maximizam a potência extraída da turbina conforme variações de vento. Além disso, autores como Lopes et al. (2021) destacam a importância dos inversores baseados em controle vetorial para garantir a estabilidade do sistema mesmo em condições adversas da rede.

O desenvolvimento tecnológico também tem ampliado a eficiência dos geradores aplicados em aerogeradores. A utilização de rotores com ímãs permanentes possibilita maior eficiência energética e menor manutenção (CUPERTINO, 2018; NIEDERLE, 2018). Historicamente, a evolução das turbinas modernas, desde os moinhos de vento até os aerogeradores de grande porte, foi relatada por Diniz Neto (2014). Mais recentemente, Queiroz (2021) evidenciou a aplicação de materiais leves e resistentes, como fibra de carbono, que aumentam a durabilidade e capacidade das pás.

Um aspecto crítico discutido por diversos autores é a vulnerabilidade dos sistemas on-grid às falhas na rede elétrica. Durante apagões, por exemplo, a maioria dos sistemas on-grid é automaticamente desconectada para evitar o chamado "islanding", o que pode comprometer a autonomia do sistema.

A International Renewable Energy Agency (IRENA, 2022) destaca que a capacidade global instalada de energia eólica ultrapassou 900 GW em 2022. De acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC, 2023), a tendência é de duplicação dessa capacidade até 2030, consolidando a energia eólica como protagonista da transição energética mundial. A International Energy Agency (IEA, 2023) corrobora essa visão, ressaltando os avanços tecnológicos das turbinas de grande porte.

2.3 SISTEMA OFF-GRID: AUTONOMIA E SUSTENTABILIDADE

Sistemas off-grid operam de forma autônoma, normalmente utilizando banco de baterias para armazenamento da energia gerada. Esses sistemas são comuns em regiões remotas e ilhas, onde a extensão da rede elétrica é inviável. A literatura

mostra que a maioria dos sistemas off-grid atuais é híbrida, combinando fontes solar e eólica com armazenamento em baterias de íon-lítio, que oferecem alta densidade de energia e maior vida útil.

Chen et al. (2020) exploram a aplicação de microcontroladores no gerenciamento de carga, com algoritmos inteligentes que equilibram a geração e o consumo em tempo real. Outros autores têm utilizado técnicas de inteligência artificial, como redes neurais e controle fuzzy, para prever a disponibilidade de vento e regular o carregamento das baterias, como descrito por Kumar et al. (2022).

2.4 INTEGRAÇÃO HÍBRIDA: VANTAGENS E DESAFIOS

A integração entre fontes renováveis é uma tendência crescente na microgeração. Sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos apresentam vantagens como complementaridade na geração de energia (sol de dia, vento à noite) e redução da dependência de um único recurso natural. Estudos mostram que a gestão de energia em sistemas híbridos exige controladores adaptativos e sistemas de supervisão sofisticados.

Com o uso de ferramentas como HOMER Pro e MATLAB/Simulink, pesquisadores como Fernandes et al. (2023) têm conseguido dimensionar sistemas otimizados com menor custo nivelado de energia (LCOE) e maior retorno do investimento (payback médio entre 5 e 8 anos).

2.5 CONTROLE AVANÇADO E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

No contexto da Engenharia de Controle e Automação, diversas pesquisas aplicam técnicas de controle avançado como:

- Controle Fuzzy: capaz de lidar com a não linearidade dos sistemas e variabilidades ambientais;
- ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System): combina redes neurais com lógica fuzzy para tomada de decisão em tempo real;

- MPC (Model Predictive Control): usa previsões futuras do sistema para otimizar o controle a cada instante.

Essas abordagens permitem manter a tensão e a frequência dentro dos limites mesmo em condições de carga dinâmica ou variação de vento. Samrat et al. (2023) demonstraram que controladores fuzzy apresentam desempenho superior ao PID tradicional em termos de tempo de resposta e estabilidade.

2.6 AUTOMAÇÃO, SCADA E INTERNET DAS COISAS (IoT)

A integração de sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) com a tecnologia IoT tem revolucionado a gestão da microgeração. Utilizando protocolos como MQTT e plataformas em nuvem, é possível monitorar turbinas, inversores e baterias em tempo real.

Autores como AbouArkoub et al. (2021) mostram a viabilidade de interfaces baseadas em web-SCADA, utilizando plataformas como Ignition e LabVIEW para desenvolver dashboards que exibem tensão, corrente, potência, temperatura e falhas do sistema.

A aplicação de sensores de baixo custo e controladores como Arduino, ESP32 e Raspberry Pi também é comum em sistemas didáticos e protótipos de TCCs.

2.7 SUSTENTABILIDADE, NORMATIZAÇÃO E DESAFIOS AMBIENTAIS

Apesar das vantagens ambientais, a microgeração eólica também apresenta desafios. O ruído gerado por turbinas de eixo horizontal, o impacto visual e o descarte inadequado de baterias são preocupações crescentes. Além disso, a falta de normatização específica no Brasil dificulta a expansão comercial desses sistemas.

Goldemberg (2007) ressalta que a utilização da energia eólica contribui de forma significativa para o desenvolvimento sustentável, por reduzir emissões e ampliar a autonomia energética. Contudo, impactos ambientais também precisam ser considerados, como a colisão de aves e morcegos nas pás das turbinas, apontada por Porciúncula (2019). Além disso, Losekann (2018) destaca que a diversificação da matriz energética, aliada ao uso de fontes renováveis, é fundamental para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e ampliar a segurança energética do país.

A norma internacional IEC 61400-25 define diretrizes para comunicação e monitoramento de turbinas eólicas, sendo citada como referência para implementação segura e eficiente de sistemas automatizados.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão da literatura revela que a microgeração eólica, tanto on-grid quanto off-grid, representa uma alternativa tecnológica promissora para diversificação energética. O avanço em técnicas de controle, integração com sistemas fotovoltaicos, automação e comunicação IoT tem permitido soluções mais robustas, eficientes e sustentáveis.

No Brasil, a atratividade da energia eólica tem se destacado pela abundância de ventos, especialmente na região Nordeste, onde a expansão foi mais acelerada (SILVA, 2018). Além disso, Passini (2021) reforça que a eletricidade proveniente de fontes limpas está diretamente associada ao desenvolvimento econômico e social, consolidando a energia eólica como uma alternativa estratégica para o futuro energético nacional.

Para estudantes de Engenharia de Controle e Automação, este campo oferece ampla possibilidade de pesquisa aplicada, seja no desenvolvimento de controladores inteligentes, na prototipação de sistemas supervisionados, ou na modelagem e simulação de plantas híbridas com suporte de ferramentas computacionais.

3. CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DA BANCADA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada a descrição detalhada da bancada experimental utilizada para a implementação e análise de microgeração de energia eólica. A bancada é composta pela planta didática da De Lorenzo, modelo DLB GENT-155-BR, projetada especificamente para estudo e experimentação de sistemas de geração de energia com fonte eólica, com aplicação em sistemas on-grid e off-grid. A estrutura do sistema contempla módulos de controle, inversores, conversores, banco de baterias, gerador eólico simulado, resistores de carga e instrumentos de medição.

3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA BANCADA DLB GENT-155-BR

A bancada DLB GENT-155-BR simula o funcionamento de uma instalação real de microgeração de energia eólica. Ela é constituída por um conjunto modular montado sobre estrutura didática em perfil de alumínio, com rodas para mobilidade, e painéis fixados contendo os diversos elementos elétricos e eletrônicos de medição, controle e conversão de energia.

A planta contempla tanto a conversão da energia mecânica em elétrica via motor de corrente contínua (CC) (que simula o gerador eólico), quanto o condicionamento da energia para conexão à rede ou para armazenamento em banco de baterias. Ela é adequada para estudos envolvendo as topologias de sistemas on-grid (interligados à rede) e off-grid (isolados).

A Figura 1 apresenta a bancada em seu estado desligado, evidenciando a organização dos módulos, cabeamento e estrutura física.

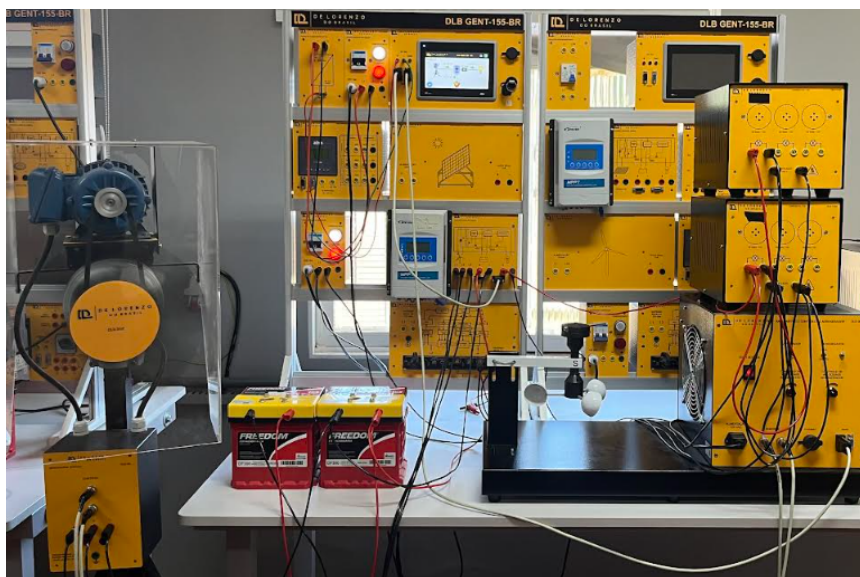
Figura 1 – Bancada DLB GENT-155-BR montada e desligada.



Fonte: Autoria própria.

Já a Figura 2 mostra a bancada em funcionamento, com os módulos energizados e medições sendo exibidas nos instrumentos de leitura integrados. Essa visualização demonstra o comportamento real da planta durante os testes e experimentos.

Figura 2 – Bancada DLB GENT-155-BR montada e ligada.



Fonte: Autoria própria.

3.3 COMPONENTES DA BANCADA

A planta DLB GENT-155-BR é composta por diversos componentes que simulam um sistema completo de geração eólica em pequena escala:

3.3.1 GERADOR EÓLICO SIMULADO - AEROGERADOR TRIFÁSICO

Na bancada DLB GENT-155-BR, a geração eólica é simulada por meio de um sistema composto por um motor de corrente contínua (CC) acoplado a um gerador trifásico, denominado módulo Aerogerador Trifásico. O motor é responsável por acionar mecanicamente o eixo do gerador, reproduzindo a ação do vento sobre uma turbina eólica real.

A velocidade de rotação do motor pode ser ajustada manualmente por meio de um potenciômetro no painel frontal, permitindo ao usuário simular diferentes intensidades de vento e observar a resposta elétrica do sistema. A energia gerada é trifásica, com características reais, e é encaminhada aos módulos de conversão de energia para posterior retificação, armazenamento ou injeção na rede.

Esse conjunto permite o estudo de variáveis elétricas (tensão, corrente, frequência) em condições controladas, reproduzindo fielmente o comportamento de uma turbina eólica de microgeração.

A Figura 3 apresenta o módulo Aerogerador Trifásico utilizado na simulação.

Figura 3 – Aerogerador da bancada didática DLB GENT-155-BR, utilizado para simulação de geração eólica em ambiente controlado.



Fonte: Autoria própria.

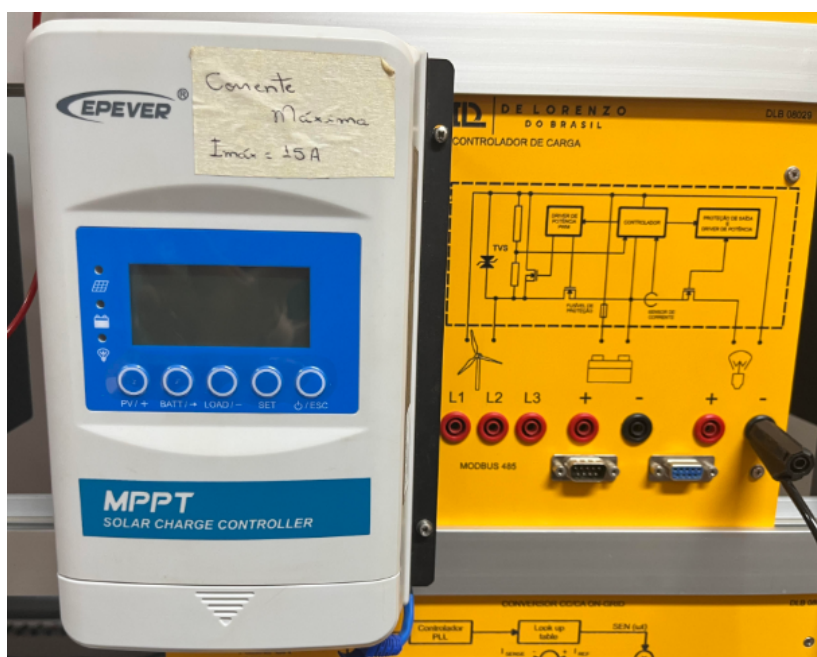
3.3.2 CONVERSORES DE POTÊNCIA

A bancada didática DLB GENT-155-BR é equipada com um conjunto completo de módulos de conversão de energia, permitindo a simulação prática dos principais processos envolvidos em sistemas de microgeração eólica, tanto em aplicações on-grid quanto off-grid.

A primeira etapa de conversão é realizada por um retificador trifásico, responsável por transformar a energia alternada proveniente do aerogerador em corrente contínua (CC). Esse retificador está incorporado internamente à estrutura da bancada, não sendo acessado como módulo independente, mas exercendo papel fundamental no condicionamento inicial da energia.

Na sequência, o módulo DLB 08029 – Controlador de Carga atua como conversor CC/CC, regulando a tensão do barramento contínuo e controlando o carregamento do banco de baterias. Este módulo garante o equilíbrio energético do sistema em modo isolado, prevenindo sobrecargas e controlando a direção do fluxo de energia.

Figura 4 – Módulo DLB 08029 – Controlador de Carga (Conversor CC/CC).



Fonte: Autoria própria.

3.3.3 BANCO DE BATERIAS

O banco de baterias da bancada DLB GENT-155-BR é responsável pelo armazenamento da energia elétrica em corrente contínua (CC), possibilitando a operação do sistema em modo off-grid, ou seja, sem conexão direta com a rede elétrica. No experimento, são utilizadas duas baterias estacionárias Freedom DF300,

cada uma com tensão nominal de 12 V, conectadas em série para compor um sistema de 24 V.

As baterias do tipo estacionária ventilada foram desenvolvidas para aplicações em sistemas de energia que demandam alta confiabilidade em ciclos de carga e descarga. O modelo Freedom DF300 possui capacidade nominal de 30 Ah (C100) e tensão de flutuação de 13,4 V a 25 °C, sendo adequado para uso didático e experimental em aplicações de microgeração.

A Figura 5 apresenta uma das baterias utilizadas na bancada, evidenciando o modelo, polos de conexão e identificação técnica.

Figura 5 – Bateria estacionária Freedom DF300 (12 V), utilizada no banco de baterias da bancada DLB GENT-155-BR.



Fonte: Autoria própria.

Essas baterias estão integradas ao sistema por meio do módulo DLB 08029 – Controlador de Carga, que realiza o gerenciamento da energia no barramento de corrente contínua (CC), controlando a entrada e saída de corrente das baterias, protegendo contra sobrecargas, subtensões e condições de operação inseguras.

A Figura 6 mostra a vista superior da bateria, já conectada fisicamente ao módulo DLB 08033, evidenciando o acoplamento à estrutura da bancada e os detalhes construtivos do conjunto.

Figura 6 – Vista superior da bateria estacionária Freedom DF300 acoplada ao módulo DLB 08033 da bancada DLB GENT-155-BR.



Fonte: Autoria própria.

Esse sistema de armazenamento torna possível a análise do comportamento do sistema em diferentes condições de carga, além de permitir a transição entre os modos on-grid e off-grid de forma segura e didática.

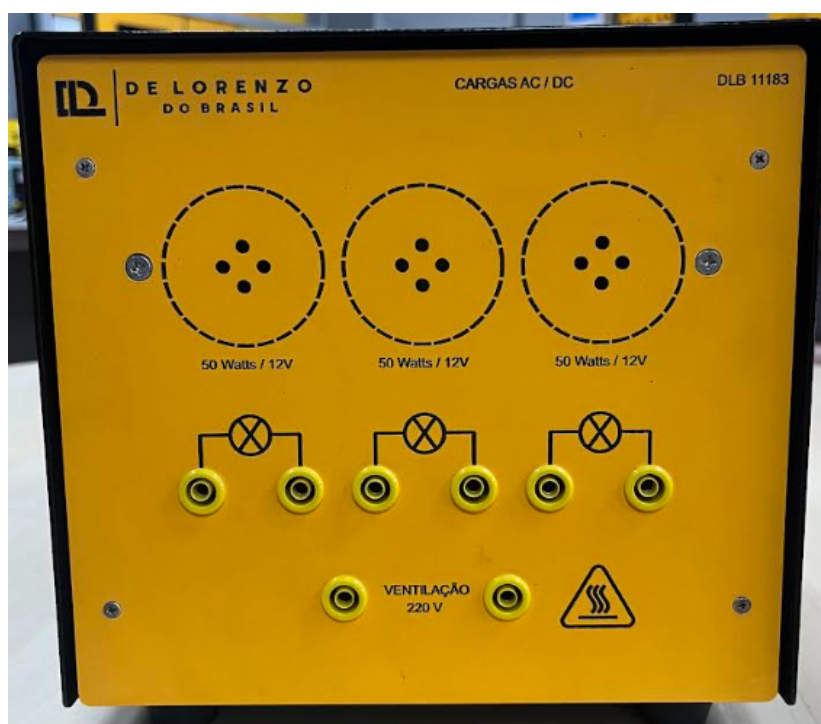
3.3.4 CARGAS RESISTIVAS

O módulo de cargas resistivas utilizado na bancada é o DLB 11183 – Cargas CA/CC, fabricado pela De Lorenzo. Ele é composto por três resistências comutáveis de 50 W e 12 V, totalizando uma potência máxima de 150 W. Por meio de chaves seletoras no painel frontal, é possível ativar individualmente cada carga, o que permite simular diferentes níveis de consumo elétrico durante os testes experimentais.

Para os propósitos deste trabalho, foram utilizadas duas das três cargas disponíveis, configurando um consumo de até 100 W sob tensão de 12 V, o que representa uma condição intermediária de carga para avaliar a resposta do sistema em regime estável e transitório.

Além disso, o módulo conta com ventilação na parte traseira, garantindo a dissipação de calor gerado pelas resistências durante períodos prolongados de operação. A Figura 7 apresenta a vista frontal do equipamento, e a Figura 8 mostra a saída de ventilação localizada na parte traseira do módulo.

Figura 7 – Vista frontal do módulo de cargas CA/CC DLB 11183.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 – Vista traseira do módulo DLB 11183, com saída de ventilação forçada.



Fonte: Autoria própria.

3.3.5 INSTRUMENTOS DE MEDIDA E INTERFACE

A bancada DLB GENT-155-BR conta com uma Interface Homem-Máquina (IHM) modelo X2 Base da Altus, que desempenha o papel central de supervisão e

controle do sistema. Por meio dessa interface, o operador pode monitorar em tempo real as variáveis elétricas do gerador, do banco de baterias e das cargas em corrente contínua (CC), além de atuar sobre o sistema, ajustando parâmetros e realizando comandos de operação.

A IHM apresenta uma tela inicial com a topologia da planta, exibindo os módulos conectados via protocolo Modbus RTU e seus respectivos endereços de comunicação. Essa tela fornece uma visão geral da integração entre os dispositivos da bancada.

Figura 9 – Tela principal da IHM exibindo os módulos conectados via Modbus na bancada DLB GENT-155-BR.



Fonte: Autoria própria.

Além da tela inicial, a IHM disponibiliza telas funcionais específicas que permitem analisar o fluxo de energia em corrente contínua (CC), indicando o comportamento do gerador, do banco de acumuladores e das cargas conectadas. Nessas telas, é possível observar de forma gráfica como a energia está sendo gerada, armazenada e consumida.

Figura 10 – Tela da IHM mostrando o fluxo de potência em corrente contínua (CC) entre o gerador, o banco de acumuladores e as cargas.



Fonte: Autoria própria.

O sistema também conta com uma tela dedicada ao controle do aerogerador, onde podem ser ajustados parâmetros como a velocidade simulada do vento e a rotação do gerador, além de possibilitar o acionamento ou desligamento do sistema. Essa interface facilita a realização de diferentes cenários experimentais, permitindo avaliar a resposta dinâmica da planta.

Figura 11 – Tela de controle do aerogerador com opções de ajuste de velocidade e estado de operação.



Fonte: Autoria própria.

Outro recurso relevante da IHM é a apresentação de gráficos em tempo real, que exibem a evolução das principais grandezas elétricas, como tensão, corrente e potência do gerador, do banco de acumuladores e do consumo em corrente contínua (CC). Embora a interface utilize a nomenclatura painel fotovoltaico, os dados apresentados referem-se, neste experimento, ao aerogerador da bancada, já que o software é compartilhado para simulações fotovoltaicas e eólicas.

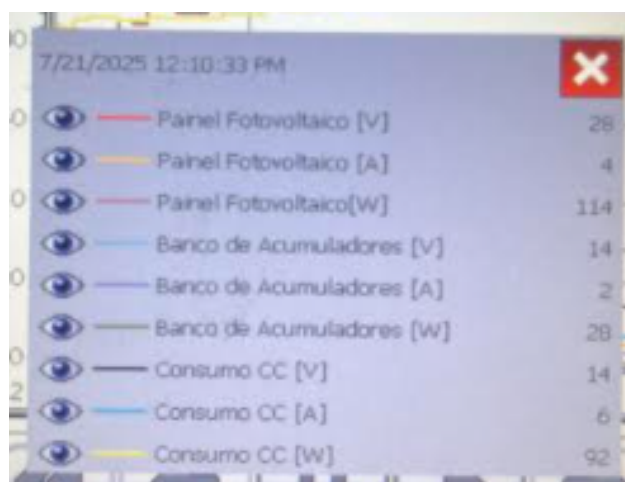
Figura 12 – Tela da IHM apresentando gráficos de tensão, corrente e potência para o gerador, banco de acumuladores e cargas.



Fonte: Autoria própria.

A IHM ainda fornece uma tela auxiliar que identifica quais variáveis são representadas em cada linha do gráfico, permitindo ao operador correlacionar os dados de tensão, corrente e potência do gerador, do banco de acumuladores e das cargas em corrente contínua (CC). Essa legenda facilita a análise do comportamento energético do sistema e a interpretação dos resultados obtidos durante os experimentos.

Figura 13 – Tela da IHM apresentando a legenda das variáveis exibidas no gráfico de desempenho energético.



Fonte: Autoria própria.

A utilização da IHM como principal meio de operação e supervisão torna a bancada mais didática e prática, integrando as funções de medição, controle e análise em uma única plataforma, o que possibilita maior flexibilidade na realização de testes e simulações.

3.3.6 MÓDULO DLB08030 - CONVERSOR CC/CA 12V OFF-GRID

O módulo DLB08030 consiste em um conversor de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), projetado para aplicações off-grid. Sua função é converter a energia elétrica proveniente do banco de acumuladores (12V e corrente contínua (CC) ou do aerogerador em tensão alternada, permitindo a alimentação de cargas em corrente alternada (CA).

O inversor responsável pela conversão encontra-se instalado externamente ao módulo, mas é parte integrante do conjunto. O DLB08030 não realiza medições nem possui interface de controle própria, atuando exclusivamente na conversão energética. Sua construção inclui conexões seguras para alimentação e saída, além de proteções contra sobrecarga e curto-circuito, garantindo operação confiável.

Figura 14 – Módulo DLB08030 – Conversor CC/CA 12 V Off-Grid com inversor externo.



Fonte: Autoria própria.

3.3.7 MÓDULO DLB11129 - PARTIDA ESTRELA/TRIÂNGULO E ACIONAMENTO DO MOTOR TRIFÁSICO

O módulo DLB11129 é responsável pelo acionamento de motores trifásicos e pela seleção manual do modo de partida, oferecendo três posições: desligado, estrela e triângulo. Ele incorpora um inversor de frequência WEG CFW500, que possibilita o controle da velocidade e monitoração de parâmetros elétricos do motor, como tensão, corrente e frequência de saída.

A chave seletora frontal permite alternar entre os modos de partida de forma prática, possibilitando a análise comparativa de desempenho entre as configurações estrela e triângulo.

Figura 15 – Módulo DLB11129 – Partida Estrela/Triângulo e CFW500.



Fonte: Autoria própria.

3.3.8 MÓDULO DLB11149 - MOTOR TRIFÁSICO

O módulo DLB11149 é composto por um motor trifásico de indução, utilizado para estudos de acionamento e análise de desempenho em diferentes condições de partida e operação. Este motor pode ser configurado para partidas nos modos estrela ou triângulo, possibilitando a comparação de seu comportamento elétrico e mecânico em cada caso.

O motor está fixado em uma base metálica que garante estabilidade durante os ensaios e possui acesso facilitado para conexões elétricas e medições. Sua carcaça é fabricada em material robusto, adequada para suportar vibrações e esforços mecânicos típicos de aplicações industriais.

As especificações elétricas e mecânicas do motor estão indicadas na placa de identificação fixada à carcaça, que fornece dados essenciais como potência nominal, corrente, tensão, frequência e fator de serviço.



Fonte: Autoria própria.

3.3.9 CLP E SUPERVISÃO

A bancada DLB GENT-155-BR foi projetada para possibilitar a integração com Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), permitindo a implementação de estratégias reais de automação e controle. Para isso, o sistema disponibiliza entradas e saídas digitais e analógicas acessíveis em terminais específicos, possibilitando o mapeamento de sinais para dispositivos externos.

Essa característica permite que sejam desenvolvidas lógicas de controle personalizadas, empregando linguagens padronizadas como Ladder (LD), Blocos de Função (FBD) ou Texto Estruturado (ST), de acordo com as normas IEC 61131-3. Dessa forma, é possível projetar funções de controle para supervisão de variáveis elétricas, acionamento de cargas, gerenciamento do banco de baterias e controle da velocidade do aerogerador.

A comunicação entre a bancada e o CLP é feita por meio do protocolo Modbus, nas modalidades RTU e TCP/IP, amplamente utilizado em sistemas industriais e em plataformas SCADA. A mesma Interface Homem-Máquina (IHM)

descrita na seção anterior pode ser utilizada em conjunto com o CLP, centralizando a operação, a visualização de dados e os comandos do sistema.

A integração com sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) amplia as funcionalidades da bancada, possibilitando a supervisão remota, registro histórico de dados, análise de desempenho e implementação de estratégias avançadas de controle. Softwares como Ignition, Elipse, LabVIEW ou outros compatíveis com Modbus podem ser utilizados para esse fim.

Para facilitar a utilização com CLPs e sistemas supervisórios, a planta disponibiliza uma tabela de parametrização Modbus, que define os endereços dos registradores disponíveis para leitura e escrita de variáveis. Essa tabela é essencial para o mapeamento correto dos sinais e deve ser consultada na etapa de programação do CLP.

Tabela 1 – Endereços Modbus da bancada DLB GENT-155-BR para integração com CLPs e sistemas supervisórios.

Parametrização de Comunicação Modbus - 485 - DLB GENT 155 BR				
Módulo	Baud Rate	Config	Tipo de leitura	Endereço
02046 - IHM (1)	38400	8 - N - 1	Short	MESTRE
02046 - IHM (2)	38400	8 - N - 1	Short	MESTRE
02046 - IHM (3)	38400	8 - N - 1	Short	MESTRE
08029 - SL - MPPT (1)	38400	8 - N - 1	Short	1
08029 - WD - MPPT (2)	38400	8 - N - 1	Short	1
08029 - HD - MPPT (3)	38400	8 - N - 1	Short	1
10198 -MM (1)	38400	8 - N - 1	Short	2
10198 -MM (2)	38400	8 - N - 1	Short	2
10198 -MM (3)	38400	8 - N - 1	Short	2
11129 - Inversor	38400	8 - N - 1	Short	3
11105 - Sincronismo	38400	8 - N - 1	Short	5
08034 - Anemômetro - Inversor	38400	8 - N - 1	Short	4
08034 - Anemômetro - CLP	38400	8 - N - 1	Short	6
SPH-33 - Pelton - Controle	38400	8 - N - 1	Short	7
SPH-33 - Pelton - RPM	38400	8 - N - 1	Short	8

Fonte: DE LORENZO DO BRASIL LTDA (2023).

Essa flexibilidade torna a bancada uma ferramenta completa para o ensino e a pesquisa em automação e controle, permitindo que o aluno projete desde lógicas

básicas em Ladder até estratégias avançadas com supervisão em tempo real, integrando conceitos de controle, comunicação industrial e Internet das Coisas (IoT).

3.4 ARQUITETURA DE CONTROLE E FLUXO DE ENERGIA

3.4.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA

A bancada DLB GENT-155-BR integra todos os componentes necessários para simular uma instalação de microgeração eólica, contemplando geração, conversão, armazenamento, distribuição de energia e supervisão. A energia mecânica gerada pelo aerogerador trifásico é convertida em energia elétrica alternada, retificada para corrente contínua (CC) e, em seguida, regulada pelo controlador de carga. Essa energia pode ser armazenada no banco de baterias ou utilizada diretamente para alimentação de cargas em corrente alternada (CA) por meio dos inversores.

A supervisão e o controle do sistema são realizados por meio da Interface Homem-Máquina (IHM) integrada, que apresenta todas as variáveis do sistema em tempo real e possibilita ajustes operacionais. Além disso, a bancada pode ser conectada a um CLP externo, permitindo a implementação de lógicas personalizadas de controle e a integração com sistemas supervisórios via protocolo Modbus.

3.4.2 FLUXO DE ENERGIA

O fluxo de energia segue a seguinte sequência principal:

- **Geração:** O aerogerador trifásico converte energia mecânica do vento em energia elétrica alternada.
- **Retificação:** O retificador converte a energia alternada trifásica em corrente contínua (CC).

- Regulação e Armazenamento: O controlador de carga (DLB 08029) regula a tensão e direciona a energia para o banco de baterias.

- Distribuição:

- ❖ Em modo off-grid, o inversor stand-alone converte a energia de corrente contínua (CC) das baterias em corrente alternada (CA) para alimentar cargas locais.
- ❖ Em modo on-grid, o inversor grid-tie injeta energia na rede elétrica, sincronizada em tensão, frequência e fase com a rede pública.

3.4.3 ARQUITETURAS DE CONTROLE

O controle e supervisão do sistema são realizados principalmente pela IHM, que exibe parâmetros como tensão, corrente, potência e estado dos módulos. A interface também permite o ajuste de variáveis de operação, como a velocidade simulada do aerogerador.

A bancada disponibiliza terminais para integração com CLPs externos, permitindo que estratégias de controle em linguagens industriais, como Ladder, FBD e ST, sejam implementadas. A comunicação entre os dispositivos é feita via protocolo Modbus RTU ou TCP/IP, possibilitando ainda a integração com sistemas SCADA para supervisão remota, registro de dados e análise de desempenho.

3.4.4 MODOS DE OPERAÇÃO

- Modo Off-Grid:
 - ❖ A energia gerada é direcionada ao banco de baterias, de onde é convertida em corrente alternada (CA) pelo inversor stand-alone para alimentar cargas locais.

- Modo On-Grid:
 - ❖ A energia excedente pode ser injetada na rede elétrica pelo inversor grid-tie, que realiza o sincronismo de fase, tensão e frequência com a rede da concessionária.

Essa flexibilidade permite que a bancada seja utilizada em diferentes cenários, possibilitando experimentos práticos com sistemas de geração, armazenamento e controle, tanto isolados quanto conectados à rede elétrica.

3.5 POSSIBILIDADES DIDÁTICAS E EXPERIMENTAÇÕES

3.5.1 APLICAÇÕES NO ENSINO

A bancada DLB GENT-155-BR é uma ferramenta didática projetada para proporcionar ao aluno experiências práticas relacionadas à geração, conversão, armazenamento e utilização de energia elétrica em sistemas de microgeração eólica. Seu uso é especialmente relevante em cursos de Engenharia de Controle e Automação, Engenharia Elétrica e áreas correlatas, possibilitando a aplicação prática de conceitos estudados em disciplinas como Eletrônica de Potência, Sistemas de Controle, Energias Renováveis e Automação Industrial.

Por meio da interface integrada, os estudantes podem acompanhar em tempo real as variáveis elétricas do sistema, compreender o funcionamento de inversores, retificadores e controladores de carga, além de desenvolver noções de comunicação industrial, integração com CLPs e sistemas supervisórios.

3.5.2 TIPOS DE EXPERIMENTOS POSSÍVEIS

A bancada possibilita a realização de diversos experimentos práticos, entre os quais destacam-se:

- Simulação de geração eólica em diferentes condições de vento, ajustando a velocidade do aerogerador e observando a resposta do sistema quanto a tensão, corrente e potência geradas.

- Comparação entre os modos de operação on-grid e off-grid, permitindo analisar o comportamento do fluxo de energia quando conectado à rede elétrica ou operando de forma isolada com o banco de baterias.
- Monitoramento e análise de dados via IHM, acompanhando gráficos e medições em tempo real.
- Integração com CLPs e sistemas supervisórios (SCADA), possibilitando a implementação de lógicas de controle em Ladder, FBD ou ST e a supervisão remota por meio de protocolos Modbus.
- Estudo de eficiência e resposta dinâmica do sistema, aplicando diferentes cargas e avaliando o comportamento energético.

Esses experimentos permitem relacionar os conceitos teóricos estudados em sala de aula com situações práticas de controle, automação e conversão de energia.

3.5.3 BENEFÍCIOS DIDÁTICOS

O uso da bancada DLB GENT-155-BR proporciona uma abordagem prática e integrada, permitindo ao estudante:

- Compreender na prática o funcionamento de sistemas de microgeração de energia, desde a geração até a utilização e injeção na rede elétrica.
- Desenvolver competências em automação industrial, por meio da implementação de estratégias de controle e integração com CLPs.
- Analisar dados reais e tomar decisões baseadas em resultados, fortalecendo a compreensão de conceitos como eficiência, perdas, fluxo de potência e estabilidade do sistema.

- Estimular a pesquisa aplicada, possibilitando a realização de trabalhos de conclusão de curso (TCCs) e projetos de iniciação científica.

Por reunir conceitos de controle, automação, eletrônica de potência e energias renováveis, a bancada representa uma ferramenta completa para a formação de engenheiros com perfil prático e voltado à aplicação de soluções tecnológicas em geração distribuída.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bancada DLB GENT-155-BR apresenta-se como uma ferramenta completa para o estudo prático de sistemas de microgeração de energia eólica, possibilitando a compreensão integrada de geração, conversão, armazenamento, distribuição e controle de energia elétrica. Sua arquitetura modular permite simular diferentes cenários, tanto em operação off-grid, com armazenamento em banco de baterias, quanto em operação on-grid, com injeção de energia na rede elétrica.

A presença de uma Interface Homem-Máquina (IHM) moderna, associada à possibilidade de integração com Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e sistemas SCADA, amplia o potencial didático e experimental, permitindo a aplicação de conceitos de automação, controle, comunicação industrial e supervisão em tempo real.

Além disso, a flexibilidade da bancada favorece a realização de diversos experimentos voltados para o estudo da eficiência energética, análise de variáveis elétricas, desenvolvimento de estratégias de controle e integração entre diferentes tecnologias de conversão de energia.

Por reunir características práticas e conceitos avançados de engenharia, a DLB GENT-155-BR representa uma plataforma essencial para o ensino, pesquisa e desenvolvimento de projetos aplicados, possibilitando ao estudante vivenciar situações reais de operação de sistemas de geração distribuída em ambiente acadêmico seguro e controlado.

4. CAPÍTULO IV - ANÁLISE EXPERIMENTAL EM CORRENTE CONTÍNUA (CC) COM CARGAS RESISTIVAS

4.1 INTRODUÇÃO

O objetivo dos experimentos realizados com a bancada DLB GENT-155-BR foi analisar o comportamento de um sistema de microgeração eólica operando em diferentes condições de velocidade do aerogerador e de aplicação de cargas resistivas. Por meio desses testes, buscou-se compreender a relação entre geração, armazenamento e consumo de energia, além de observar como a variação da velocidade do aerogerador influencia na potência entregue às cargas e no carregamento das baterias.

Os experimentos foram conduzidos utilizando os principais módulos da bancada: aerogerador simulado, banco de baterias estacionárias Freedom DF300 (DLB 08033), controlador de carga DLB 08029 e anemômetro/controle de aerogerador DLB 08034, com medições feitas diretamente pela Interface Homem-Máquina (IHM).

Os resultados obtidos servem como base para avaliar o desempenho do sistema em diferentes condições de operação, fortalecendo a compreensão prática dos conceitos de geração distribuída, conversão de energia e integração com sistemas de controle e automação.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados em modo off-grid, utilizando o aerogerador simulado como fonte primária de energia. A velocidade do aerogerador foi ajustada diretamente pela IHM, por meio do módulo Anemômetro e Controle de Aerogerador (DLB 08034), em quatro níveis de operação: 100%, 75%, 50% e 25% da velocidade máxima.

Em cada nível de velocidade, o sistema foi submetido a três condições distintas de carga no barramento em corrente contínua (CC):

- Duas cargas resistivas de 50 W / 12 V conectadas em paralelo;

- Apenas uma carga resistiva de 50 W / 12 V;
- Sistema em vazio, sem carga conectada.

Durante cada cenário de teste, as medições de tensão, corrente e potência do gerador, banco de baterias e cargas foram registradas pela IHM após a estabilização do sistema.

A coleta sistemática desses dados possibilitou a posterior análise do desempenho da bancada, permitindo comparar a influência da velocidade do aerogerador e da aplicação das cargas resistivas no fluxo de energia e no carregamento das baterias.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos para cada condição de carga são apresentados a seguir, de acordo com o procedimento descrito no item 4.2.

Para cada cenário são exibidos:

- Uma imagem mostrando o fluxo de energia do sistema;
- Uma imagem do gráfico MPPT;
- Uma imagem com os valores instantâneos medidos pela IHM;
- Uma tabela consolidada com os resultados obtidos;
- Um gráfico comparativo com base nos dados da tabela.

4.3.1 CENÁRIO 1 - DUAS CARGAS DE 50W/12V

Neste cenário, foram conectadas duas cargas resistivas de 50 W / 12 V em paralelo, totalizando aproximadamente 100 W.

Figura 18 – Tela da IHM com ilustração do fluxo de energia do sistema para o Cenário 1, operando com o aerogerador em 100% da velocidade.



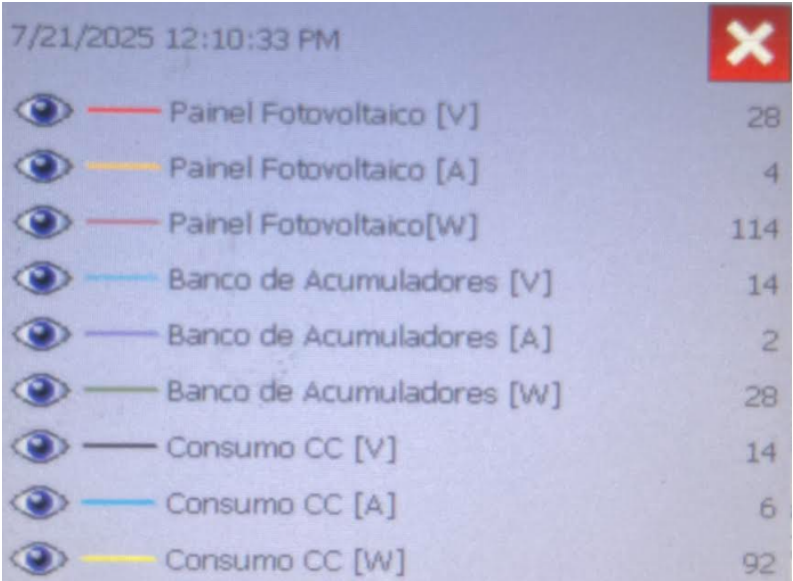
Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Gráfico MPPT exibido na IHM para o Cenário 1, representando a variação de tensão, corrente e potência ao longo do tempo (1 minuto), com o aerogerador em 100% da velocidade.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Tela da IHM com os valores instantâneos de tensão, corrente e potência do painel (aerogerador), banco de baterias e consumo de corrente contínua (CC) para o Cenário 1, operando a 100% da velocidade.



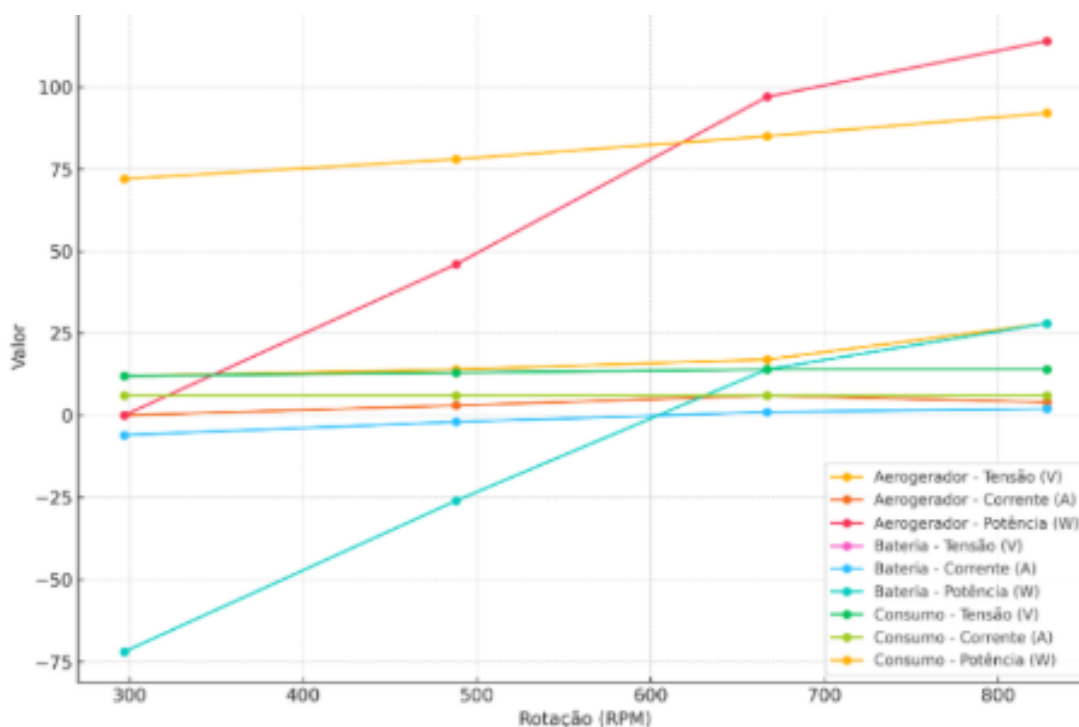
Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Resultados obtidos com duas cargas resistivas de 50 W / 12 V conectadas em paralelo.

Velocidade (%)	Rotação (RPM)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Banco de Acumuladores (V)	Banco de Acumuladores (A)	Banco de Acumuladores (W)	Consumo de corrente contínua (CC) (V)	Consumo de corrente contínua (CC) (A)	Consumo de corrente contínua (CC) (W)
100%	828	28	4	114	14	2	28	14	6	92
75%	667	17	6	97	14	1	14	14	6	85
50%	488	14	3	46	13	-2	-26	13	6	78
25%	297	12	0	0	12	-6	-72	12	6	72

Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Gráfico comparativo das grandezas elétricas em função da rotação do aerogerador (Cenário 1).



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 CENÁRIO 2 - UMA CARGA DE 50W/12V

Neste cenário, foi conectada apenas uma carga resistiva de 50 W / 12 V, reduzindo pela metade a potência aplicada no cenário anterior.

Figura 22 – Tela da IHM com ilustração do fluxo de energia do sistema para o Cenário 2, operando com o aerogerador em 100% da velocidade.



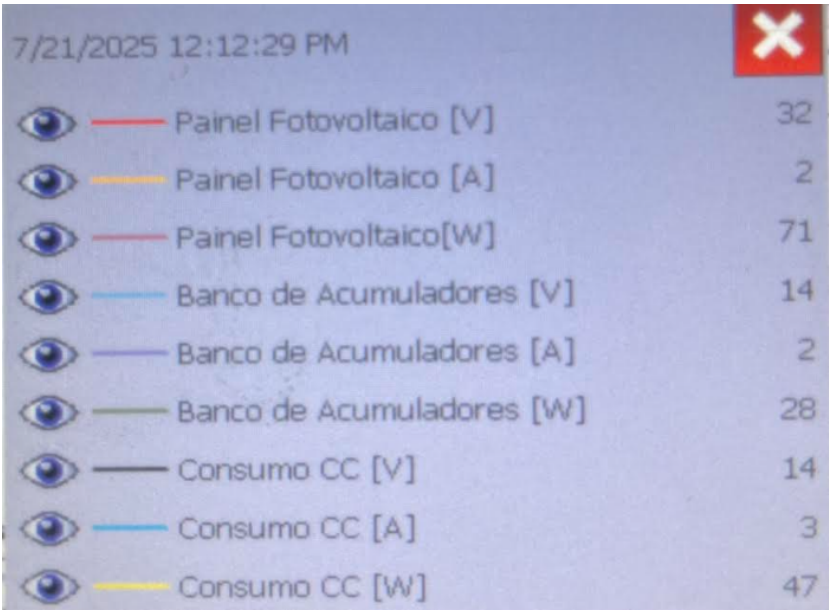
Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Gráfico MPPT exibido na IHM para o Cenário 2, representando a variação de tensão, corrente e potência ao longo do tempo (1 minuto), com o aerogerador em 100% da velocidade.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Tela da IHM com os valores instantâneos de tensão, corrente e potência do painel (aerogerador), banco de baterias e consumo de corrente contínua (CC) para o Cenário 2, operando a 100% da velocidade.



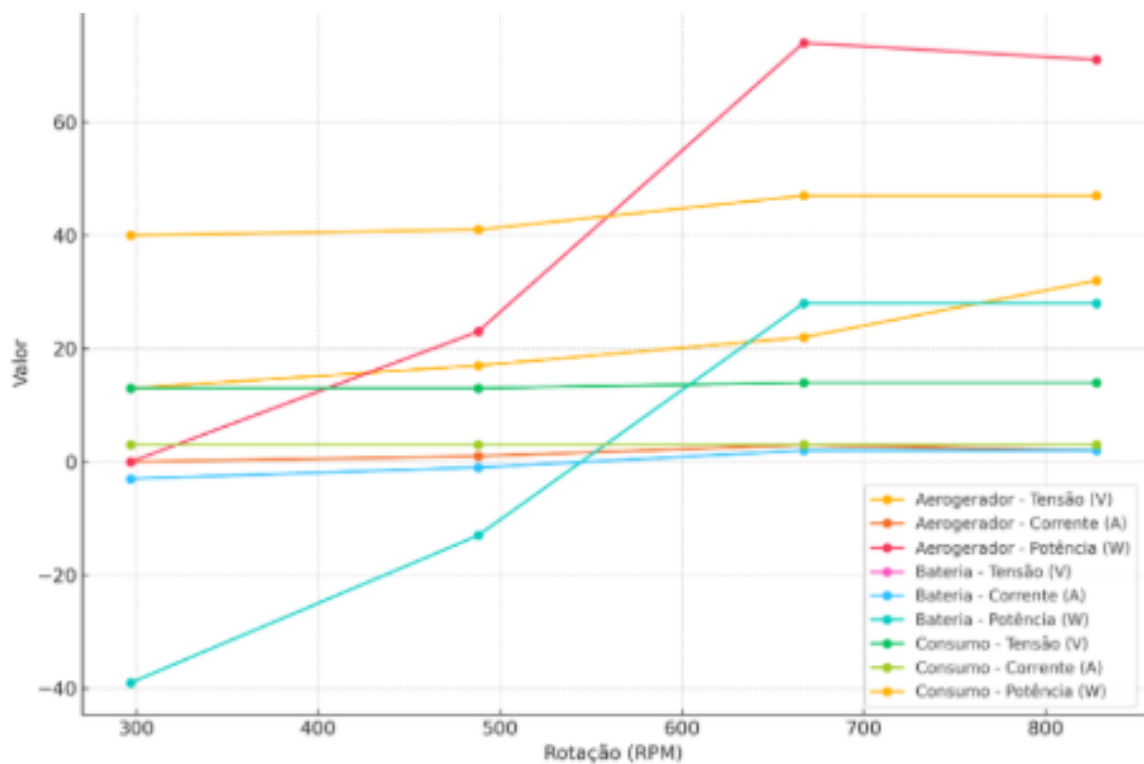
Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Resultados obtidos com uma carga resistiva de 50 W / 12 V.

Velocidade (%)	Rotação (RPM)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Banco de Acumuladores (V)	Banco de Acumuladores (A)	Banco de Acumuladores (W)	Consumo de corrente contínua (CC) (V)	Consumo de corrente contínua (CC) (A)	Consumo de corrente contínua (CC) (W)
100%	828	32	2	71	14	2	28	14	3	47
75%	667	22	3	74	14	2	28	14	3	47
50%	488	17	1	23	13	-1	-13	13	3	41
25%	297	13	0	0	13	-3	-39	13	3	40

Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Gráfico comparativo das grandezas elétricas em função da rotação do aerogerador (Cenário 2).



Fonte: Autoria própria.

4.3.3 CENÁRIO 3 - SISTEMA EM VAZIO

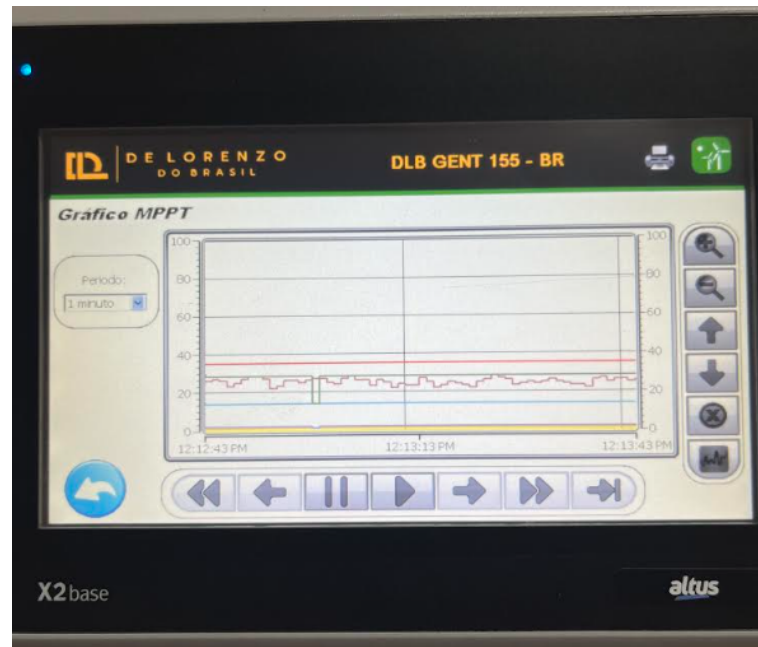
Neste cenário, nenhuma carga foi conectada ao barramento de corrente contínua (CC), permitindo avaliar o comportamento do sistema quando a energia gerada é direcionada apenas ao banco de baterias.

Figura 26 – Tela da IHM com ilustração do fluxo de energia do sistema para o Cenário 3, operando com o aerogerador em 100% da velocidade.



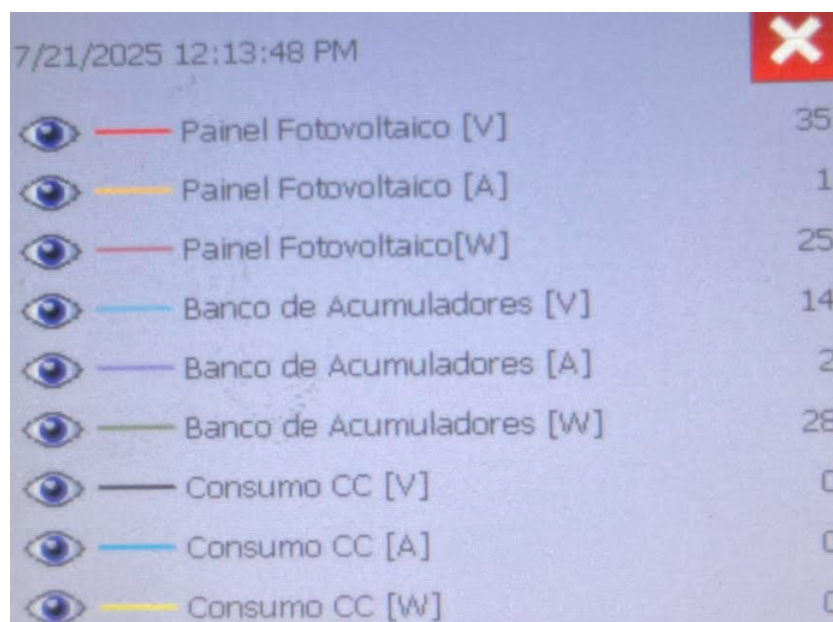
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Gráfico MPPT exibido na IHM para o Cenário 3, representando a variação de tensão, corrente e potência ao longo do tempo (1 minuto), com o aerogerador em 100% da velocidade.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Tela da IHM com os valores instantâneos de tensão, corrente e potência do painel (aerogerador), banco de baterias e consumo de corrente contínua (CC) para o Cenário 3, operando a 100% da velocidade.



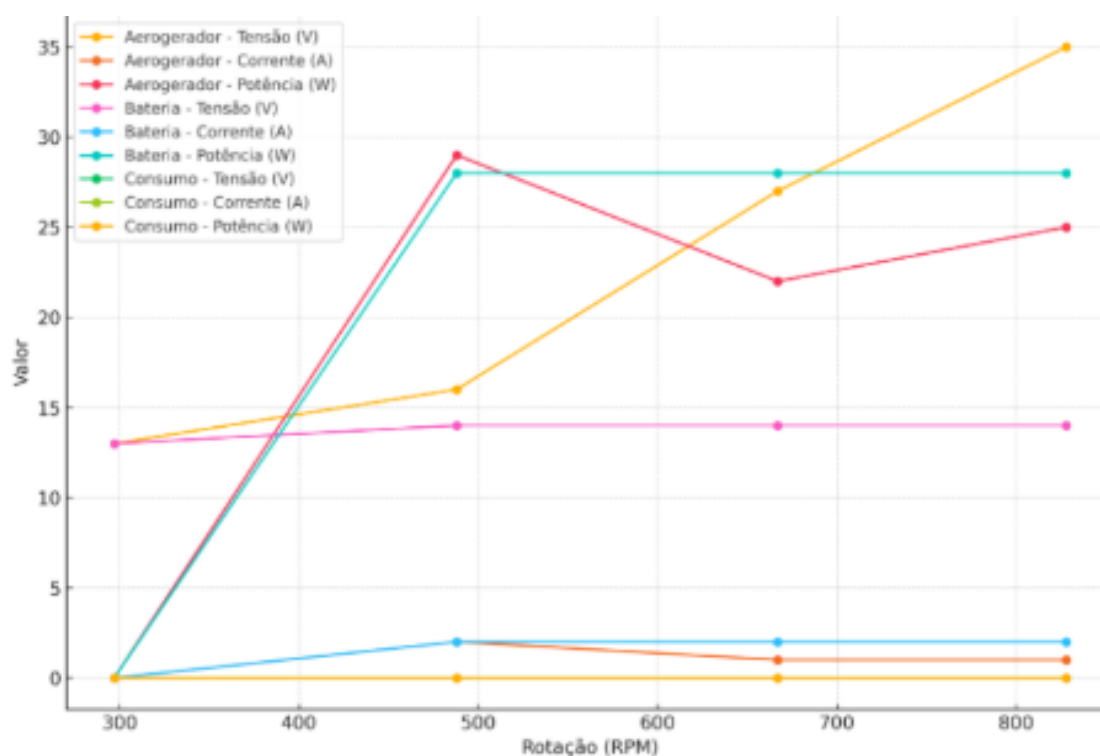
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Resultados obtidos com o sistema em vazio.

Velocidade (%)	Rotação (RPM)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Banco de Acumuladores (V)	Banco de Acumuladores (A)	Banco de Acumuladores (W)	Consumo de corrente contínua (CC) (V)	Consumo de corrente contínua (CC) (A)	Consumo de corrente contínua (CC) (W)
100%	828	35	1	25	14	2	28	0	0	0
75%	667	27	1	22	14	2	28	0	0	0
50%	488	16	2	29	14	2	28	0	0	0
25%	297	13	0	0	13	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – Gráfico comparativo das grandezas elétricas em função da rotação do aerogerador (Cenário 3).

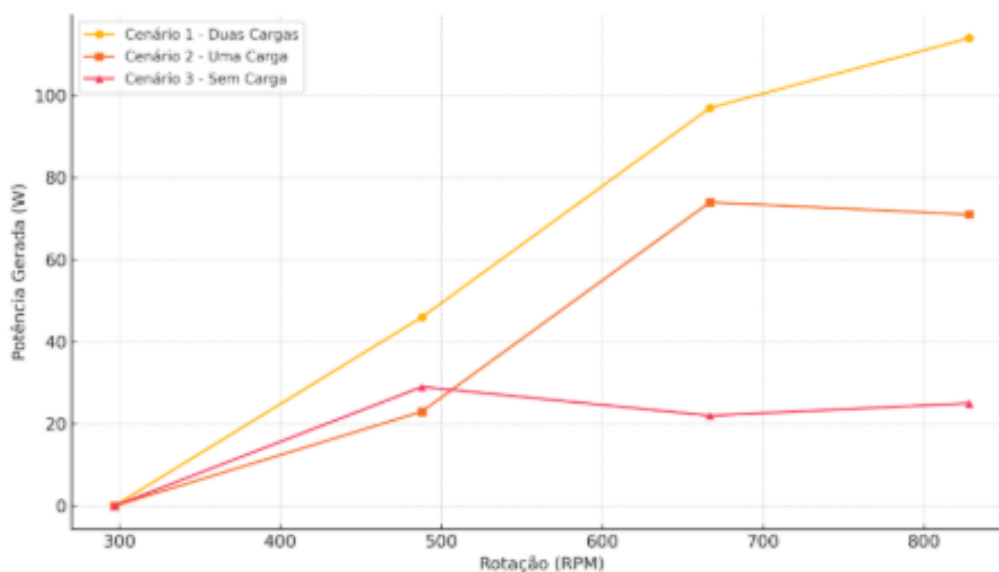


Fonte: Autoria própria.

4.3.4 COMPARAÇÃO GERAL

Após a análise individual, os resultados foram consolidados em um único gráfico para comparação direta da potência gerada em cada cenário.

Figura 30 – Comparação da potência gerada em função da rotação do aerogerador para os três cenários.



Fonte: Autoria própria.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos dados obtidos nos ensaios experimentais permite compreender o comportamento do sistema de geração eólica em diferentes condições de carga e velocidade do aerogerador. Os três cenários analisados — com duas cargas, uma carga e em vazio — evidenciam o impacto direto da carga conectada no aproveitamento da energia gerada e no armazenamento pelo banco de baterias.

1. Cenário 1 – Duas Cargas de 50 W / 12 V

Neste cenário, a carga total se aproxima de 100 W, exigindo maior entrega de potência por parte do sistema. Observa-se que:

- Em 100% da velocidade (828 RPM), o aerogerador fornece 114 W, suprimindo adequadamente as cargas (92 W) e ainda contribuindo para o carregamento do banco de baterias (28 W).

- À medida que a velocidade diminui, a capacidade de geração também reduz, e o sistema passa a depender do banco de baterias, que apresenta valores negativos de potência (indicando descarga), principalmente em 50% e 25% da rotação.

- A corrente de consumo das cargas se manteve constante (6 A), exigindo da fonte de alimentação um fornecimento mais intenso mesmo com menor geração.

2. Cenário 2 – Uma Carga de 50 W / 12 V

Com metade da carga total, os dados mostram um equilíbrio mais sustentável entre geração e demanda:

- Mesmo em velocidades mais baixas (75% e 50%), o aerogerador ainda consegue gerar energia suficiente para alimentar a carga e carregar as baterias (potência no banco positiva).

- Apenas em 25% da rotação, o banco de baterias entra em regime de descarga, mas com valores moderados, o que evidencia um cenário mais eficiente para operação prolongada.

3. Cenário 3 – Sistema em Vazio

Na ausência de cargas conectadas ao barramento de corrente contínua (CC), toda a energia gerada é direcionada ao banco de baterias:

- Os valores de potência consumida pelas cargas foram zero em todos os testes, e a energia gerada foi totalmente destinada ao carregamento das baterias.
- A eficiência do sistema em recarregar as baterias foi maior nas rotações de 75% a 100%, com potência entregue ao banco constante em 28 W, indicando que o controlador de carga manteve o fluxo em regime controlado.
- A partir de 50% da rotação, a geração ainda permitiu armazenamento, porém com menor potência disponível.

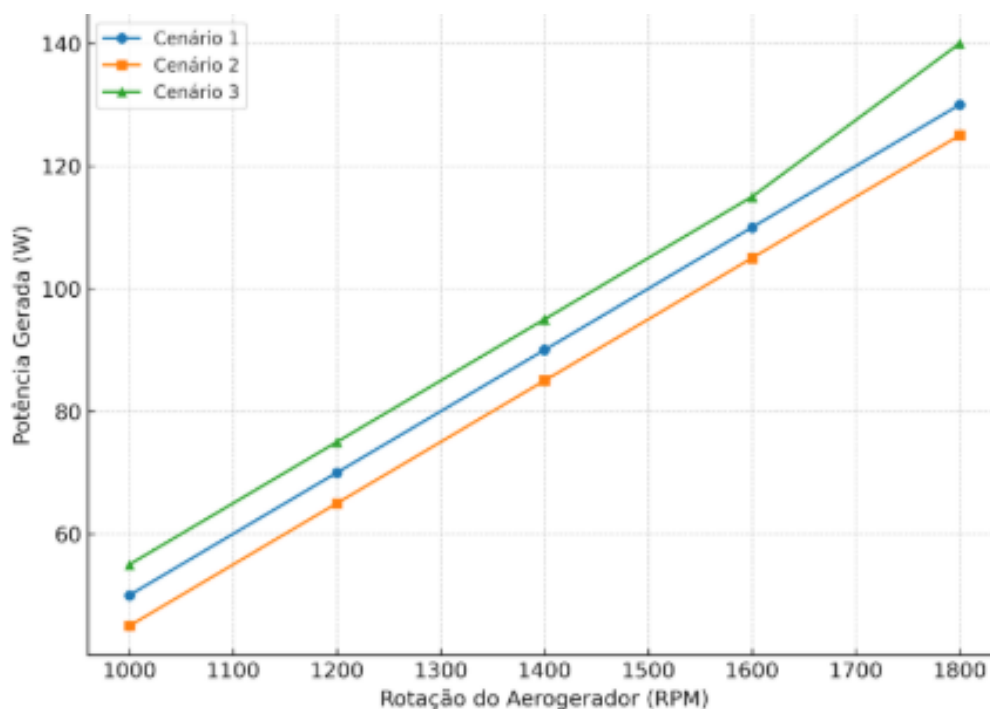
4. Comparação Geral

A análise comparativa entre os três cenários revela que:

- A potência gerada pelo aerogerador está diretamente relacionada à rotação, que por sua vez depende da velocidade simulada na IHM.
- Em condições de alta carga e baixa rotação, o sistema não consegue suprir a demanda, sendo necessário o suporte do banco de baterias.
- Em cenários com menor carga ou sem carga, o sistema opera de forma mais estável e com maior aproveitamento da energia gerada para armazenamento.

O gráfico, apresentado na Figura 31, ilustra de forma clara a relação entre a potência gerada e a rotação do aerogerador nos diferentes cenários, evidenciando o impacto das condições de operação sobre o desempenho do sistema.

Figura 31 – Comparação da potência gerada em função da rotação do aerogerador para os três cenários.



Fonte: Autoria própria.

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS

A realização dos experimentos com a bancada DLB GENT-155-BR permitiu a observação prática do comportamento de um sistema de geração eólica aplicado ao carregamento de baterias e alimentação de cargas em corrente contínua (CC). Através dos três cenários propostos, foi possível verificar o desempenho do aerogerador em diferentes condições de carga e rotação, bem como a atuação do banco de baterias no equilíbrio energético do sistema.

Durante os testes, a utilização da Interface Homem-Máquina (IHM) foi fundamental para o controle preciso da velocidade do aerogerador e para a coleta dos dados de tensão, corrente e potência de cada componente do sistema. Os resultados demonstraram, de forma clara, a importância de se adequar a velocidade

do aerogerador à demanda energética, evitando sobrecargas no banco de baterias ou subutilização da energia gerada.

Além disso, os experimentos evidenciaram a relevância da atuação do controlador de carga (DLB 08029) na gestão do fluxo de energia, protegendo as baterias contra sobrecarga ou descarga profunda, e mantendo o funcionamento estável do sistema mesmo em condições adversas de geração ou consumo.

Os gráficos e tabelas elaborados a partir dos dados registrados também permitiram uma análise comparativa entre os diferentes cenários, oferecendo uma visão mais abrangente sobre a dinâmica do sistema. Essa abordagem experimental reforça a importância de testes práticos em ambientes controlados para validar conceitos teóricos e preparar o estudante para desafios reais na área de energias renováveis.

Por fim, destaca-se que os experimentos realizados contribuíram significativamente para o entendimento dos princípios de conversão de energia eólica em elétrica, do papel dos conversores e dispositivos de armazenamento, além de ressaltar a viabilidade da geração distribuída com fontes renováveis em sistemas autônomos (off-grid).

5. CAPÍTULO V - CONVERSÃO CC-CA E PARTIDA ESTRELA/TRIÂNGULO DE MOTOR TRIFÁSICO

5.1 INTRODUÇÃO

A conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) é um processo fundamental para o aproveitamento da energia elétrica em aplicações que demandam equipamentos alimentados por tensão alternada, como motores trifásicos. No contexto deste trabalho, a energia proveniente do sistema de geração e armazenada no banco de acumuladores em corrente contínua (CC) é convertida para corrente alternada (CA) por meio de um conversor CC-CA, possibilitando o acionamento de um motor trifásico.

Para a partida do motor, foi utilizada a configuração estrela/triângulo, amplamente empregada na indústria para reduzir a corrente de partida e o esforço mecânico nos componentes do sistema. Na ligação em estrela, a tensão aplicada a cada enrolamento do motor é reduzida, resultando em menor corrente de partida; já na ligação em triângulo, o motor opera em sua tensão nominal, atingindo sua plena capacidade de torque e potência.

O estudo da partida estrela/triângulo neste experimento tem como objetivo observar o comportamento elétrico e mecânico do motor nas duas condições, identificando diferenças nos valores de corrente, tempo de aceleração e estabilidade de operação. Dessa forma, será possível avaliar a eficiência da conversão CC-CA no acionamento de cargas alternadas e compreender a influência da estratégia de partida sobre o desempenho global do sistema.

5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes desta etapa foram realizados utilizando novos módulos da bancada DLB, que não haviam sido aplicados nas análises anteriores, sendo eles:

- DLB08030 – Conversor CC/CA 12 V off-grid;

- DLB11149 – Motor trifásico;
- DLB11129 – Conjunto contendo inversor de frequência CFW500 e chave de comutação para partida Desligado–Estrela–Triângulo.

O objetivo dos ensaios foi avaliar o comportamento do sistema na conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), alimentando o motor trifásico em duas configurações distintas de partida: estrela e triângulo.

A alimentação do conversor CC/CA (DLB08030) foi proveniente tanto do banco de baterias quanto do aerogerador, operando de forma conjunta para suprir a demanda de potência do motor. O banco de baterias foi previamente carregado pelo sistema de geração eólica, enquanto o aerogerador forneceu energia em tempo real durante os testes.

A saída do conversor, em corrente alternada (CA) trifásica, foi conectada ao módulo DLB11129, que contém o inversor de frequência CFW500 e a chave de seleção de partida.

Antes de iniciar as medições, o CFW500 foi parametrizado de acordo com as características nominais do motor trifásico DLB11149, incluindo ajustes de tensão, frequência, corrente nominal, rampas de aceleração e desaceleração, e demais parâmetros de controle. Essas configurações são apresentadas na Tabela 5 e foram mantidas constantes para todos os testes, garantindo a comparabilidade entre as medições realizadas nas partidas em estrela e em triângulo.

Tabela 5 – Parâmetros configurados no CFW500 para o motor DLB11149.

Parametrização CFW-500 (11129)		
Parâmetro	Descrição	Digito
P204	Carrega / Salva Parâmetros	5 = 60Hz Config.
P100	Tempo de Aceleração	5s
P101	Tempo de Desaceleração	5s
P133	Velocidade Mínima	0Hz
P134	Velocidade Máxima	60Hz
P220	Seleção fonte LOC/REM	6 = Serial / USB
P222	Seleção Referência REM	9 = Serial / USB
P226	Seleção de giro REM	5 = Serial / USB
P227	Seleção Gira/Para Rem	2 = Serial / USB
P228	Seleção JOG REM	3 = Serial USB
P308	Endereço Serial	3
P310	Taxa de transmissão serial	2 = 38,400
P311	Config. Transmissão serial	0 = 8, N, 1
P312	Protocolo serial	2 = MODBUS RTU
P400	Tensão nominal do motor	220V
P401	Corrente nominal do motor	1,03A
P402	Velocidade nominal do motor	1685 RPM
P403	Frequência nominal do motor	60Hz
P404	Potência nominal do motor	1 = 0,25CV
P407	Fator de Pot. Nominal do motor	0,68

Fonte: DE LORENZO DO BRASIL LTDA (2023).

Para cada configuração de partida, o motor foi colocado em funcionamento até atingir regime estável, sendo então registradas, por meio da IHM do sistema, as mesmas grandezas medidas nos testes anteriores:

- Tensão, corrente e potência na entrada do conversor;
- Tensão, corrente e potência na saída do conversor (alimentando o motor).

Todos os registros foram obtidos após a estabilização do sistema, evitando variações transitórias e garantindo maior confiabilidade nas medições.

5.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos a partir das medições realizadas pela Interface Homem-Máquina (IHM) da bancada DLB GENT-155-BR, considerando a operação do sistema com conversão CC–CA e partida do motor trifásico nas configurações estrela e triângulo.

Para cada configuração de partida, o motor foi acionado e mantido em operação por 1 minuto em regime estável, sendo registradas as seguintes grandezas:

- Velocidade (%) do aerogerador
- Rotação (RPM) do aerogerador
- Tensão (V), corrente (A) e potência (W) na entrada do conversor CC–CA
- Tensão (V), corrente (A) e potência (W) do banco de acumuladores
- Tensão (V), corrente (A) e potência (W) no consumo de corrente alternada (CA) (motor trifásico)

Os testes foram conduzidos para quatro velocidades do aerogerador (100%, 75%, 50% e 25%), mantendo-se a mesma metodologia de estabilização adotada nos capítulos anteriores, de forma a evitar distorções causadas por transitórios.

5.3.1 RESULTADOS EM LIGAÇÃO ESTRELA

As medições referentes à configuração estrela estão apresentadas na Tabela 6, obtidas para as quatro velocidades do aerogerador.

Figura 32 – Tela da IHM mostrando o fluxo de energia no modo estrela.



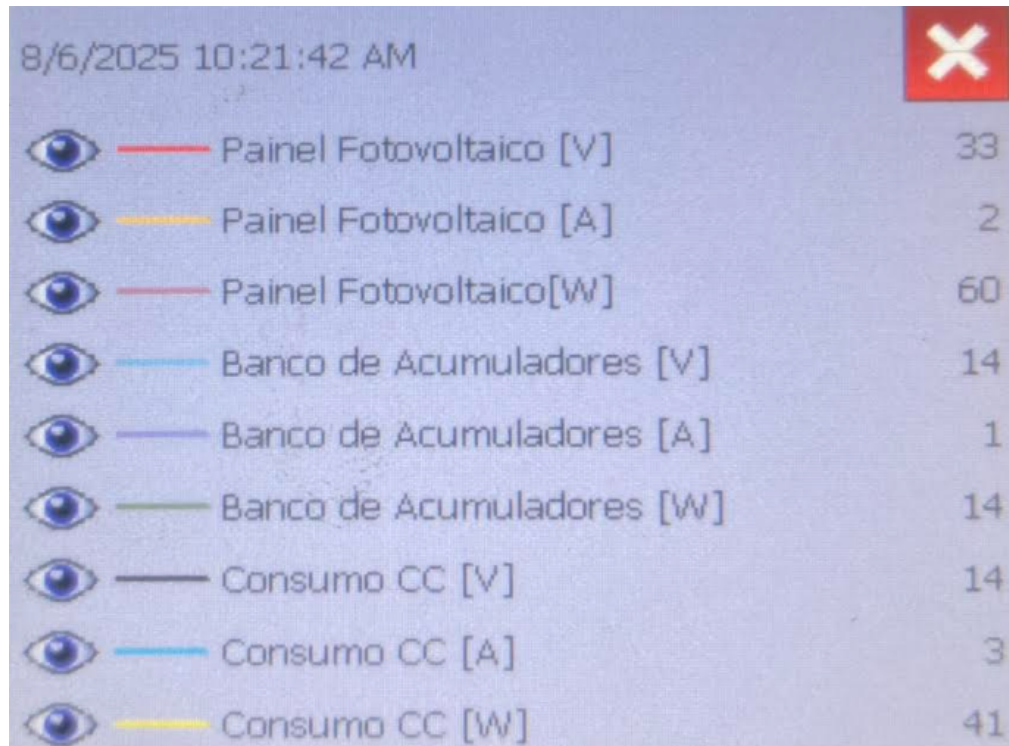
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Tela da IHM mostrando o gráfico MPPT no modo estrela.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Tela da IHM com os valores medidos no modo estrela.



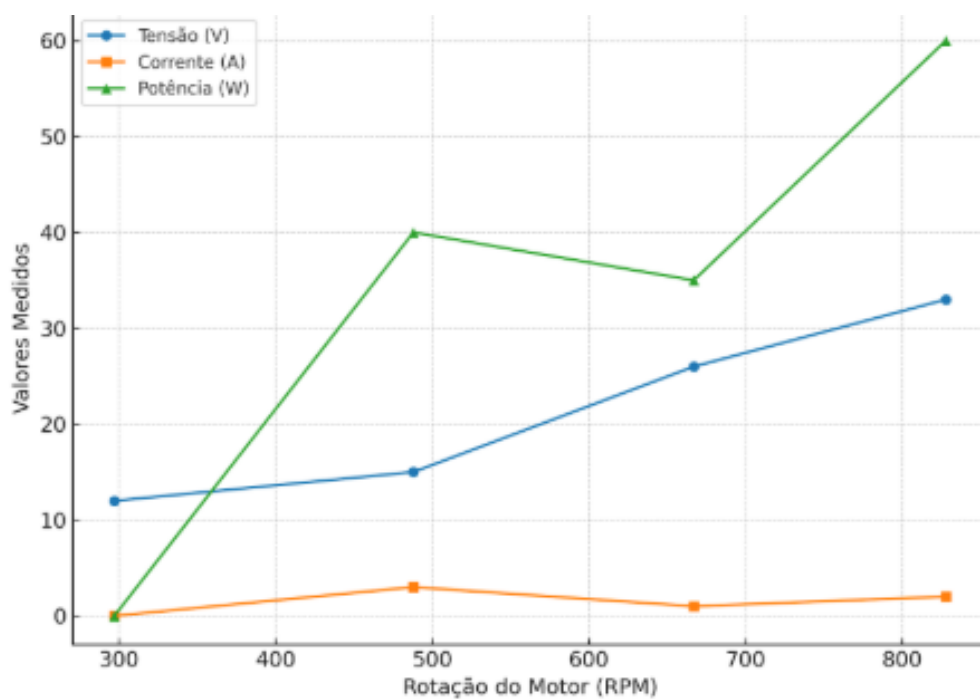
Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Resultados obtidos no modo estrela.

Velocidade (%)	Rotação (RPM)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Banco de Acumuladores (V)	Banco de Acumuladores (A)	Banco de Acumuladores (W)	Consumo de corrente contínua (CC) (V)	Consumo de corrente contínua (CC) (A)	Consumo de corrente contínua (CC) (W)
100%	828	33	2	60	14	1	14	14	3	41
75%	667	26	1	35	13	0	0	13	3	38
50%	488	15	3	40	14	0	0	14	3	38
25%	297	12	0	0	12	-3	-36	12	3	35

Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Variação das grandezas elétricas em função da rotação no modo estrela.

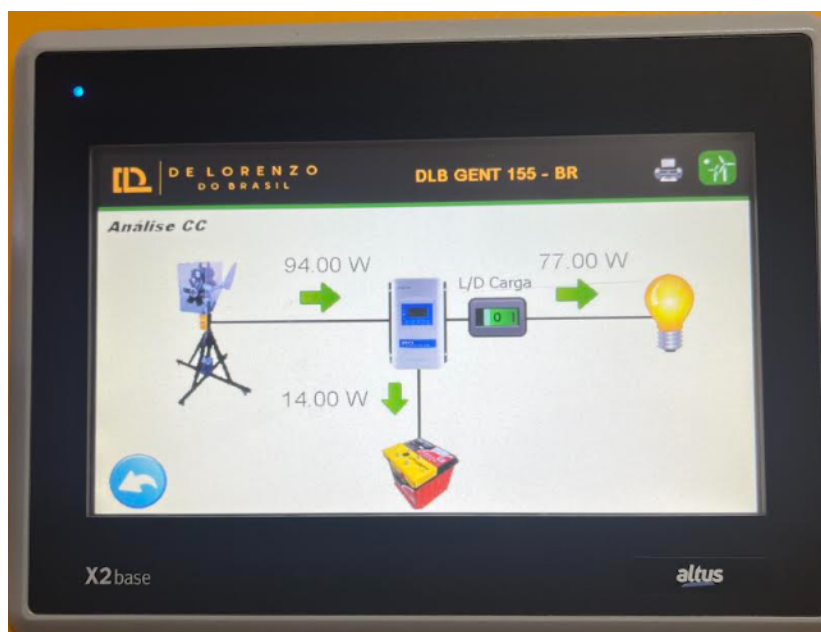


Fonte: Autoria própria.

5.3.2 RESULTADOS EM LIGAÇÃO TRIÂNGULO

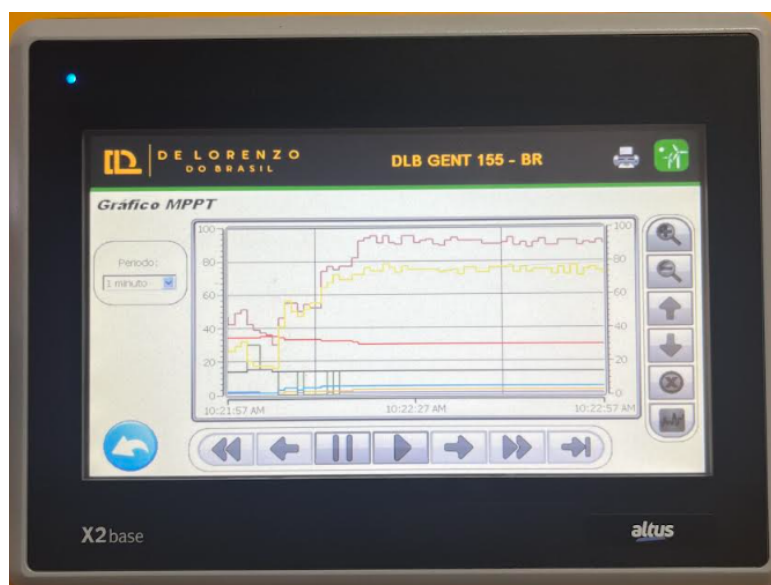
As medições referentes à configuração triângulo estão apresentadas na Tabela 7, obtidas para as quatro velocidades do aerogerador.

Figura 36 – Tela da IHM mostrando o fluxo de energia no modo triângulo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 37 – Tela da IHM mostrando o gráfico MPPT no modo triângulo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38 – Tela da IHM com os valores medidos no modo triângulo.



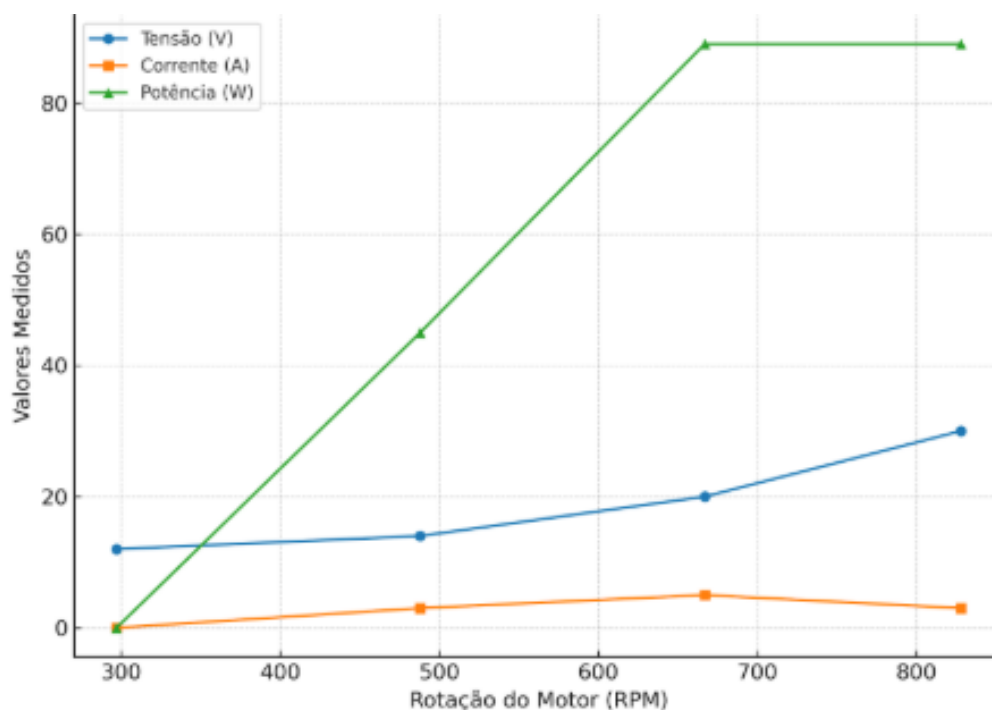
Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Resultados obtidos no modo triângulo.

Velocidade (%)	Rotação (RPM)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Banco de Acumuladores (V)	Banco de Acumuladores (A)	Banco de Acumuladores (W)	Consumo de corrente contínua (CC) (V)	Consumo de corrente contínua (CC) (A)	Consumo de corrente contínua (CC) (W)
100%	828	30	3	89	14	1	14	14	5	76
75%	667	20	5	89	14	1	14	14	5	74
50%	488	14	3	45	13	-1	-13	13	5	63
25%	297	12	0	0	12	-5	-60	12	5	53

Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Variação das grandezas elétricas em função da rotação no modo triângulo

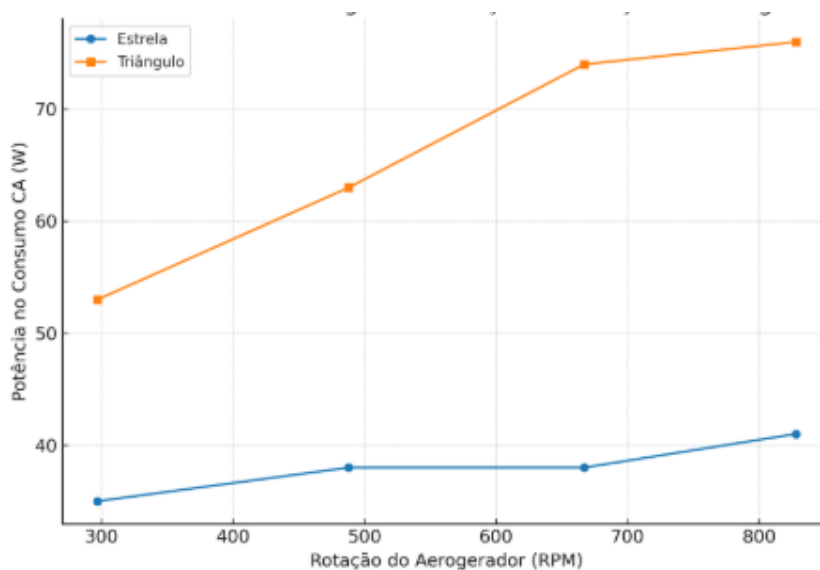


Fonte: Autoria própria.

5.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE MODOS DE PARTIDA

Para facilitar a análise comparativa, a Figura 40 apresenta o gráfico consolidado da potência no consumo CA (motor trifásico) para as configurações estrela e triângulo, considerando todas as velocidades do aerogerador.

Figura 40 – Comparação da potência do consumo de corrente alternada (CA) nos modos estrela e triângulo em função da rotação do aerogerador.



Fonte: Autoria própria.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos dados obtidos permite avaliar o desempenho do sistema nas partidas Estrela e Triângulo, considerando diferentes rotações do aerogerador (100%, 75%, 50% e 25%).

De forma geral, observa-se que a configuração Triângulo apresentou maior potência entregue ao consumo de corrente contínua (CC) nas rotações mais elevadas, em comparação à configuração Estrela. Essa diferença é especialmente notável em 100% de velocidade, onde a potência no consumo de corrente contínua (CC) alcançou 76 W em Triângulo contra 41 W em Estrela, um aumento de aproximadamente 85%.

Além disso, a corrente no consumo de corrente contínua (CC) também foi superior no modo Triângulo para todas as velocidades acima de 25%, o que indica maior capacidade de transferência de energia para a carga. Por outro lado, isso também resultou em correntes mais elevadas na entrada do conversor, o que pode implicar maior esforço para o sistema de geração.

O banco de acumuladores apresentou comportamento distinto dependendo da rotação. Em velocidades mais baixas (25% e 50%), ocorreram valores negativos

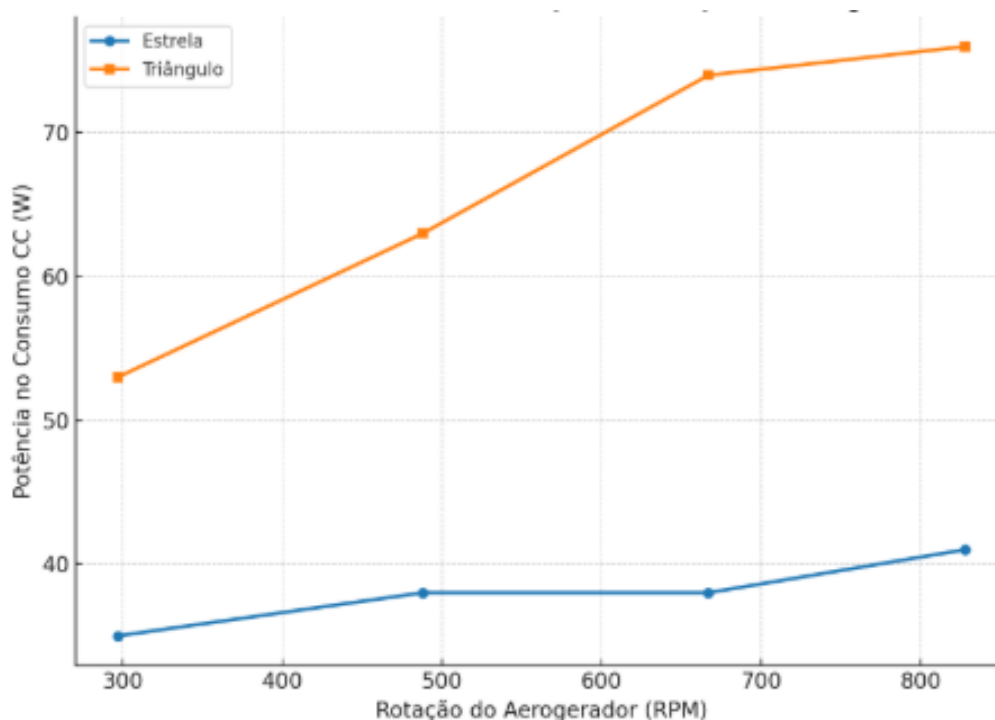
de corrente e potência no banco de acumuladores, caracterizando descarga para suprir a demanda do motor. Em velocidades mais altas (75% e 100%), a corrente no banco foi positiva ou próxima de zero, evidenciando que parte da energia gerada também era destinada ao carregamento.

Na configuração Estrela, a potência no consumo de corrente contínua (CC) foi mais baixa em todas as rotações, mas apresentou maior estabilidade de operação, com menor variação de corrente. Esse comportamento pode ser vantajoso em situações onde se deseja menor estresse elétrico sobre os componentes.

De forma resumida, os resultados indicam que:

- Triângulo é mais eficiente para entrega de potência ao motor em altas rotações, porém com maior corrente e esforço no sistema.
- Estrela fornece menor potência ao consumo de corrente contínua (CC), mas com operação mais estável e menor exigência elétrica.
- Em rotações baixas (25%), ambos os modos apresentam desempenho reduzido, com dependência significativa da energia armazenada no banco de acumuladores.

Figura 41 – Comparação da potência no consumo de corrente contínua (CC) em função da rotação do motor para partidas Estrela e Triângulo.



Fonte: Autoria própria.

5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS

A realização dos testes de conversão CC–CA e partida do motor trifásico nas configurações Estrela e Triângulo possibilitou compreender de forma prática o comportamento do sistema em diferentes condições de operação. Os procedimentos executados demonstraram a importância do correto ajuste da configuração de partida para otimizar a transferência de energia disponível e atender às demandas do motor.

Os resultados confirmaram que, embora o modo Triângulo proporcione maior entrega de potência ao consumo, ele também exige correntes mais elevadas, o que pode aumentar o esforço sobre o sistema de geração e armazenamento. Já o modo Estrela apresentou operação mais estável e com menor exigência elétrica, podendo ser vantajoso em cenários onde a preservação dos componentes e a eficiência global sejam prioritárias.

Durante os experimentos, observou-se que as condições de velocidade do aerogerador têm influência direta sobre o fluxo de energia, e que, em baixas rotações, há maior dependência do banco de acumuladores para manter o funcionamento do motor. Este aspecto reforça a necessidade de um dimensionamento adequado tanto do sistema de geração quanto do armazenamento de energia.

Por fim, ressalta-se que, apesar das limitações inerentes aos ensaios em bancada — como a impossibilidade de simular todas as variações ambientais de um sistema real —, os testes forneceram dados consistentes e representativos, que poderão servir como base para estudos futuros e para o aperfeiçoamento do sistema.

6. CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou uma análise experimental de um sistema de microgeração eólica em bancada didática, investigando seu desempenho em diferentes condições de carga e conversão CC-CA. Os resultados obtidos demonstraram que a variação da rotação do aerogerador e a aplicação de cargas resistivas impactam diretamente a potência entregue, a estabilidade do sistema e o comportamento do banco de baterias.

A contribuição principal deste estudo foi fornecer dados experimentais concretos sobre o desempenho da microgeração eólica em condições controladas, permitindo a comparação entre operação em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) com diferentes configurações de partida (estrela e triângulo). Além disso, os resultados reforçam a importância do gerenciamento adequado de energia e da escolha correta de conversores e estratégias de controle para aplicações off-grid.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho contribui para o ensino prático em Engenharia de Controle e Automação, ao disponibilizar uma abordagem experimental capaz de aproximar teoria e prática em temas como eletrônica de potência, automação industrial e energias renováveis. No âmbito tecnológico, oferece subsídios para o dimensionamento e otimização de sistemas de microgeração, considerando tanto a eficiência energética quanto a confiabilidade em aplicações isoladas.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados alcançados, este estudo pode ser ampliado por meio das seguintes propostas:

- Integração com sistemas fotovoltaicos, formando uma planta híbrida solar-eólica, permitindo a análise da complementaridade das fontes.
- Aplicação de técnicas de controle inteligente, como lógica fuzzy, controle preditivo baseado em modelo (MPC) e sistemas neuro-fuzzy, para otimização dinâmica do fluxo de energia.
- Simulações e testes em redes híbridas, avaliando a viabilidade da integração com sistemas on-grid e off-grid em escala maior.
- Avaliação do ciclo de vida das baterias em aplicações didáticas e reais, considerando desempenho, degradação e alternativas de armazenamento.
- Implementação de monitoramento em nuvem (IoT/SCADA), com coleta de dados em tempo real e análise remota para maior confiabilidade e flexibilidade de operação.

Tais perspectivas poderão ampliar a aplicabilidade do sistema, tornando-o ainda mais próximo das demandas reais de geração distribuída e microgeração renovável.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim anual de geração eólica no Brasil – 2022**. São Paulo: ABEEólica, 2023.

ABOUARKOUB, A. et al. **IoT-SCADA Integration for Renewable Energy Microgrids**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 136, p. 107704, 2021.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Capacidade instalada de geração no Brasil – Relatório Técnico**. Brasília: ANEEL, 2022.

CHEN, L. et al. **Intelligent Load Management for Off-Grid Microgeneration Systems**. Energy Procedia, v. 160, p. 45-52, 2020.

CUPERTINO, A. **Rotor de ímã permanente – Relatório técnico**. Belo Horizonte: UFMG, 2018.

DE LORENZO DO BRASIL LTDA. **DLB GENT-155-BR: Sistema Didático para Estudo e Treinamento em Geração de Energia Alternativa com Geração e Sincronismo Trifásico com Software SCADA – Manual de Exercícios**. São Paulo: De Lorenzo, 2023.

DINIZ NETO, O. **Histórico da energia eólica no Brasil e no mundo**. Revista Brasileira de Energia Renovável, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 45-60, 2014.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Anual de Energia – Oferta e Geração de Energia Elétrica no Brasil**. Brasília: EPE, 2022.

FERNANDES, M. et al. **Optimal Sizing of Hybrid Wind-PV Systems Using HOMER Pro**. Journal of Cleaner Production, v. 415, p. 137-145, 2023.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2007.

GWEC – Global Wind Energy Council. **Global Wind Report 2023**. Bruxelas: GWEC, 2023.

IEA – International Energy Agency. **World Wind Energy Report – 2023**. Paris: IEA, 2023.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy Statistics 2022**. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

KUMAR, A. et al. **Fuzzy and Neural Approaches for Energy Storage Management in Wind-Solar Hybrid Systems**. Energy Reports, v. 8, p. 4500-4512, 2022.

LOPES, R. et al. **Vector Control Strategies for Grid-Connected Wind Turbines**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 36, n. 5, p. 2121-2132, 2021.

LOSEKANN, L. **Diversificação da matriz energética brasileira: oportunidades e desafios**. Revista de Economia e Energia, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 77-95, 2018.

NIEDERLE, G. **Estator de gerador síncrono – Nota Técnica**. Porto Alegre: UFRGS, 2018.

PASSINI, R. **Energia elétrica e desenvolvimento sustentável**. Revista Brasileira de Energia, Belo Horizonte, v. 27, n. 1, p. 100-115, 2021.

PORCIÚNCULA, A. **Impactos ambientais de usinas eólicas no Brasil**. Revista de Sustentabilidade Energética, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 30-40, 2019.

QUEIROZ, C. A. **Avanços tecnológicos em turbinas eólicas de grande porte**. Revista de Engenharia Elétrica Aplicada, Recife, v. 19, n. 3, p. 110-120, 2021.

SAMRAT, N. et al. **Performance Comparison of Fuzzy and PID Controllers for Standalone Wind Turbines**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 54, p. 102911, 2023.

SILVA, J. R. **Atratividade da energia eólica no Brasil: uma análise regional**. Revista de Planejamento Energético, Natal, v. 12, n. 4, p. 55-70, 2018.

ZHANG, X. et al. **Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Systems: Recent Advances and Future Trends**. Renewable Energy, v. 198, p. 1100-1112, 2023.