



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Matheus Victor Alves Nascimento

Relatório de Estágio Supervisionado

Campina Grande, PB

2025

Matheus Victor Alves Nascimento

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ___/___/___

Prof. Reuben Palmer Rezende de Sousa

Orientador

Prof. Ronimack Trajano de Souza

Avaliador

Campina Grande, PB

2025

Agradecimentos

Aos meus pais, Luciana e Antonio, expressei minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, incentivo contínuo e pela base sólida que sempre me proporcionaram ao longo da minha formação acadêmica e pessoal.

Ao LEIAM, agradeço pelo suporte técnico prestado, indispensável para o desenvolvimento adequado deste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), manifesto meu reconhecimento pela infraestrutura e pelo ambiente institucional que possibilitaram a realização deste estudo.

À Virtus-CC, registro meus agradecimentos pela viabilização da integração entre a Acumuladores Moura S.A. e a UFCG, possibilitando a realização deste estágio no âmbito da parceria estabelecida.

À Acumuladores Moura S.A., agradeço pelo suporte técnico oferecido e pelo acolhimento durante o período de estágio, elementos essenciais para o aprendizado prático e para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Marcus Marinho, agradeço pela supervisão atenta e pelo acompanhamento responsável do estágio. Ao professor Reuben Palmer, registro minha gratidão pela orientação dedicada e pelas contribuições relevantes que enriqueceram este trabalho.

Resumo

O presente relatório descreve as atividades desenvolvidas durante o estágio supervisionado realizado na empresa Acumuladores Moura S.A., por meio da Virtus-CC, em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O estágio teve duração de 270 horas, distribuídas entre atividades presenciais na unidade industrial da Moura, em Belo Jardim – PE, e atividades técnicas no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM). As atividades envolveram a ambientação ao processo fabril, o acompanhamento da produção de baterias chumbo-ácido e íon-lítio, e a análise de processos associados a sistemas de armazenamento de energia (BESS), incluindo estudos de viabilidade econômica para aplicação em arbitragem tarifária e a elaboração de uma proposta para abastecimento de um hospital em regime de ilha. Também foram realizados ensaios experimentais no Laboratório de Potência do ITEEM, contemplando testes de *black start*, formação de rede, operação em droop e transição entre os modos seguidor e formador. Complementarmente, foram realizadas simulações no MATLAB/Simulink envolvendo estratégias ativas de detecção de ilhamento, como injeção de potência, AFD, SFS e SMS. As atividades permitiram integrar conhecimentos teóricos à prática profissional, ampliando a compreensão sobre microrredes, eletrônica de potência, armazenamento de energia e processos industriais.

Palavras-chave: Microrredes; BESS; Eletrônica de Potência; Ilhamento; Arbitragem.

Abstract

This report describes the activities carried out during the supervised internship at Acumuladores Moura S.A., through Virtus-CC, in partnership with the Federal University of Campina Grande (UFCG). The internship comprised 270 hours distributed between on-site activities at Moura's industrial unit in Belo Jardim-PE, and technical activities at the Laboratory of Industrial Electronics and Machine Drives (LEIAM). The activities included familiarization with the industrial environment, monitoring the production processes of lead-acid and lithium-ion batteries, and performing analyses related to Battery Energy Storage Systems (BESS), such as economic viability studies for tariff arbitrage applications and the development of a proposal to supply a hospital operating in island mode. Experimental tests were also conducted at the ITEEM Power Laboratory, covering black start procedures, grid formation, droop control operation, and transitions between grid-following and grid-forming modes. Additionally, simulations were implemented in MATLAB/Simulink to evaluate active islanding detection strategies, including power injection, AFD, SFS, and SMS techniques. The activities enabled the integration of theoretical knowledge with practical experience, enhancing understanding of microgrids, power electronics, energy storage, and industrial processes.

Keywords: Microgrids; BESS; Power Electronics; Islanding Detection; Energy Arbitrage.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Equipe do Moura Tech na Fábrica Acumuladores Moura Unidade 10.	12
Figura 2 – Experimento: <i>black start</i> e formação de rede realizado no ITEEM	18
Figura 3 – Experimento: Variação de inclinação da curva de droop com carga realizado no ITEEM	19
Figura 4 – Experimento: backup de potência realizado no ITEEM	19
Figura 5 – Curva de atuação do BESS em condições normais de operação.	23
Figura 6 – Diagrama esquemático da proposta de projeto para suprir unidade de saúde em uma ilha	23
Figura 7 – Diagrama de blocos da estratégia de injeção de potência ativa e reativa.	24
Figura 8 – Diagrama de blocos da estratégia AFD implementada no <i>MATLAB/Simulink</i>	25
Figura 9 – Diagrama de blocos da estratégia SFS implementada no <i>MATLAB/Simulink</i>	25
Figura 10 – Diagrama de blocos da estratégia SMS implementada no <i>MATLAB/Simulink</i>	26
Figura 11 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia injeção controlada de potência reativa.	28
Figura 12 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia <i>Active Frequency Drift</i>	29
Figura 13 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia <i>Sandia Frequency Shift</i>	29
Figura 14 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia <i>Slip Mode Frequency Shift</i>	30

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados da fatura (Julho/2025)	20
Tabela 2 – Dados do BESS	20
Tabela 3 – Cenários avaliados para aplicação do BESS em arbitragem de energia	21
Tabela 4 – Especificações do projeto — Posto de saúde em operação isolada	22
Tabela 5 – Comparação entre frequência esperada e medida para diferentes valores de FP.	27
Tabela 6 – Comparação entre frequência esperada e medida para diferentes valores de carga.	27

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Plano de Estágio	10
1.2	Organização do Trabalho	11
2	LOCAL DE ESTÁGIO	12
2.1	Acumuladores Moura S.A.	12
2.2	LEIAM	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1	Seguidor de rede	14
3.2	Formador de rede	14
3.3	Característica isócrona	14
3.4	Controle em <i>droop</i>	15
3.5	Microrrede	15
3.6	Ilhamento	15
3.7	Estratégias de detecção de ilhamento	16
4	ATIVIDADES REALIZADAS	17
4.1	Integração e ambientação ao processo fabril	17
4.2	Acompanhamento da produção das baterias chumbo-ácido e íon-lítio	17
4.3	Testes no laboratório de potência do ITEEM	18
4.3.1	<i>black start</i> e formação de rede	18
4.3.2	Variação de inclinação da curva de <i>droop</i> com carga	19
4.3.3	Backup de potência	19
4.4	Avaliação de viabilidade econômica de um BESS com aplicação de arbitragem	20
4.5	Elaboração de uma proposta para atendimento de um hospital em regime de operação em ilha	22
4.6	Simulações de Estratégias para Detecção de Ilhamento	24
4.6.1	Injeção Controlada de Potência	24
4.6.2	Active Frequency Drift (AFD)	24
4.6.3	Sandia Frequency Shift (SFS)	25
4.6.4	Slip Mode Frequency Shift (SMS)	26
5	RESULTADOS	27
5.1	Testes no Laboratório de Potência do ITEEM	27

5.2	Simulações de Estratégias para Detecção de Ilhamento	27
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	Referências	32

1 Introdução

A Virtus-CC mantém parceria com a Acumuladores Moura S.A. por meio do programa Moura Tech, iniciativa que promove a integração entre universidades, institutos de pesquisa e o grupo moura, sendo essa articulação intermediada pela Virtus-CC. O programa tem como objetivo principal acelerar o processo de ambientação de novos talentos ao contexto industrial, abrangendo a compreensão do processo fabril, a assimilação da cultura organizacional da empresa e a integração com as equipes técnicas, etapas que normalmente demandam tempo e esforço durante a contratação de novos profissionais.

No âmbito do Moura Tech, o programa é estruturado em diferentes subdivisões temáticas. A atuação deste estágio ocorreu na subdivisão academia BESS, voltada à área de sistemas de armazenamento de energia. Essa iniciativa tem como foco a formação técnica e prática de recursos humanos em tecnologias emergentes aplicadas ao armazenamento energético, com ênfase nos sistemas *Battery Energy Storage System* (BESS).

O BESS constitui uma tecnologia estratégica para a modernização do setor elétrico, ao possibilitar maior segurança, flexibilidade e confiabilidade na gestão da energia. Sua aplicação abrange a integração de fontes renováveis, como solar e eólica, a estabilização e o suporte à rede elétrica por meio de respostas rápidas e do controle de frequência e tensão, a operação de sistemas isolados e remotos, a otimização do consumo energético por meio da redução de picos de demanda (*peak shaving*), além do suporte aos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia.

Nesse contexto, o estágio foi desenvolvido no âmbito do programa Moura Tech, especificamente na Academia BESS, atendendo a demandas técnicas definidas pelo grupo moura em conjunto com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), representada pelos docentes participantes dessa parceria institucional.

O período de realização do estágio compreendeu de 06 de outubro de 2025 a 05 de dezembro de 2025, com carga horária semanal de 30 horas, totalizando 270 horas. Desse total, 90 horas foram cumpridas presencialmente na fábrica da Acumuladores Moura S.A., localizada no município de Belo Jardim-PE, enquanto as 180 horas restantes foram desenvolvidas no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), vinculado à UFCG.

1.1 Plano de Estágio

Nesta seção é apresentado o plano de estágio supervisionado, no qual são descritas as atividades previstas para serem desenvolvidas ao longo do período de estágio. O objetivo geral do estágio é promover a integração dos conhecimentos adquiridos na formação acadêmica com a prática profissional, tanto no ambiente industrial quanto no laboratorial. A seguir, são apresentadas as atividades estabelecidas no planejamento inicial do estágio.

- Representar o Virtus-CC na prestação de serviços técnicos junto à Acumuladores Moura S.A;
- Participar da apresentação institucional e processo de ambientação nas unidades industriais;
- Acompanhar e analisar os processos produtivos das fábricas UN10 e UN14;
- Apoiar atividades relacionadas a sistemas de armazenamento de energia (BESS);
- Acompanhar operações e testes de baterias de chumbo e de lítio, automotivas e não automotivas;
- Coletar, organizar e interpretar dados operacionais e resultados de ensaios, sob orientação técnica;
- Realizar visitas técnicas ao ITEM para acompanhamento de atividades laboratoriais e de pesquisa;
- Observar a integração entre ensaios laboratoriais e demandas industriais;
- Cumprir normas e procedimentos internos relacionados à segurança, confidencialidade e conduta profissional;
- Apoiar as atividades de interface entre a Moura e a UFCG.

1.2 Organização do Trabalho

Este relatório está organizado em seis capítulos. O **Capítulo 1** apresenta a introdução, contendo uma descrição sucinta dos objetivos do trabalho e uma visão geral dos temas abordados ao longo do relatório. O **Capítulo 2** dedica-se à apresentação da empresa, contemplando suas instalações e os principais projetos desenvolvidos. No **Capítulo 3**, são expostos os fundamentos teóricos que embasam as atividades realizadas. O **Capítulo 4** descreve as atividades desenvolvidas durante o estágio supervisionado. O **Capítulo 5** apresenta os resultados obtidos, bem como a análise correspondente. Por fim, o **Capítulo 6** reúne as considerações finais, destacando os resultados alcançados e as principais lições aprendidas ao longo do período de estágio.

2 Local de Estágio

Nesta seção são apresentados os locais onde o estágio foi realizado, os quais consolidam a integração entre a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e o setor privado, representado pela empresa Acumuladores Moura S.A., beneficiária dos serviços prestados, e pela Virtus-CC, responsável pela intermediação entre a UFCG e a Moura.

2.1 Acumuladores Moura S.A.

A empresa Acumuladores Moura S.A. foi fundada em 1957, na cidade de Belo Jardim, Pernambuco, em um contexto de escassez de infraestrutura básica, em que o fornecimento de água encanada e energia elétrica era limitado ou inexistente para grande parte da população. Nesse cenário, a criação de uma fábrica de baterias automotivas em larga escala no agreste pernambucano era considerada uma iniciativa improvável. Entretanto, Edson Mororó Moura e sua esposa Maria da Conceição Viana Moura decidiram investir em um projeto inovador, que viria a transformar-se em um dos principais empreendimentos industriais do país.



Figura 1 – Equipe do Moura Tech na Fábrica Acumuladores Moura Unidade 10.

O empreendimento teve início de forma artesanal, literalmente no quintal da residência do casal. Ambos possuíam formação em Química e Engenharia Química e iniciaram a produção

de acumuladores automotivos em pequena escala, mesmo em uma região com frota veicular reduzida. Com o passar dos anos, a fábrica ampliou sua capacidade produtiva e passou a fornecer baterias para montadoras de grande porte.

Atualmente, a Moura é referência no setor de baterias na América do Sul, com produção anual superior a 10 milhões de unidades, consolidando-se como líder no segmento. No âmbito de sua cultura organizacional, a empresa adota o conceito denominado “Jeito Moura”, fundamentado no fortalecimento de vínculos de confiança, na superação de desafios e na busca contínua pela excelência.

A Moura valoriza a melhoria contínua como princípio essencial, tanto no desenvolvimento pessoal quanto institucional, e mantém compromisso permanente com a qualidade, a inovação tecnológica e a sustentabilidade. Além disso, a empresa demonstra forte engajamento social e ambiental, promovendo o desenvolvimento regional de forma responsável e sustentável.

2.2 LEIAM

O Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), localizado no bloco CH da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), foi instituído em 1976, originando-se de pequenos projetos desenvolvidos no antigo Laboratório de Máquinas Elétricas, por um grupo de professores que realizaram sua capacitação técnica na França.

Atualmente, o laboratório dispõe de um simulador em tempo real e de infraestrutura computacional de alto desempenho, que oferecem suporte às atividades de simulação, análise e obtenção de resultados experimentais nas áreas de eletrônica industrial e acionamento de máquinas elétricas.

3 Fundamentação teórica

3.1 Seguidor de rede

As fontes do tipo seguidor de rede (*grid-following*) operam conectadas ao sistema elétrico, injetando potência ativa e reativa de forma controlada enquanto a referência de tensão — amplitude, fase e frequência — é integralmente determinada pela própria rede. Para realizar essa operação, tais dispositivos empregam algoritmos de sincronização, como o *Phase-Locked Loop* (PLL), que permite rastrear a tensão da rede com elevada exatidão e robustez, mesmo sob condições de distorção harmônica ou variações dinâmicas.

Esse modo de operação é especialmente comum em fontes renováveis, como sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas. Por apresentarem natureza intermitente e variabilidade significativa na potência gerada, essas unidades não conseguem impor uma referência de tensão estável, o que torna o modo seguidor de rede a estratégia adequada para sua integração ao sistema elétrico.

3.2 Formador de rede

As fontes formadoras de rede (*grid-forming inverters*) desempenham um papel fundamental no estabelecimento da referência de tensão no ponto de acoplamento comum.

Diferentemente dos seguidores, essas fontes não dependem da tensão da rede para operar: eles próprios impõem amplitude, fase e frequência. Esse comportamento replica o funcionamento de máquinas síncronas tradicionais, como grupos moto-geradores a diesel, que historicamente desempenharam a função de formadores de rede.

3.3 Característica isócrona

A operação isócrona está tradicionalmente associada aos geradores síncronos formadores de rede. Nesse modo, a unidade mantém a frequência de operação constante, independentemente das variações de carga, graças ao uso de controladores de velocidade com ação integral.

Embora adequada para operação isolada, essa característica torna-se inadequada quando múltiplas unidades isócronas operam em paralelo. Isso ocorre porque, ao manterem a frequência rigidamente fixa, tais unidades não apresentam a característica de declive potência–frequência necessária para o compartilhamento natural de carga.

Nessa condição, as fontes tendem a “disputar” o controle da frequência e da referência de tensão, o que pode levar a oscilações, esforços mecânicos excessivos e, em casos extremos, à instabilidade do sistema.

3.4 Controle em *droop*

O controle em *droop* é amplamente utilizado para permitir o compartilhamento proporcional de potência entre múltiplas fontes formadoras de rede sem a necessidade de comunicação direta. Inspirado no comportamento natural dos geradores síncronos, esse método estabelece relações entre potência ativa e frequência, bem como entre potência reativa e tensão, introduzindo pequenos declives nessas grandezas a fim de promover um compartilhamento automático da carga entre as unidades.

Matematicamente, o controle em *droop* pode ser expresso pelas relações:

$$f = f_0 - K_P (P - P_0) \quad (3.1)$$

$$V = V_0 - K_Q (Q - Q_0) \quad (3.2)$$

onde f_0 e V_0 representam, respectivamente, a frequência e a tensão nominais; P_0 e Q_0 são os pontos de operação desejados; K_P e K_Q são os coeficientes de *droop*; e P e Q correspondem às potências ativa e reativa instantâneas.

3.5 Microrrede

Segundo a definição estabelecida pelo IEEE, uma microrrede é um sistema elétrico distribuído composto por cargas e fontes de energia que operam de forma coordenada dentro de limites elétricos claramente definidos.

Esse arranjo é capaz de atuar conectado e desconectado a rede principal, garantindo níveis adequados de controle, confiabilidade e qualidade de energia por meio de recursos locais de geração, armazenamento e gerenciamento.

3.6 Ilhamento

O ilhamento caracteriza-se pela transição do modo conectado à rede para o modo isolado, situação em que a microrrede se desconecta do sistema elétrico principal. Essa separação pode ocorrer devido a atividades de manutenção, falhas internas, perturbações externas no sistema elétrico de potência ou atuações de proteção.

Quando a transição não é controlada, o transiente associado pode ser severo, ocasionando afundamentos ou elevações abruptas de tensão e frequência, comprometendo a estabilidade operacional e a integridade dos equipamentos.

Nos casos em que o ilhamento ocorre de forma não intencional, torna-se essencial identificar rapidamente essa condição, de modo a evitar danos à microrrede, aos conversores eletrônicos de potência e ao sistema de distribuição.

3.7 Estratégias de detecção de ilhamento

As estratégias de detecção de ilhamento são tradicionalmente classificadas em três categorias: passivas, ativas e híbridas.

As técnicas passivas monitoram grandezas elétricas locais — como tensão, frequência, distorção harmônica e taxa de variação da frequência (*Rate of Change of Frequency* – ROCOF). Apesar de não introduzirem perturbações no sistema, apresentam limitações significativas em situações de equilíbrio entre geração e carga, resultando em zonas de não detecção amplas.

Os métodos ativos, por outro lado, introduzem pequenas perturbações nos sinais de referência do conversor, como ajustes controlados na frequência, amplitude ou fase. Quando a rede está presente, essas perturbações são absorvidas pela sua rigidez eletromecânica; após a desconexão, tornam-se suficientemente perceptíveis para gerar desvios mensuráveis, permitindo detectar rapidamente o ilhamento. Entre as técnicas ativas mais consolidadas destacam-se o *Active Frequency Drift* (AFD), o *Slip Mode Frequency Shift* (SMS) e o *Sandia Frequency Shift* (SFS).

Por fim, as estratégias híbridas combinam elementos das abordagens passivas e ativas. Nesse modelo, o monitoramento passivo opera continuamente, enquanto as perturbações ativas são acionadas apenas quando há suspeita de ilhamento. Essa combinação reduz a zona de não detecção típica dos métodos passivos e, simultaneamente, minimiza os efeitos adversos das perturbações ativas sobre a qualidade da energia, aumentando a confiabilidade da detecção.

4 Atividades realizadas

A metodologia adotada durante o estágio curricular na Acumuladores Moura S.A. foi estruturada de modo a proporcionar uma vivência prática e integrada dos processos industriais, administrativos e de inovação tecnológica da empresa. As atividades foram distribuídas em etapas progressivas de ambientação, acompanhamento técnico e observação de práticas produtivas e sustentáveis, conforme descrito a seguir.

4.1 Integração e ambientação ao processo fabril

A etapa inicial consistiu em um programa de integração e ambientação promovido pelo Grupo Moura, com o objetivo de apresentar a estrutura organizacional, os processos produtivos e as normas de segurança aplicadas no ambiente industrial.

Durante essa fase, foram ministradas palestras introdutórias abordando a história da empresa, sua cultura organizacional e seus princípios institucionais. Também foram apresentadas, em formato expositivo, todas as unidades fabris da Acumuladores Moura S.A., destacando suas áreas de atuação, tecnologias empregadas e características operacionais.

Além disso, foram transmitidas orientações referentes às práticas de segurança e conduta no ambiente fabril, incluindo restrições quanto ao uso de dispositivos eletrônicos, limitação de circulação em áreas específicas e cuidados preventivos relacionados à movimentação de empilhadeiras e equipamentos de transporte interno. Essa etapa foi fundamental para garantir a integração segura e eficiente do estagiário às atividades subsequentes.

4.2 Acompanhamento da produção das baterias chumbo-ácido e íon-lítio

Após a fase de ambientação, foi conduzido o acompanhamento sistemático dos processos produtivos das baterias de chumbo-ácido e de íons de lítio, atualmente concentrados na Unidade 10 da fábrica da Moura. Essa atividade teve como objetivo compreender as etapas de fabricação e controle de qualidade adotadas pela empresa.

Durante o acompanhamento, foram observadas as diferentes fases de produção, desde a preparação dos componentes e montagem dos elementos internos até as etapas finais de selagem, carga e inspeção visual dos produtos. Também foram apresentados os ensaios de controle de qualidade realizados para assegurar a conformidade técnica das baterias, com destaque para o teste de ciclagem, no qual são monitorados parâmetros como tensão, corrente e estado de carga (SoC).

O estagiário pôde acompanhar a execução prática desses ensaios, analisando as unidades aprovadas e as que foram reprovadas, compreendendo assim os critérios de desempenho e confiabilidade que norteiam o controle de qualidade da empresa.

Durante essa etapa, foi ainda apresentada a iniciativa *Moura Energia como Serviço*, que oferece soluções energéticas completas aos clientes sem a necessidade de aquisição de equipamentos, promovendo flexibilidade e atualização tecnológica contínua.

Por fim, foi realizada uma visita técnica à Unidade 14, responsável pela reciclagem de baterias de chumbo-ácido fora de uso. As baterias inservíveis são recolhidas junto aos clientes e processadas para o reaproveitamento dos materiais constituintes.

Como parte dessa política, a empresa mantém um programa de retorno, no qual o cliente entrega a bateria usada ao adquirir uma nova, recebendo um desconto proporcional no valor do produto. Essa prática reforça o compromisso do Grupo Moura com a sustentabilidade, a logística reversa e os princípios da economia circular.

4.3 Testes no laboratório de potência do ITEEM

O Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEEM) foi desenvolvido pela Acumuladores Moura com o objetivo de fomentar a pesquisa, o desenvolvimento de novos produtos e o aprimoramento daqueles já empregados pela empresa. Nesse contexto, durante o estágio foram realizadas diversas atividades experimentais no Laboratório de Potência do ITEEM, envolvendo a execução e a análise de ensaios técnicos.

4.3.1 *black start* e formação de rede

O objetivo deste experimento foi validar a capacidade do PCS de energizar um barramento desenergizado, bem como sua aptidão para estabelecer e manter uma rede estável em operação ilhada. A Figura 2 apresenta o diagrama esquemático do experimento de *black start*.

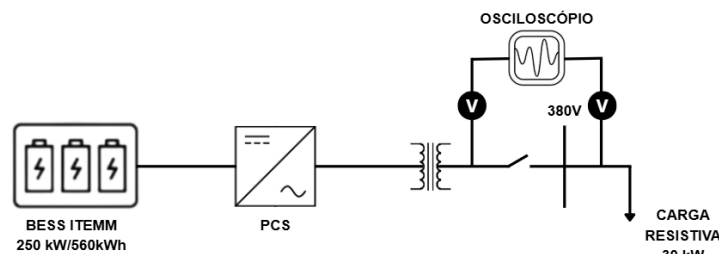


Figura 2 – Experimento: *black start* e formação de rede realizado no ITEEM

Nesse ensaio, uma carga resistiva de 30 kW encontrava-se desenergizada, e utilizou-se um PCS associado a um BESS de 250 kW para realizar sua energização no instante de fechamento da chave. Além disso, um osciloscópio foi empregado para monitorar a forma de onda da tensão imediatamente antes e após o ponto de acoplamento.

4.3.2 Variação de inclinação da curva de droop com carga

O segundo experimento teve como objetivo validar o PCS operando em modo formador de rede em droop. A Figura 3 ilustra o diagrama esquemático do experimento realizado.

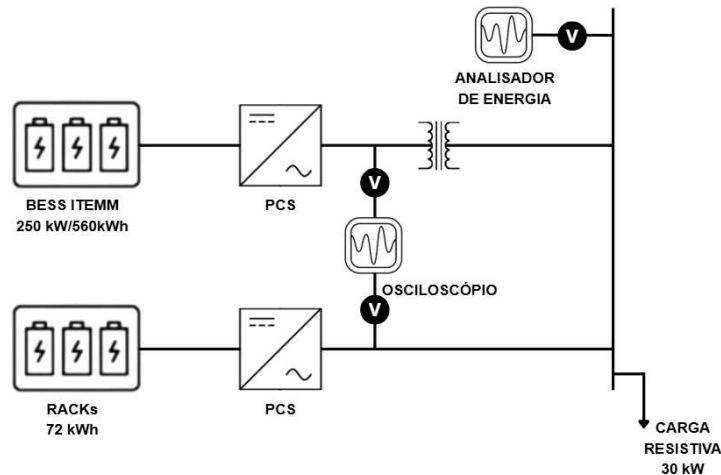


Figura 3 – Experimento: Variação de inclinação da curva de droop com carga realizado no ITEEM

No experimento, foram utilizados dois PCS conectados em paralelo para suprir uma carga resistiva de 30 kW. O PCS conectado aos racks com capacidade total de 72 kWh, operou no modo formador de rede utilizando controle por droop, enquanto o outro PCS atuou no modo seguidor de rede. A inclinação do droop no PCS formador foi então variada com o objetivo de analisar a resposta dinâmica da frequência frente a essas alterações.

4.3.3 Backup de potência

Por fim, analisou-se a capacidade do PCS de migrar do modo conectado à rede para o modo ilhado. Nesse experimento, foi monitorada a resposta do equipamento quanto à estabilidade da tensão durante e após a transição de modos. Na Figura 4 é apresentado o esquemático utilizado durante o experimento.

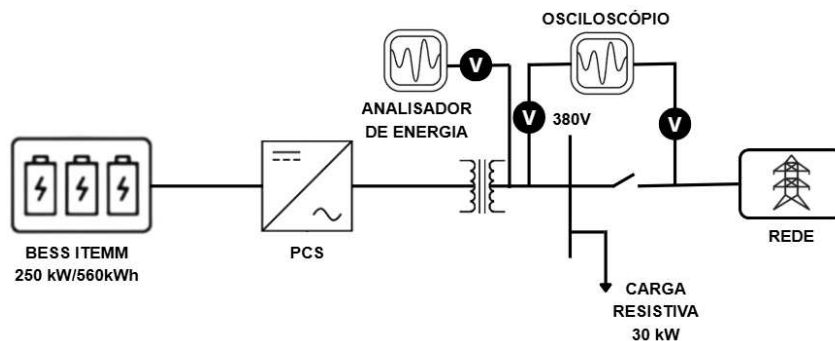


Figura 4 – Experimento: backup de potência realizado no ITEEM

Nesse experimento, o sistema foi inicialmente conectado ao ponto de acoplamento com a rede, de modo que o PCS operasse no modo seguidor enquanto a rede atuava como formadora. Após o sistema atingir o regime permanente, o ponto de conexão com a rede foi seccionado para avaliar a capacidade do PCS de migrar do modo conectado para o modo ilhado, passando assim do modo seguidor para o modo formador de rede.

4.4 Avaliação de viabilidade econômica de um BESS com aplicação de arbitragem

A atividade desenvolvida teve como objetivo avaliar a viabilidade de implementação de um sistema de armazenamento de energia por baterias (BESS) aplicado à arbitragem de energia, estratégia que consiste no deslocamento do consumo do horário de ponta, caracterizado por tarifas mais elevadas, para o período fora de ponta, no qual a energia apresenta menor custo.

Para essa análise, foi avaliado o perfil de consumo do cliente com base nos dados da fatura referente ao mês de julho de 2025 (ver Tabela 1), utilizada como referência para a caracterização do comportamento energético da unidade consumidora. Adicionalmente, foram analisadas as especificações técnicas dos racks de baterias disponíveis para aplicação no projeto (ver Tabela 2).

Tabela 1 – Dados da fatura (Julho/2025)

Fatura Mensal (Julho/2025)	Quantidade
Demanda de Distribuição	374,30 kW
Demanda de Distribuição Isenta de ICMS	25,70 kW
Consumo Ponta	18.582,14 kWh
Consumo Fora Ponta	163.766,90 kWh
Consumo Reativo Excedente Ponta	374,30 kVAr
Consumo Reativo Excedente Fora Ponta	2.164,20 kVAr
Demanda Contratada	400,00 kW
ICMS	17,00%
PIS	1,00%
COFINS	4,00%
Bandeira Tarifária Vigente	Amarela

Tabela 2 – Dados do BESS

Premissas do BESS	Valor
Energia Nominal do Rack de Baterias Modular	379 kWh
DoD (Profundidade de Descarga)	90,00%
RTE (Eficiência Global do Sistema)	82,56%
Dch (Eficiência de Descarga do Sistema)	90,00%
Rch (Eficiência de Recarga do Sistema)	86,00%

Com base nesses dados, procedeu-se ao dimensionamento da energia útil de cada rack de baterias, da energia total a ser deslocada do horário de ponta para o período fora de ponta, do

número de racks necessários e da capacidade total do sistema BESS, conforme as expressões a seguir:

$$E_{\text{útil}} = E_{\text{nom}} \cdot \text{DoD} \cdot \eta_{\text{global}} \quad (4.1)$$

$$E_{\text{ponta,dia}} = \frac{E_{\text{ponta,mês}}}{N_{\text{dias úteis}}} \quad (4.2)$$

$$N_{\text{mod}} = \frac{E_{\text{ponta,dia}}}{E_{\text{útil}}} \quad (4.3)$$

$$C_{\text{BESS}} = N_{\text{mod}} \cdot C_{\text{racks}} \quad (4.4)$$

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico associado ao BESS, foi utilizada a expressão que relaciona a energia diária requerida, a incidência solar média diária e os rendimentos do sistema fotovoltaico e do sistema global, conforme apresentado a seguir:

$$W_{\text{pico}} = \frac{E_{\text{dia}}}{H_{\text{dia}} \cdot \eta_{\text{FV}}} \quad (4.5)$$

Por fim, foram definidos diferentes cenários de operação (ver Tabela 3) com o objetivo de analisar a viabilidade do projeto sob distintas condições técnicas e operacionais. Para cada cenário, estimou-se o investimento inicial (Capital Expenditure – CAPEX), considerando os custos associados à aquisição e à implantação dos ativos permanentes necessários à execução do projeto.

Tabela 3 – Cenários avaliados para aplicação do BESS em arbitragem de energia

Cenário	Configuração e objetivo
1	3 racks BESS; deslocamento integral da energia no horário de ponta.
2	2 racks BESS; deslocamento parcial da energia no horário de ponta.
3	3 racks BESS + FV; atendimento integral da demanda no horário de ponta.
4	2 racks BESS + FV; atendimento parcial da demanda no horário de ponta.

Além disso, foram realizadas consultas à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o intuito de obter os valores atualizados das tarifas aplicáveis aos períodos de ponta e fora de ponta praticados pela concessionária do estado do Pará. A partir dessas informações, foi efetuado o cálculo do payback simples, visando estimar o tempo necessário para a recuperação do investimento inicial em cada cenário analisado.

4.5 Elaboração de uma proposta para atendimento de um hospital em regime de operação em ilha

Nesta atividade, foi inicialmente necessário estabelecer um perfil de carga representativo para o hospital, uma vez que os dados disponibilizados se restringiam aos valores médios e máximos de potência, conforme apresentado na Tabela 4. Dessa forma, realizou-se uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de adotar um perfil típico de consumo energético para unidades hospitalares de pequeno porte, compatível com as características do empreendimento analisado.

Tabela 4 – Especificações do projeto — Posto de saúde em operação isolada

Descrição	Pequeno hospital localizado em uma ilha, operando 24 horas por dia e atendendo comunidades próximas.
Potência média	50 kW
Potência de pico	90 kW
Características da carga	Consumo crítico de energia destinado a equipamentos médicos, iluminação essencial e sistemas de refrigeração de vacinas.
Desafios do suprimento	Necessidade de alta confiabilidade, com redundância e disponibilidade imediata de energia devido ao caráter crítico da carga.

A partir da análise do comportamento da curva de carga prevista, bem como do contexto e das especificações do projeto, definiu-se como solução inicial a adoção de um sistema composto por um sistema de armazenamento de energia em baterias (BESS) associado à geração fotovoltaica, capaz de suprir integralmente a demanda energética do hospital em regime de operação isolada. Adicionalmente, previu-se a utilização de um gerador a diesel (GMG) como fonte de geração redundante, destinado a operar em situações de falha do sistema fotovoltaico ou do BESS, bem como em períodos prolongados de baixa disponibilidade solar.

A escolha do GMG apenas como sistema de backup justifica-se, principalmente, pelas limitações logísticas associadas ao transporte de combustível até uma ilha isolada, o que torna economicamente inviável sua operação ininterrupta.

Para a validação da hipótese inicial, utilizou-se o software *HOMER Pro*, por meio do qual foram avaliados diferentes cenários de operação envolvendo combinações entre geração a diesel, sistemas fotovoltaicos e BESS, variando-se suas proporções e configurações operativas. A partir dos resultados das simulações, verificou-se que o cenário inicialmente proposto apresentou a melhor viabilidade econômica, atendendo simultaneamente aos requisitos de confiabilidade e suprimento energético do hospital.

Em seguida iniciou-se o processo de dimensionamento que consistiu em dimensionar o fotovoltaico, BESS e GMG. Começou-se dimensionando a potência de pico do fotovoltaico utilizando a potência de pico e média do hospital como parâmetros de entrada. Com a ajuda do *Home Pro* e os dados de incidência solar coletados através da CRESESB foi traçado uma curva

do fotovoltaico. Com isso foi realizado a sobreposição entre as curvas do fotovoltaico e a curva prevista para o hospital. Com a subtração das curvas pode dimensionar a capacidade do BESS, bem como, traçar a sua curva de atuação que pode ser observado na Figura 5.

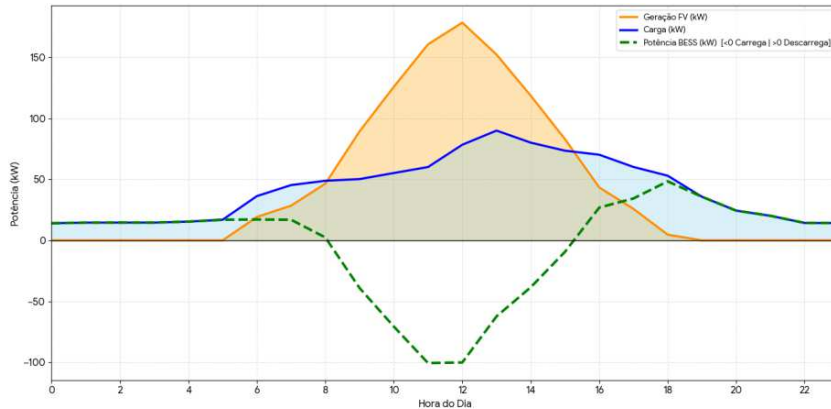


Figura 5 – Curva de atuação do BESS em condições normais de operação.

Vale destacar que, por se tratar de um hospital localizado em uma ilha isolada da rede elétrica, torna-se necessária a atuação ininterrupta do BESS, alternando entre os modos de fornecimento e armazenamento de energia. Essa necessidade decorre do fato de que o sistema fotovoltaico possui a limitação de operar como seguidor de rede, requerendo, portanto, a presença de uma fonte formadora de rede para garantir a operação estável do sistema elétrico.

já para dimensionamento do GMG foi utilizado a potência de pico do hospital e o presuposto de que o gerador não deve atuar extrapolando seus limites operacionais em plena carga com no máximo 80% da sua capacidade de potência como recomenda a literatura. A Figura 6 ilustra o esquemático do sistema proposto após os cálculos de dimensionamento.

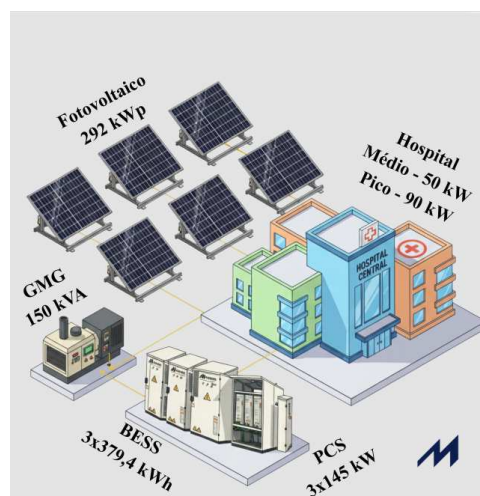


Figura 6 – Diagrama esquemático da proposta de projeto para suprir unidade de saúde em uma ilha

de saída. Quando o sistema está conectado à rede, esse desvio é rigidamente suprimido devido ao efeito de ancoragem proporcionado pela frequência da concessionária.

Entretanto, na condição de ilhamento, a ausência dessa referência externa permite que a frequência se desloque progressivamente até ultrapassar os limites estabelecidos pelas normas, possibilitando a identificação do ilhamento.

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos implementado no ambiente *MATLAB/Simulink*.

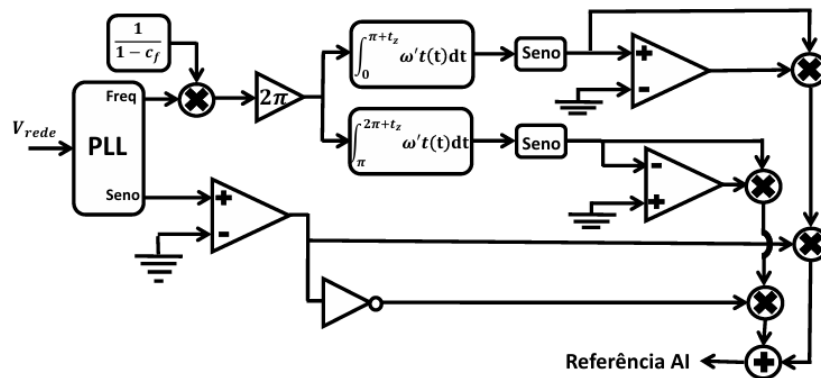


Figura 8 – Diagrama de blocos da estratégia AFD implementada no *MATLAB/Simulink*.

4.6.3 Sandia Frequency Shift (SFS)

O método *Sandia Frequency Shift* (SFS) baseia-se na modulação controlada da corrente injetada pelo inversor, alterando deliberadamente o seu fator de potência e induzindo um deslocamento contínuo da frequência. Quando o inversor está conectado à rede, a elevada rigidez elétrica do sistema impede que essas variações se ampliem, mantendo a frequência fortemente estabilizada.

Por outro lado, na condição de ilhamento, a ausência dessa referência externa permite que a frequência se desloque rapidamente para fora dos limites normativos, possibilitando a detecção do evento. A técnica destaca-se pela sua capacidade de provocar instabilidade intencional de forma rápida e eficaz.

A Figura 9 apresenta o diagrama de blocos utilizado na implementação do método no *MATLAB/Simulink*.

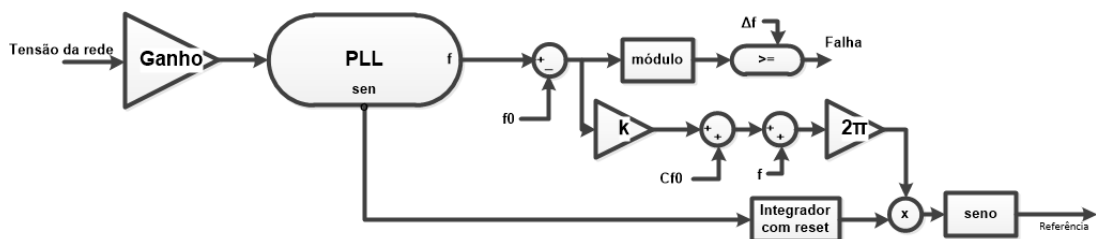


Figura 9 – Diagrama de blocos da estratégia SFS implementada no *MATLAB/Simulink*.

4.6.4 Slip Mode Frequency Shift (SMS)

A técnica *Slip Mode Frequency Shift* (SMS) utiliza um deslocamento de fase dependente da frequência para induzir instabilidade nas condições de operação do inversor. Essa estratégia estabelece uma relação direta entre a defasagem aplicada e a frequência medida, resultando em um mecanismo de realimentação positiva que desloca progressivamente o ponto de operação para fora da zona de estabilidade quando ocorre o ilhamento.

Durante a operação conectada à rede, porém, a elevada rigidez do sistema elétrico neutraliza esse deslocamento, mantendo a frequência estável e impedindo que a realimentação provoque variações significativas.

A Figura 10 apresenta o diagrama de blocos correspondente à implementação no ambiente *MATLAB/Simulink*.

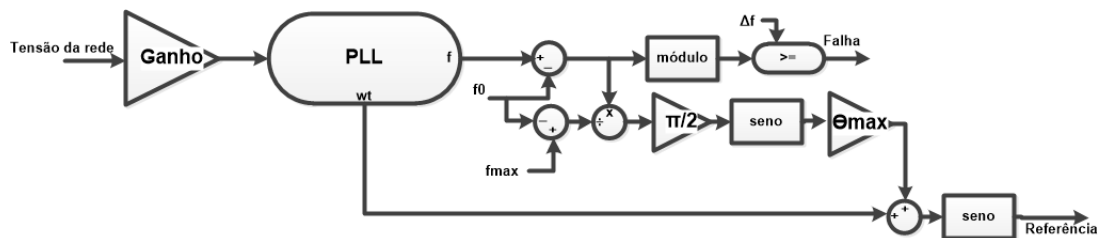


Figura 10 – Diagrama de blocos da estratégia SMS implementada no *MATLAB/Simulink*.

5 Resultados

Nesta seção são apresentados e analisados os resultados obtidos ao longo do estágio.

5.1 Testes no Laboratório de Potência do ITEEM

No experimento de *black start* e formação de rede, foi cronometrado o tempo necessário para que o sinal atingisse estabilidade após o acionamento. Observou-se que a tensão estabilizou em aproximadamente 10 s, alcançando os valores de 60 Hz e 380 V. Apesar de a carga utilizada ser relativamente pequena (30 kW para o contexto de uma microrrede), o resultado encontra-se dentro da faixa de resposta esperada.

No teste de variação da inclinação da curva de *droop* com diferentes níveis de carga, foram obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6.

FP	Frequência Esperada (Hz)	Frequência Medida (Hz)
20%	59,83	59,82
40%	59,91	59,92
100%	59,96	59,96
180%	59,98	59,98
200%	59,98	59,98

Tabela 5 – Comparação entre frequência esperada e medida para diferentes valores de FP.

P _{carga}	Frequência Esperada (Hz)	Frequência Medida (Hz)
10 kW	59,92	59,92
20 kW	59,83	59,82

Tabela 6 – Comparação entre frequência esperada e medida para diferentes valores de carga.

Os resultados permitem concluir que o PCS encontra-se em pleno funcionamento, uma vez que apresentou comportamento coerente com os valores previstos pela expressão matemática utilizada para o cálculo da curva de *droop*.

5.2 Simulações de Estratégias para Detecção de Ilhamento

Nos testes realizados no LEIAM foi possível implementar e analisar diferentes estratégias de detecção de ilhamento. Os resultados apresentados concentram-se, inicialmente, na resposta em frequência, uma vez que essa variável apresenta maior sensibilidade às perturbações impostas pelos métodos ativos e, ao mesmo tempo, está sujeita a limites mais restritivos nas normas aplicáveis.

Na Figura 11 observa-se um afundamento de frequência suficientemente pronunciado para caracterizar a condição de ilhamento. Esse comportamento ocorre devido à variação direta entre potência ativa e a frequência de operação, levando o sistema a deslocar-se da faixa nominal quando há desequilíbrio entre geração e carga.

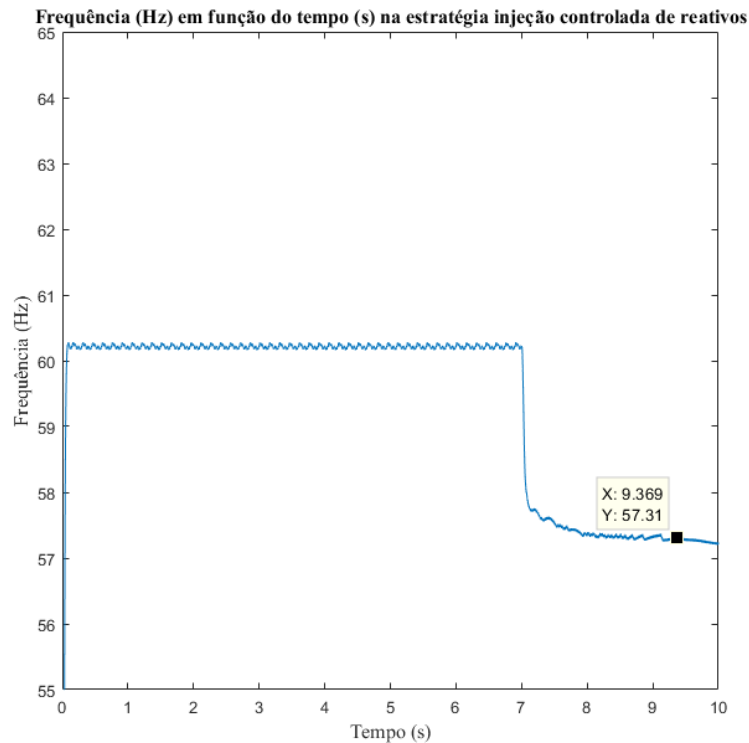


Figura 11 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia injeção controlada de potência reativa.

Por outro lado, nas Figuras 12, 13 e 14 observam-se elevações de frequência decorrentes da atuação das estratégias ativas. Essas estratégias introduzem perturbações controladas no sinal que, em condição de ilhamento, deslocam a frequência para fora da faixa permitida, aumentando a detectabilidade mesmo em situações de quase equilíbrio de potência.

De modo geral, todas as estratégias avaliadas demonstraram eficácia na detecção de ilhamento, cada uma apresentando suas vantagens e limitações, seja pela menor complexidade de implementação, pela menor distorção harmônica introduzida no sinal de saída ou por suas particularidades de ajuste e sensibilidade.

Por fim, destaca-se que a adoção de estratégias adequadas de detecção de ilhamento é de fundamental importância para a proteção de microrredes, especialmente frente a transições não programadas entre os modos de operação. Essas estratégias são essenciais para assegurar a atuação correta dos relés de proteção, possibilitando o isolamento oportuno do sistema e evitando danos a equipamentos sensíveis a esse tipo de transitório, como os conversores eletrônicos de potência (PCS) e as cargas conectadas.

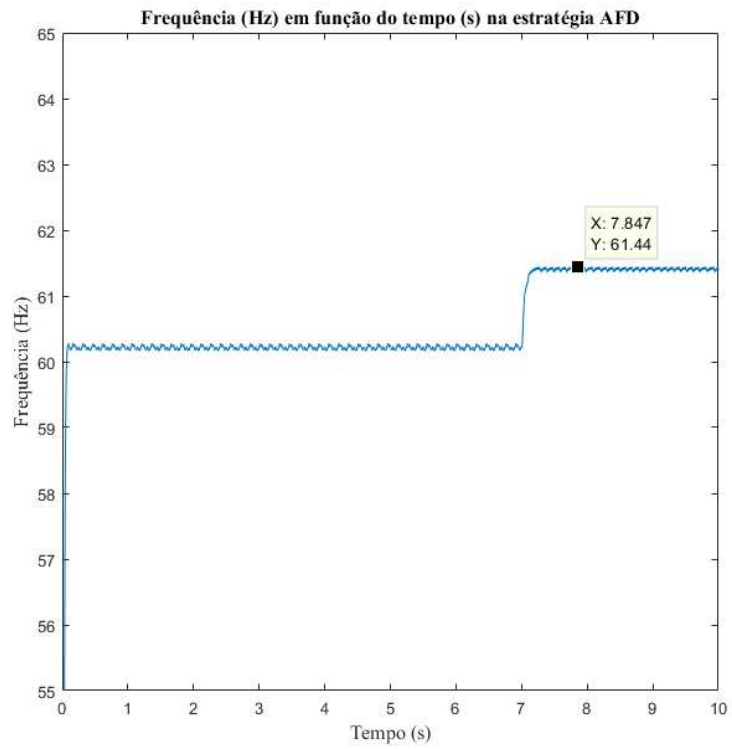


Figura 12 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia *Active Frequency Drift*.

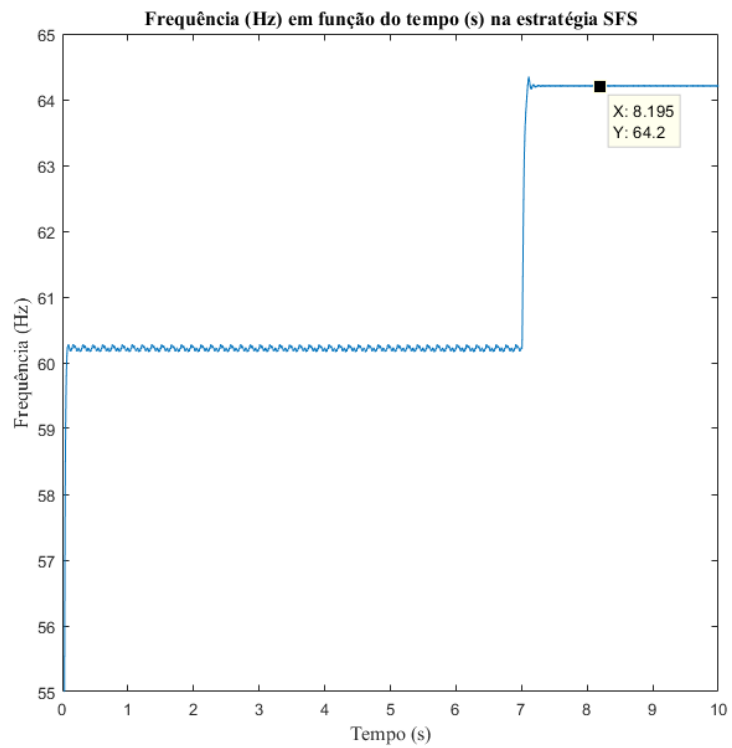


Figura 13 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia *Sandia Frequency Shift*.

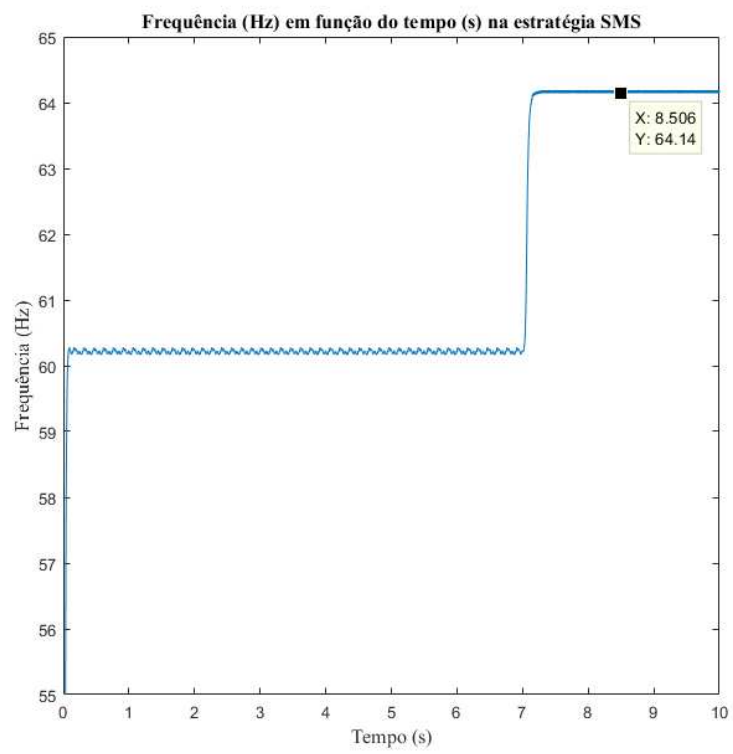


Figura 14 – Frequência (Hz) em função do tempo (s) na estratégia *Slip Mode Frequency Shift*.

6 Considerações Finais

O estágio supervisionado realizado no LEIAM e Acumuladores Moura S.A., por meio da Virtus-CC e em cooperação com a Universidade Federal de Campina Grande, representou uma oportunidade ímpar de integração entre a formação acadêmica e a prática profissional. Durante o período de atividades, foi possível vivenciar de forma direta os desafios, a dinâmica e as demandas de um ambiente industrial de grande porte, ao mesmo tempo em que foram aplicados conhecimentos fundamentais da engenharia elétrica.

A combinação entre experiências no ambiente fabril e atividades técnicas desenvolvidas nos laboratórios LEIAM e ITEEM proporcionou uma formação completa e multifacetada. No âmbito industrial, o acompanhamento dos processos de produção e controle de qualidade das baterias chumbo-ácido e íon-lítio permitiu compreender, em profundidade, a complexidade dos fluxos produtivos, a importância da confiabilidade e os rigorosos padrões exigidos pelo setor. Já nas atividades laboratoriais, os estudos envolvendo sistemas de armazenamento de energia, operação de microrredes, técnicas de detecção de ilhamento e testes com PCS possibilitaram um aprimoramento técnico significativo, alinhado às tecnologias mais atuais da área.

Além do aprendizado técnico, o estágio também contribuiu para o desenvolvimento de competências profissionais essenciais, como responsabilidade, comunicação, trabalho em equipe e tomada de decisão. O ambiente acolhedor e colaborativo tanto na Moura quanto nos laboratórios da UFCG foi fundamental para que essas habilidades fossem fortalecidas.

Por fim, acredita-se que o conjunto de experiências adquiridas durante o estágio agregou valor não apenas à formação pessoal e acadêmica, mas também às instituições envolvidas, por meio das atividades realizadas, análises desenvolvidas e sugestões apresentadas. O período de estágio reafirma a importância da integração entre universidade e indústria como mecanismo para formação de profissionais mais preparados, críticos e alinhados às demandas reais do setor elétrico.

Referências

- SPAGNUOLO, G.; et al. Renewable energy operation and conversion schemes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010.
- ARRITT, R. F.; DUGAN, R. C. Distribution system analysis and the future smart grid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2005.
- WALLING, R. A.; MILLER, N. W. Distributed generation islanding: implications on power system dynamic performance. In: IEEE PES SUMMER POWER MEETING, 2002. Anais [...]. 2002.
- BEGOVIĆ, M.; PREGELJ, A.; ROHATGI, A.; NOVOSEL, D. Impact of renewable distributed generation on power systems. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 2001. Anais [...]. 2001.
- TASK, V. Risk analysis of islanding of photovoltaic power systems within low voltage distribution networks. Paris: IEA-PVPS, 2002. (Technical Report T5-08).
- IEEE STANDARDS COORDINATING COMMITTEE 21. IEEE Application Guide for IEEE Std 1547: IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. New York: IEEE, 2008.
- RESENDE, Ê. C.; CARVALHO, H. T. M.; COELHO, E. A. A.; FREITAS, L. C. G. Proposta de uma nova estratégia ativa de anti-ilhamento baseada em realimentação positiva de frequência. *Eletrônica de Potência*, v. 26, n. 3, p. 302–314, 2021.
- BRITO, M. A. G.; ALVES, M. G.; SAMPAIO, L. P.; CANESIN, C. A. Estratégias de anti-ilhamento aplicadas a sistemas de geração distribuída fotovoltaica. *Eletrônica de Potência*, v. 23, n. 2, p. 226–234, 2018.