Universidade Federal de Campina Grande- UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática- CEEI
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica- UAEE
Bacharelado em Engenharia Elétrica

Relatório de Estágio Supervisionado

Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura- ITEMM

Davi Brito de Araujo

Concedente: Acumuladores Moura S. A.

Orientador: Prof. Huilman Sanca Sanca , D.Sc.

Campina Grande, Paraíba

Março de 2026

Davi Brito de Araujo

Relatório de Estágio Supervisionado

Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura- ITEMM

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Huilman Sanca Sanca, Dr

Campina Grande, Paraíba

Março de 2026

Davi Brito de Araujo

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de estágio supervisionado aprovado em 25 de março de 2026.

Prof. Dr. Huilman Sanca Sanca
UAEE/CEEI/UFCG
Orientador

Prof. Dr. Célio Anésio da Silva
UAEE/CEEI/UFCG
Membro Avaliador

À minha família, dedico o presente trabalho. Obrigado por acreditarem em mim antes mesmo que eu acreditasse!

Resumo

Neste trabalho, descrevem-se as atividades realizadas por Davi Brito de Araujo durante o estágio supervisionado, realizado no Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM), empresa do Grupo Moura, em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande. As atividades desenvolvidas durante o estágio tiveram como principal objetivo a pesquisa, modelagem e simulação de sistemas elétricos de potência integrados a novas tecnologias de armazenamento de energia, em questão o BESS (*Battery Energy Storage System*), e a integração desses sistemas com diferentes tipos de geração distribuída/renovável, demandas essas que surgiram durante a execução das atividade, visto que é uma área estratégica e de fundamental importância para o desenvolvimento da empresa. Durante o período, o estagiário atuou na área de planejamento e inovação energética, participando de duas frentes principais. Suas responsabilidades incluíram o desenvolvimento e a apresentação de estudos de prospecção de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) focados na aplicação do BESS em sistemas de transmissão de Corrente Contínua em Ultra Alta Tensão (UHVDC). Além disso, executou-se modelagens e simulações de fluxo de potência utilizando o software OpenDSS, objetivando-se a realização de estudos analíticos para validar o local e os barramento ótimos para a instalação de um sistema BESS móvel, modelado com base em um sistema real, na rede. O trabalho envolveu, ainda, a análise de diferentes alimentadores e a avaliação dos impactos técnicos da integração do sistema de armazenamento operando em conjunto com fontes de geração solar fotovoltaica e eólica. O estágio permitiu a aplicação prática de conhecimentos em análise de sistemas elétricos, fluxo de potência e integração de recursos energéticos distribuídos em um ambiente focado na transição e inovação energética.

Palavras-chave: ITEMM, BESS, Geração Distribuída, OpenDSS, P&D.

Abstract

This paper describes the activities carried out by Davi Brito de Araujo during his supervised internship at the Edson Mororó Moura Institute of Technology (ITEMM), a company of the Moura Group, in partnership with the Federal University of Campina Grande. The activities developed during the internship had as their main objective the research, modeling and simulation of electrical power systems integrated with new energy storage technologies, in question the BESS (Battery Energy Storage System), and the integration of these systems with different types of distributed/renewable generation, demands that arose during the execution of the activities, since it is a strategic area of fundamental importance for the development of the company. During the period, the intern worked in the area of energy planning and innovation, participating in two main areas. His responsibilities included the development and presentation of Research and Development (RD) prospecting studies focused on the application of BESS in Ultra High Voltage Direct Current (UHVDC) transmission systems. Furthermore, power flow modeling and simulations were performed using OpenDSS software, aiming to conduct analytical studies to validate the optimal location and busbars for the installation of a mobile BESS system, modeled based on a real system, in the grid. The work also involved the analysis of different feeders and the evaluation of the technical impacts of integrating the storage system operating in conjunction with photovoltaic solar and wind generation sources. The internship allowed the practical application of knowledge in electrical systems analysis, power flow, and integration of distributed energy resources in an environment focused on energy transition and innovation.

Keywords: ITEMM, BESS, Distributed Generation, OpenDSS, P&D.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura do ITEMM - Belo Jardim - PE 3
Figura 2 – Estrutura Corporativa e Ecossistema do Grupo Moura 4
Figura 3 – Curva do Pato 7
Figura 4 – Principais Componentes do Sistema BESS 8
Figura 5 – Circuito Equivalente 13 Barras IEEE 14
Figura 6 – Circuito para Análise da Simulação 1 19
Figura 7 – Perfil de Potência de todo o sistema 21
Figura 8 – Perfil de Potência do Sistema 21
Figura 9 – Perfil de Tensão do Sistema 22
Figura 10 – Curva de Carga Diária (*Loadshape*) simulada 22
Figura 11 – Estado de Carga (SoC) do Sistema BESS ao longo do dia 23
Figura 12 – Fluxo de Potência- Barramento 675 23
Figura 13 – Circuito para Análise da Simulação 2 24
Figura 14 – Perfil de Potência de todo o sistema 25
Figura 15 – Perfil de Potência do Sistema 26
Figura 16 – Perfil de Tensão do Sistema 26
Figura 17 – Curva de Carga Diária (*Loadshape*) simulada 27
Figura 18 – Estado de Carga (SoC) do Sistema BESS ao longo do dia 27
Figura 19 – Fluxo de Potência- Barramento 675 28
Figura 20 – Fluxo de Potência- Barramento 680 28
Figura 21 – Circuito para Análise da Simulação 3 29
Figura 22 – Perfil de Potência de todo o sistema 30
Figura 23 – Perfil de Potência do Sistema 31
Figura 24 – Perfil de Tensão do Sistema 31
Figura 25 – Curva de Carga Diária (*Loadshape*) simulada 32
Figura 26 – Estado de Carga (SoC) do Sistema BESS ao longo do dia 32
Figura 27 – Fluxo de Potência- Barramento 675 33
Figura 28 – Fluxo de Potência- Barramento 634 33

Lista de Abreviaturas e Siglas

BESS	Battery Energy Storage System (Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias)
BMS	Battery Management System
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
EMS	Energy Management System
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITEMM	Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura
PCS	Power Conversion System
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

Sumário

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Objetivo Geral 1
1.1.1 Objetivos Específicos 1
1.2 Ambiente do Estágio 2
1.2.1 A Empresa 2
1.2.2 A Estutura Corporativa 3

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 5
2.1 O Sistema Elétrico Brasileiro 5
2.1.1 Desafios do Sistema Elétrico Brasileiro 6
2.1.1.1 A Curva do Pato/Duck Curve 6
2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) . . . 6
2.3 Principais Aplicações do BESS no Sistema Elétrico 9
2.3.1 Aplicações nos Sistemas de Geração 9
2.3.2 Aplicações nos Sistemas de Transmissão 9
2.3.3 Aplicações nos Sistemas de Distribuição 10
2.4 Transmissão em Corrente Contínua em Ultra Alta Tensão (UHVDC) 10
2.4.1 Uso do BESS em Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua em Ultra Alta Tensão (UHVDC) 10
2.5 Estudos de Fluxo de Potência em Sistemas Elétricos 11
2.5.1 O Software OpenDSS 11

3 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS 13
3.1 Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento 13
3.2 Atividades de Simulação 14
3.3 Modelagem dos Componentes do Sistema no OpenDSS 15
3.3.1 Modelagem do Sistema de Geração Fotovoltaica 15
3.3.2 Modelagem do Sistema de Geração Eólica 16
3.3.3 Modelagem do Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias 16
3.4 Resultados dos Estudos Realizados 18
3.4.1 Resultados da Simulação do Cenário 1 19
3.4.2 Resultados da Simulação do Cenário 2 24
3.4.3 Resultados da Simulação do Cenário 3 29
3.5 Avaliação dos Resultados Obtidos 34
3.6 Impactos nas Perdas Totais do Sistema 34

3.7 Comportamento do Perfil de Tensão 35

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 36

REFERÊNCIAS 37

1 Introdução

O crescimento e a expansão do Setor Elétrico Brasileiro, impulsionada pela transição energética e pela alta necessisidade de operar continuamente, exige o desenvolvimento e a elaboração de novas tecnologias para contornar alguns desafios que surgem. Neste presente contexto, o uso de sistemas de armazenamento de energia (*Energy Storage*) surge como uma alternativa capaz de solucionar diversos obstáculos, como por exemplo um melhor aproveitamento da Geração Distribuída no fornecimento contínuo de energia renovável. Desse modo, o relatório descreve as atividade realizadas pelo aluno Davi Brito de Araujo nesse âmbito, em que o seu propósito é documentar as atividades práticas e acadêmicas desenvolvidas durante o período de Estágio Supervisionado obrigatório do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande.

O programa de estágio foi realizado junto ao Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM), cumprindo uma jornada de 30 horas semanais. As atividades estenderam-se de 19 de dezembro de 2025 a 20 de fevereiro de 2026, totalizando a carga horária exigida de 180 horas. O progresso técnico e científico do estagiário foi acompanhado e orientado pelo Prof. Dr. Huiman Sanca Sanca, contando com a supervisão corporativa direta do engenheiro e Coordenador de Pesquisa e Desenvolvimento Daniel Araujo do Nascimento Sousa.

As atividades realizadas foram focadas e direcionadas principalmente no desenvolvimento voltado ao planejamento elétrico, com a elaboração de simulações computacionais e prospecção de inovações tecnológicas. O estagiário atuou de forma imersiva na pesquisa de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS), com foco tanto em aplicações de transmissão de grande porte quanto na otimização de redes de distribuição ativas.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste estágio supervisionado foi aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo da graduação na análise, modelagem e validação técnico-científica de tecnologias de armazenamento de energia (BESS) integradas a sistemas elétricos modernos, contribuindo para os estudos de inovação do ITEMM.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o propósito central, as atividades foram divididas em frentes de pesquisa e simulação, englobando os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): Estruturar e apresentar estudos detalhados sobre o estado da arte e a aplicação de sistemas BESS em sistemas de transmissão de Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC), avaliando seus benefícios operacionais.
- Modelagem de Redes Elétricas: Desenvolver e executar simulações avançadas de fluxo de potência utilizando o software OpenDSS.
- Alocação Ótima de BESS: Avaliar e validar tecnicamente o local e o barramento mais adequados para a instalação de um sistema BESS móvel na rede elétrica.
- Análise de Integração Renovável: Investigar, por meio de simulação em diferentes alimentadores, os impactos e a eficiência do despacho do sistema BESS operando em conjunto com fontes de geração distribuída solar fotovoltaica e eólica.

1.2 Ambiente do Estágio

1.2.1 A Empresa

O desenvolvimento tecnológico e a execução das atividades propostas neste estágio ocorreram no Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM), uma instituição que atua como o principal vetor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) do Grupo Moura. Fundado em 1957 na cidade de Belo Jardim, Pernambuco, o Grupo Moura consolidou-se ao longo de décadas como líder na América do Sul no desenvolvimento, fabricação e comercialização de baterias e acumuladores de energia. Em resposta às demandas contemporâneas pela transição energética, descarbonização e modernização das redes elétricas, a empresa tem expandido estrategicamente seu escopo de atuação, investindo de maneira robusta em novas tecnologias, como células de íons de lítio e Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) de alta potência para aplicações estacionárias e industriais.

Desse modo, com o objetivo de adaptar-se as novas tendências do mercado energético, o Grupo Moura fundou o ITEMM, estruturado como uma Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT) sem fins lucrativos. O instituto possui a missão de ser um elo estratégico entre as demandas reais da indústria e o conhecimento acadêmico de ponta. Sua infraestrutura e seus pesquisadores dedicam-se ao avanço de fronteiras tecnológicas em áreas críticas como novos materiais, eletrônica de potência, mobilidade elétrica, gestão de microrredes e integração de recursos energéticos distribuídos.

1.2.2 A Estutura Corporativa

Ademais, embora seja amplamente reconhecido no mercado consumidor pela sua marca principal no setor automotivo, o Grupo Moura constitui, na realidade, um vasto e complexo ecossistema corporativo focado em soluções globais de energia, logística e sustentabilidade. Com mais de seis décadas de atuação, a corporação evoluiu de uma fabricante regional para o status de maior produtora de acumuladores de energia da América do Sul, com operações industriais e comerciais que transcendem as fronteiras do Brasil. Abaixo, se tem as empresas que fazem parte do Grupo Moura:

- **Acumuladores Moura:** O núcleo fabril e comercial do grupo, reconhecido internacionalmente pela produção de acumuladores de energia e, mais recentemente, pela expansão para sistemas de armazenamento de alta potência (BESS) e baterias de lítio.
- **Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura:** A Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT) do grupo, que atua como o principal braço de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI). É o ambiente onde o estágio foi realizado, focado na vanguarda da transição energética e modernização do setor elétrico. A estrutura do ITEMM é destacada na Figura 1 e a estrutura corporativa mostra-se na Figura 2.

Figura 1 – Estrutura do ITEMM - Belo Jardim - PE



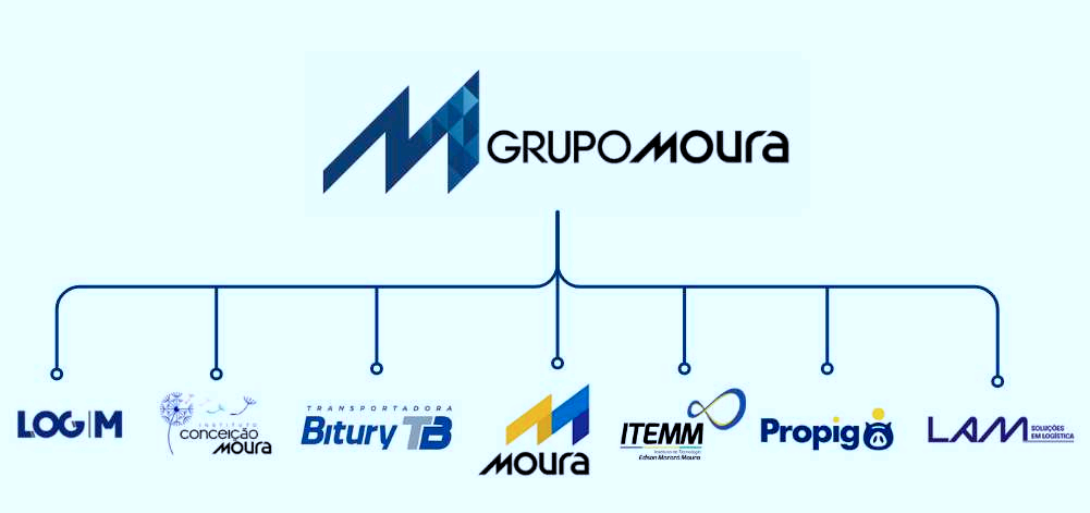
Fonte: ITEMM

- **Instituto Conceição Moura:** A frente de investimento social privado e responsabilidade socioambiental da corporação. O instituto atua diretamente na trans-

formação social, com forte foco em educação, arte e desenvolvimento comunitário, especialmente na região de Belo Jardim - PE.

- **LOGIM e Transportadora Bitury (TB):** Representam a robusta infraestrutura de transporte, logística inteligente e supply chain do grupo. São essenciais tanto para o escoamento da produção em nível continental quanto para a viabilização do sistema de logística reversa.
- **Propig:** A fintech do ecossistema Moura, desenvolvida para oferecer soluções financeiras, crédito e facilidades de pagamento, fortalecendo a rede de distribuidores e os parceiros varejistas de pequeno e médio porte.
- **LAM:** Integrada às operações metalúrgicas e ambientais do grupo, atua como um pilar fundamental para a economia circular, garantindo o processamento, a reciclagem de materiais e a sustentabilidade no descarte e reaproveitamento de componentes das baterias exauridas.

Figura 2 – Estrutura Corporativa e Ecossistema do Grupo Moura



Fonte: Autoria Própria

2 Fundamentação Teórica

O presente capítulo tem como foco principal a abordagem acerca dos fundamentos teóricos que foram essenciais para o entendimento de alguns conceitos necessários para a realização das atividades executadas no programa de estágio.

2.1 O Sistema Elétrico Brasileiro

Em primeiro lugar, faz-se extremamente necessário um panorama geral acerca do Sistema Elétrico Brasileiro, principalmente pela mudança ocorrida nos últimos anos, com a crescente exponencial da geração de energia a partir de fontes renováveis, como a energia fotovoltaica e eólica. Neste sentido, com o acelerado e considerável crescimento, houve como resultante principal um progressivo desequilíbrio entre o excesso de energia gerada em um horário em que a demanda se configura como baixa, e uma geração deficiente quando a demanda apresenta os seus maiores valores (CASTRO et al., 2025).
Além disso, é válido também o destaque para os principais fatores que levaram a uma rápida expansão da geração renovável no Brasil, com um destaque referente a energia solar. Assim, os dois motivos centrais andam em conjunto, que são: uma redução significativa nos custos da aquisição desses sistemas e um aumento considerável na sua eficiência, principalmente referente aos painéis fotovoltaicos e os inversores.

Tabela 1 – Paranoma do Crescimento da Geração no Brasil

Tipo de Geração	**2026**	**2030**
Solar	19.251 MW (7.8%)	24.136 MW (8.9%)
Eólica	34.712 MW (14%)	36.208 MW (13.3%)
MMGD	45.287 MW (18.2%)	69.017 MW (25.3%)
Hidreletrica	108.896 MW (43.6%)	109.308 MW (40.1%)
Biomassa	15.504 MW (6.2%)	16.139 MW (5.9%)
Nuclear	1.990 MW (0.8%)	1.990 MW (0.7%)
Termeletrica Gás	17.466 MW (7%)	13.758 MW (5%)
Termeletrica Óleo e Diesel	2.601 MW (1%)	1.168 MW (0.4%)
Termeletrica Carvão	2.880 MW (1.2%)	1.085 MW (0.4%)
Outras	184 MW (0.4%)	234 MW (0.4%)

Fonte: Dados da ANEEL

2.1.1 Desafios do Sistema Elétrico Brasileiro

Diante desse cenário do Sistema Elétrico Nacional, o Brasil, na figura do Operador Nacional do Sistema (ONS), tem enfrentado alguns desafios que colocam em questão muitas vezes a ininterruptibilidade e confiabilidade do sistema em risco, uma vez que essas unidades produtivas muitas vezes geram energia elétrica, em grande medida, fora do controle do operador. Desse modo, a fim de que o Sistema Interligado Nacional (SIN) mantenha a sua segurança e a população brasileira tenha o fornecimento de energia elétrica garantido, o ONS age cortando o excesso de geração das plantas geradoras, justamente por não ter o controle sobre elas e pelo fato de que o sistema elétrico brasileiro não foi planejado para absorver essa quantidade excedente de energia, o que chama-se de *curtailment*. (CASTRO et al., 2025)

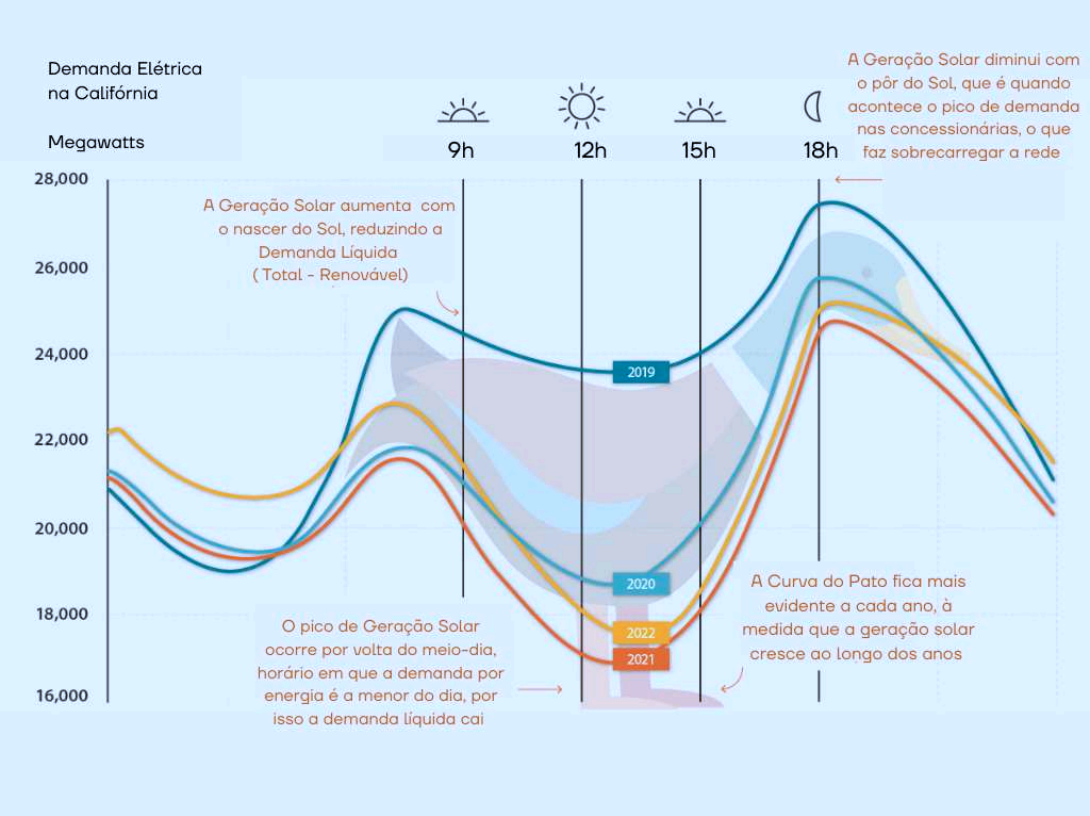
2.1.1.1 A Curva do Pato/Duck Curve

Ademais, outro fator importante é que a ascensão da geração solar fotovoltaica, um dos principais fatores para a transição no perfil energético do país, trouxe consigo o fenômeno conhecido como a "Curva do Pato"(*Duck Curve*). Este conceito descreve a relação entre a demanda e a geração de fontes renováveis, em que apresenta uma queda acentuada durante o período de maior irradiância solar e uma elevação brusca, ou rampa, ao final da tarde. Conforme aponta o ONS, o aprofundamento da "barriga"do pato sinaliza riscos de sobregeração e necessidade de cortes de geração *curtailment*, enquanto o "pescoço"do pato exige que o parque gerador remanescente possua uma alta capacidade de crescimento para atender ao pico de consumo noturno em um curto intervalo de tempo. Esse cenário revela a necessidade de soluções flexíveis no sistema elétrico nacional, como o BESS e a gestão da resposta da demanda, fundamentais para garantir a estabilidade de frequência e a segurança operativa em rede crítica, com alta penetração de fontes variáveis. (WALLACH, 2022)

2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS)

Diante do cenário abordado, em que a crescente de fontes de geração de energia renovável trouxeram também o crescimento nos desafios do sistema elétrico, o Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (*Battery Energy Storage System*) surge como uma alternativa para uma solução energética mais tecnológica e confiável. Desse modo, tem-se então que o BESS é um sistema complexo e modular. em que a sua arquitetura é composta basicamente por quatro pilares fundamentais, que vão garantir todo o processo de conversão, proteção e gestão da energia, os seus principais componentes são:

Figura 3 – Curva do Pato



Fonte: Adaptado de CAISO.

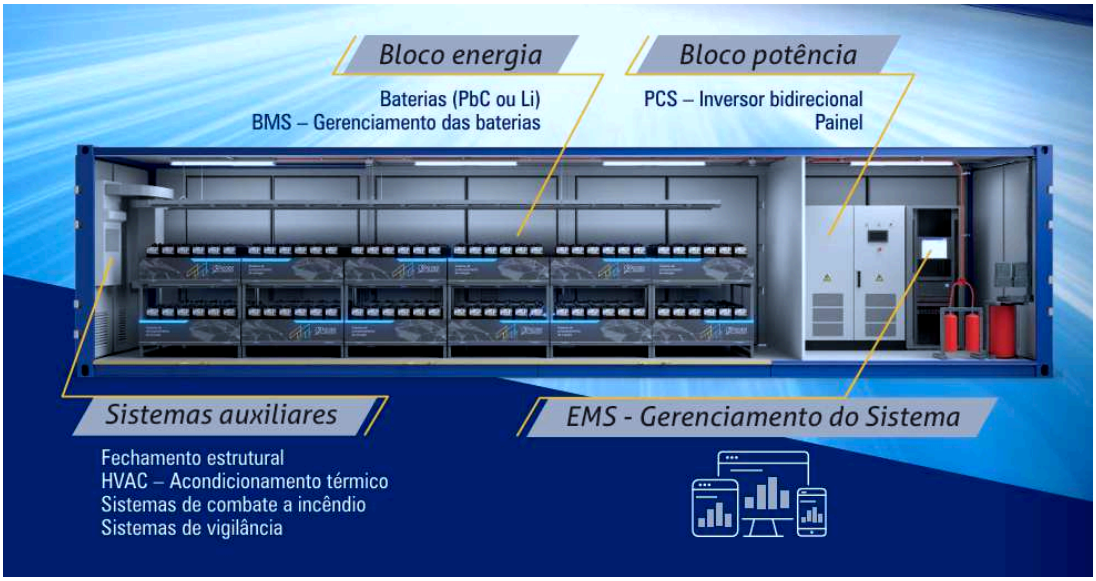
- **Células/Rack de Baterias**: Parte em que a energia é armazenada quimicamente. Atualmente, as químicas de Lítio-Ferro-Fosfato (LFP) e Níquel-Manganês-Cobalto (NMC) dominam o mercado devido à alta densidade energética e vida útil, mas também há a presença de sistemas com baterias de Chumbo Carbono (PbCO3)

- **Battery Management System (BMS)**: É o cérebro interno do sistema. Ele monitora a saúde de cada célula, equilibrando a tensão, controlando a temperatura e garantindo que o sistema opere dentro dos limites de segurança para evitar problemas, como a avalanche térmica.

- **Power Conversion System (PCS)**: Inversor bidirecional do BESS, ou seja, é o responsável por converter a Corrente Contínua (CC) das baterias em Corrente Alternada (CA) para a rede, e vice-versa durante o carregamento.

- **Energy Management System (EMS)**: Cérebro que vai 'comandar' todo o sistema, pois ele vai atuar tanto a nível de célula, quanto do conversor, ou seja, ele vai decidir quando as baterias vão recarregar ou descarregar, o que faz com que seja necessário que ele tenha a capacidade de se comunicar tanto com o sistema de armazenamento, quanto com a rede elétrica, com toda a microrrede em que ele está instalado.

Figura 4 – Principais Componentes do Sistema BESS



Fonte: Catálogo BESS Moura

Ademais, outro fator importante que levou ao crescimento na escolha dos Sistemas BESS como alternativa para as soluções dos problemas do Sistema Elétrico Nacional foi o fato de que, até alguns anos atrás, o alto custo das baterias restringia seu uso a sistemas isolados, tornando o sistema inviável para a aplicação em consumidores residenciais e comerciais. No entanto, a transição energética atual é impulsionada principalmente por uma redução disruptiva de custos no setor.
Segundo o Grupo Enel (Enel Group,) , o custo das baterias de íons de lítio recuou aproximadamente 90% desde 2010, enquanto a densidade energética aumentou em mais de 50%. Esse movimento, impulsionado pela escala da indústria de veículos elétricos, posiciona o BESS como vetor da transição por dois fatores principais:

- **Viabilidade de Arbitragem**: A queda no Custo Nivelado de Armazenamento permite que empresas lucrem ao armazenar energia no horário em que ela é mais barata, para o uso ou venda nos horários de pico, em que a tarifa é mais cara.
- **Redução do Curtailment**: O custo acessível torna viável o armazenamento de excedentes de geração eólica e solar que, de outra forma, seriam desperdiçados por limitações na infraestrutura elétrica da rede.

Neste sentido, a viabilidade financeira transformou o BESS de uma promessa tecnológica em uma necessidade infraestrutural do sistema elétrico, permitindo que a segurança operativa e a economia caminhem juntas.

2.3 Principais Aplicações do BESS no Sistema Elétrico

As aplicações e a usabilidade dos Sistemas de Armazenamento de Energia, especificamente do BESS, são inúmeras, de modo que ele pode atuar no setor elétrico nacional em três níveis principais, percorrendo áreas do sistema a nível de Geração, Transmissão e até mesmo o consumidor final, a nível de Distribuição.

2.3.1 Aplicações nos Sistemas de Geração

Em primeiro lugar, o crescimento da geração renovável é um dos grandes fatores que fizeram surgir algumas problemáticas no sistema elétrico de muitos países. Projeta-se que até o ano e 2028, as fontes de energia renováveis representem 42% da geração global de eletricidade, com a energia eólica e a solar fotovoltaica contribuindo com 25% desse total (YU et al., 2025), crescimento esse impulsionado pela redução dos custos da tecnologia desse modo de geração. Diante desse contexto, a aplicação do BESS em sistemas de geração de energia elétrica é uma das mais desafiadoras e promissoras aplicações para esses sistemas, uma vez que, no cenário atual do Sistema Interligado Nacional (SIN), ele surge como uma alternativa para mitigar os desafios de geração renovável, uma vez que, caso aplicado, o BESS seria capaz de suavizar a geração eólica e solar e torná-la mais estável, dado que um dos principais problemas e características dessa forma de geração é justamente a sua alta variação e os seus acentuados picos durante um dia, o que pode oferecer uma falta de estabilidade de tensão no sistema elétrico.

2.3.2 Aplicações nos Sistemas de Transmissão

Por outro lado, o atual panorama do SIN revela-se altamente promissor para a integração de Sistemas BESS. Com a expressiva expansão das fontes renováveis intermitentes, a infraestrutura de transmissão existente enfrenta gargalos significativos para o escoamento adequado dessa energia. Nesse cenário, o BESS desponta como uma solução estratégica para postergar ou substituir a construção de novas linhas de transmissão. Na prática, a tecnologia atua de forma decisiva no alívio do congestionamento da rede básica, um desafio crítico, sobretudo, para o manejo seguro e eficiente do imenso excedente de geração eólica e solar fotovoltaica oriundo da região Nordeste do Brasil.
É válido o destaque para algumas vantagens que o sistema de armazenamento de energia pode trazer, como por exemplo a redução no tempo de implantação dos sistemas, o que pode fazer com que ele lide melhor com as rápidas mudanças dos sistemas elétricos, além de fatores como a facilidade de instalação, uma vez que diferentemente das grandes torres e linhas de transmissão, eles são relativamente independente das características do terreno em que vai ser feita a instalação.(TORRES et al., 2025)

2.3.3 Aplicações nos Sistemas de Distribuição

Por fim, nos sistemas de distribuição há uma aplicabilidade ainda maior referente aos sistemas de armazenamento de energia, principalmente por ser uma área da rede elétrica que vem sofrendo com diversos problemas, que surgiram principalmente com o aumento abrupto nos números de geração fotovoltaica, como o problema do fluxo de potência reverso, em que a rede, que era pra fornecer a potência, começa a aborver o excedente gerado pela carga, algo que o sistema e a sua infraestrutura e topologia não estavam preparados, além de problemas como o surgimento de alimentadores com sobre-tensão. Desse modo, o BESS pode atuar absorvendo esse excesso de energia localmente e disponibilizando esse excendente em um horário de alta demanda, em horários de pico por exemplo.
Além disso, tem-se também aplicações referente a aspectos mais econômicos, como por exemplo a aplicação de redução de pico (*peak-shaving*), em que o sistema do BESS vai assumir todo o excendente de demanda que foi contratada, fazendo com que o consumidor não sofra penalizações e multas caso o valor da demanda que havia sido contratada, seja ultrapassada, algo que é muito comum em grandes consumidores comerciais e industriais (C&I)

2.4 Transmissão em Corrente Contínua em Ultra Alta Tensão (UHVDC)

Para o desenvolvimento de outras atividades realizadas no estágio, como toda a parte de prospecção tecnológica, através de Pesquisa e Desenvolvimento(P&D), foram realizadas pesquisas, que tiveram como base um levantamento qualitativo e uma revisão de literatura técnica voltada para a infraestrutura do Sistema Interligado Nacional (SIN). Especificamente, avaliou-se o papel das linhas de Transmissão em Corrente Contínua em Ultra Alta Tensão (UHVDC) como viabilizadoras da transição energética e como solução para os desafios presentes no SIN, principalmente relacionado com a segurança energética e com o a ininterruptibilidade dos sistemas de transmissão de energia do Brasil.

2.4.1 Uso do BESS em Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua em Ultra Alta Tensão (UHVDC)

Como foco principal, direcionou-se a aplicabilidade do BESS como forma de lidar com esses desafios e problemáticas. Assim, dividiu-se o trabalho de prospecção do seguinte modo:

- **Análise de Documentos e Artigos**: Foram realizadas consultas acerca de artigos e de relatórios, como documentos do ONS, para mapear os gargalos de transmissão

entre o sistema de energia no Nordeste - que é o local de maior geração renovável do país- e o mercado do Sudeste/Centro-Oeste, centro de carga principal do Brasil. E a partir disso, realizar propostas de melhoria dos desafios observados.

- **Avaliação dos Desafios e Comparativo Tecnológico**: Observou-se os principais desafios observados no sistema elétrico e estabeleceu-se um comparativo teórico entre as tecnologias convencionais HVAC (Corrente Alternada em Alta Tensão) e o UHVDC, como a questão da mitigação de perdas elétricas em distâncias maiores), a ausência de necessidade de compensação reativa ao longo da linha e a capacidade do sistema UHVDC de realizar o controle preciso do fluxo de potência ativa.

- **Estudo de Viabilidade**: Por fim, correlacionou-se o uso do UHVDC com as soluções de armazenamento (BESS), demonstrando como a transmissão de longas distâncias atua de forma complementar aos sistemas de baterias locais para reduzir o *curtailment* (corte de geração) das usinas renováveis.

2.5 Estudos de Fluxo de Potência em Sistemas Elétricos

Preliminarmente, a superação dos desafios existentes no Sistemas Elétrico de Potência (SEP) — com ênfase nas redes de transmissão — exige a execução rigorosa de estudos de fluxo de potência. Essa ferramenta computacional é indispensável para garantir a segurança operativa do sistema, pois permite simular contingências (como a falha de equipamentos) e prever os impactos diretos tanto nas fontes geradoras quanto nas cargas. Adicionalmente, o cálculo do fluxo de carga viabiliza a análise detalhada do escoamento da geração renovável, fornecendo diretrizes cruciais para que o SIN gerencie a intermitência, um de seus principais gargalos atuais e futuros. Por fim, esses estudos são a base do planejamento da expansão do setor elétrico. Instituições como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), por exemplo, processam milhares de cenários de fluxo de potência para fundamentar o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), documento técnico que orienta e justifica as concessões de novas subestações e linhas de transmissão leiloadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2.5.1 O Software OpenDSS

O simulador Open Distribution System Simulator, amplamente conhecido como OpenDSS, foi a principal ferramenta computacional empregada neste estudo para a modelagem e simulação de redes de distribuição sob diferentes cenários operativos. Desenvolvido e mantido pelo Electric Power Research Institute (EPRI), o OpenDSS consolidou-se mundialmente como uma das plataformas mais robustas e avançadas para a análise de sistemas elétricos de distribuição, destacando-se pela sua alta capacidade de resolver cir-

cuitos multifásicos, desequilibrados e com crescente penetração de recursos energéticos distribuídos.

No contexto regulatório brasileiro, a relevância do OpenDSS é evidenciada pela própria ANELL. Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) recomendam e estabelecem o OpenDSS como o software padrão para a realização dos cálculos de perdas técnicas e para a avaliação do desempenho elétrico das redes das concessionárias. Essa adoção oficial garante que as simulações padronizadas reflitam com alta precisão e confiabilidade a realidade física e matemática dos alimentadores.

Além do seu rigor técnico, uma das maiores vantagens do OpenDSS reside na sua arquitetura de código aberto (*open-source*) e na sua operação orientada a scripts baseados em texto. Essa característica confere ao programa uma flexibilidade excepcional, permitindo sua integração fluida com outras linguagens de programação, como o Python.

3 Atividades Desenvolvidas

Neste capítulo, serão explicitados alguns pontos das principais atividades realizadas durante o período de estágio. As atividades foram desenvolvidas com dois principais focos: a prospecção de projetos de novas tecnologias e a avaliação dos impactos de projetos futuros, realizados através da simulação de sistema elétricos de distribuição através de softwares. Tais atividades visam trazer uma solidificação nos conhecimentos da equipe para a realização de projetos futuros, que buscam ser realizados pelo Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM).

3.1 Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento

Inicialmente, para viabilizar as atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), foi necessário realizar uma prospecção aprofundada de editais e da literatura científica. Esse levantamento contínuo embasou o estudo de Sistemas BESS, especialmente por se tratar de um nicho de aplicação altamente específico e desafiador: os sistemas de transmissão em ultra alta tensão. Desse modo, o escopo de desenvolvimento das tarefas foi estruturado da seguinte forma:

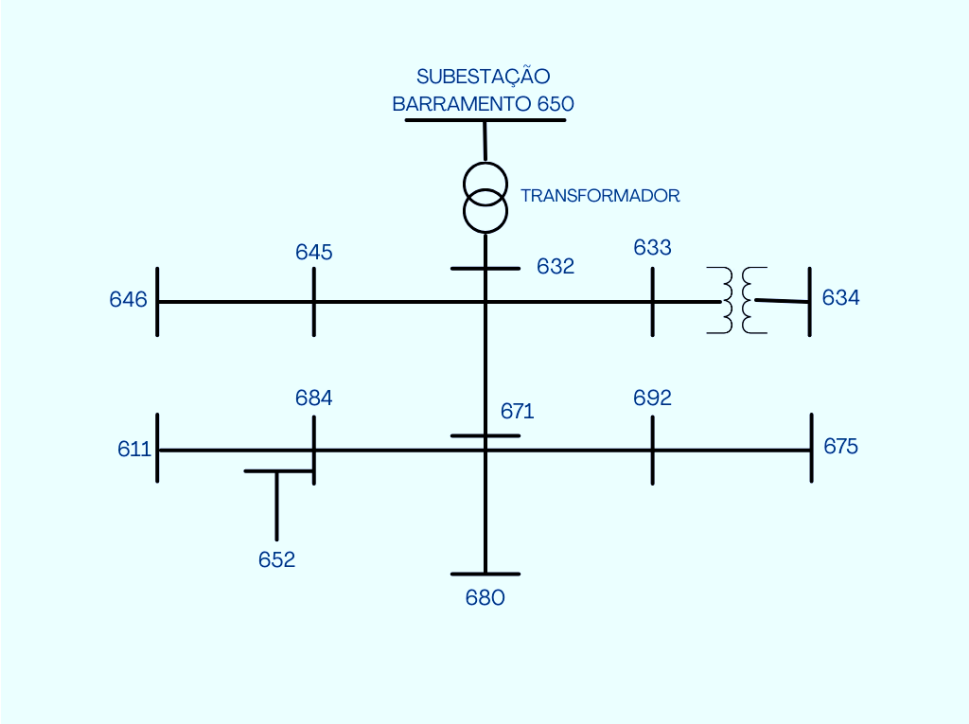
- **Levantamento do Estado da Arte:** Revisão bibliográfica abrangente das tecnologias mais recentes de baterias, topologias de conversores e estratégias de controle, com foco nas inovações globais e nas tendências literárias voltadas para aplicações em redes elétricas de grande porte.
- **Elaboração de Estudos sobre Sistemas Existentes:** Análise de plantas e projetos de BESS já operacionais (nacional e internacionalmente) ou em fase de comissionamento, visando entender os parâmetros práticos de integração, capacidade de armazenamento, resposta dinâmica e regulação de frequência/tensão em redes de transmissão.
- **Levantamento de Desafios e Problemáticas:** Identificação das principais lacunas técnicas, regulatórias e operacionais. Isso inclui as dificuldades de dimensionamento de inversores para ultra-alta tensão, estabilidade da rede (grid-forming vs. grid-following) e viabilidade econômica do empreendimento, hava vista dimensão do projeto.
- **Esboço da Solução da Problemática Central:** Proposição da arquitetura ou modelo de controle inicial capaz de mitigar os problemas mapeados. Esta etapa

define a rota tecnológica do projeto, estabelecendo as diretrizes para a simulação, o dimensionamento do sistema e a validação da hipótese de pesquisa.

3.2 Atividades de Simulação

Para a realização de toda a parte de simulações da rede de distribuição para a melhor instalação do Sistema BESS, utilizou-se como base o software OpenDSS, em que foi realizada toda a parte de cálculo de perfil de tensão, cálculo de fluxo de potência e de perdas elétricas. Desse modo, como modelo para simular a rede, escolheu-se como circuito equivalente o sistema de teste IEEE 13 barras (*IEEE 13 Node Test Feeder*), conforme mostra a figura [5], que é um modelo padrão amplamente utilizado na engenharia elétrica para a simulação, análise e validação de algoritmos em sistemas de distribuição de energia. Este modelo destaca-se por representar um alimentador radial de pequeno porte, porém com características operacionais e topológicas de alta complexidade (KERSTING, 2001).

Figura 5 – Circuito Equivalente 13 Barras IEEE



Fonte: Autoria Própria

É válido ainda o destaque para outros pontos do circuito analisado:

- O sistema opera com uma tensão nominal de 4.16 kV, atípica para o padrão do Brasil;

- É um modelo muito desequilibrado e carregado para o seu tamanho. Ele é composto por uma mistura de ramais trifásicos, bifásicos e monofásicos, alimentando cargas (concentradas e distribuídas) que também são fortemente desequilibradas e modeladas como potência constante, corrente constante ou impedância constante.
- A rede também incorpora elementos como reguladores de tensão, bancos de capacitores, cargar equilibradas e desequilibradas, etc.

3.3 Modelagem dos Componentes do Sistema no OpenDSS

Desse modo, dado que o modelo base do sistema vai ser o 13 barras do IEEE, o software OpenDSS já tem todo o equivalente do sistema modelado em suas linhas de código, de modo que é necessário somente fazer o chamado da função no início do código, para que todas as simulações, a partir disso, ocorram com base no circuito que foi chamado. O comando para a realização do procedimento é (***"Compile IEEE13Nodeckt.dss"***) Assim, faz-se necessário somente a modelagem dos componentes que vão ser adicionados no circuito, como os sistemas de geração de energia, tanto fotovoltaico, quanto eólico, e o sistema de armazenamento de energia por baterias (BESS), modelados através de linhas de código e com parâmetros definidos. (Electric Power Research Institute (EPRI), 2026)

3.3.1 Modelagem do Sistema de Geração Fotovoltaica

Primeiramente, para que fosse realizada a simulação de geração renovável, foi feita a modelagem do sistema fotovoltaico, em que o software OpenDSS permite a modelagem completa do sistema, incluindo a definição dos seguintes parâmetros, como mostra o código 3.1:

- Fator de Correção da placa fotovoltaica em relação a temperatura;
- Curva de Eficiência do Conversor;
- Curva de Irradiância durante o período de um dia.
- Curva de Temperatura durante o período de um dia.

```
New XYCurve.MyPvsT npts=4 xarray=[0 25 75 100] yarray=[1.2 1.0 0.8
    0.6]
New XYCurve.MyEff npts=4 xarray=[0.1 0.2 0.4 1.0] yarray=[0.86 0.9
    0.93 0.97]

New Loadshape.MyIrrad npts=24 interval=1 mult=[0 0 0 0 0 0.1 0.2
    0.3 0.5 0.8 0.9 1.0 1.0 0.99 0.9 0.7 0.4 0.1 0 0 0 0 0]
New Tshape.MyTemp npts=24 interval=1 temp=[25 25 25 25 25 25 25 25
    35 40 45 50 60 60 55 40 35 30 25 25 25 25 25 25]

New PVSystem.PV phases=3 bus1=trafo_pv kV=0.48 kVA=600 irrad=.98
    Pmpp=500 temperature=25 PF=1
~ effcurve=Myeff P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad TDaily=MyTemp

New Transformer.pv_elevador phases=3 xhl=5.75
~ wdg=1 bus=trafo_pv kV=0.48 kVA=750 conn=wye
~ wdg=2 bus=675 kV=4.16 kVA=750 conn=wye
```

Lista de comandos 3.1 – Modelagem do Sistema Fotovoltaico no OpenDSS

3.3.2 Modelagem do Sistema de Geração Eólica

Além disso, para que fosse possível a realização da modelagem do sistema de geração eólica, precisou-se definir alguns parâmetros-chave também, como a curva de carga de geração (*Loadshape*) que o gerador vai seguir, além de parâmetros típicos, como tensão, barramento de conexão e potência e conexão dos transformadores.

```
New LoadShape.Psaida npts=24 interval=1
~ mult=[0.54 0.50 0.47 0.46 0.45 0.47 0.49 0.51 0.54 0.57 0.59 0.60
    0.61 0.60 0.60 0.60 0.62 0.74 0.77 0.74 0.72 0.68 0.61 0.62 0.55]

New generator.WIND bus1=trafo_wind kv=0.69 kw=750 kva=1000 daily=
    Psaida

New Transformer.wind_elevador phases=3 xhl=5.75
~ wdg=1 bus=trafo_wind kV=0.69 kVA=750 conn=wye
~ wdg=2 bus=675 kV=4.16 kVA=750 conn=wye
```

Lista de comandos 3.2 – Modelagem do Sistema Eólico no OpenDSS

3.3.3 Modelagem do Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias

Por fim, a modelagem do sistema do BESS é uma inserção de forma modular, dividida em três etapas principais que definem desde o rendimento do equipamento até

a sua estratégia de operação diária. A modelagem considerou os seguintes pontos ke foi feita do modo 3.3:

- Definição da Curva de Eficiência do Sistema;
- Perfil de Despacho Diário do BESS (*Loadshape*): Período em que as baterias devem recarregar ou descarregar;

```
New XYCurve.EffBat npts=4 xarray=[.1 .2 .4 1.0] yarray=[.86 .9 .93
    .97]

New LoadShape.CurvaDespacho interval=1 npts=24
~ mult=[0, -1.0, -1.0, -1.0, -0.5, -0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0.5, 0.75, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.75, 0.5, 0, 0]

New Storage.Bateria phases=3 bus1=675 kv=4.16 kWhrated=2000
~ DispMode=Follow kWrated=350 daily=CurvaDespacho
~ %stored=50 Effcurve=EffBat
```

Lista de comandos 3.3 – Modelagem do Sistema de Armazenamento (Bateria) no OpenDSS

As configurações do Sistema de Armazenamento seguiram alguns pontos importantes na sua modelagem, o que é válido destacar a seguir:

- O período de recarga do sistema é entre 1h e 5h da manhã;
- O período de descarga do sistema é entre às 14h e 21h;
- O sistema foi dimensionado com uma capacidade de armazenamento nominal de 2000 kWh e potência nominal do inversor de 350 kW;
- O modo de operação do sistema foi definido como o Modo de Despacho, em que o equipamento deve seguir as curvas estabelecidas pela LoadShape de despacho diário;
- O sistema foi parametrizado para iniciar as simulações com 50% de sua capacidade total armazenada (50% de SoC)

3.4 Resultados dos Estudos Realizados

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações realizadas no software OpenDSS para o sistema de distribuição teste IEEE 13 barras. O comportamento da rede foi avaliado ao longo de um ciclo diário de 24 horas, observando variáveis críticas como o perfil de tensão nas barras e as perdas técnicas. Para fins de comparação e análise de impactos, o estudo foi dividido em três cenários operacionais distintos, mostrados na tabela [2], considerando a variação na localidade dos componentes do sistema, variando o barramento em que as gerações renováveis e o sistema de armazenamento estavam inseridos. Desse modo, tem-se então os seguintes cenários análisados:

Tabela 2 – Divisão das Simulações Realizadas

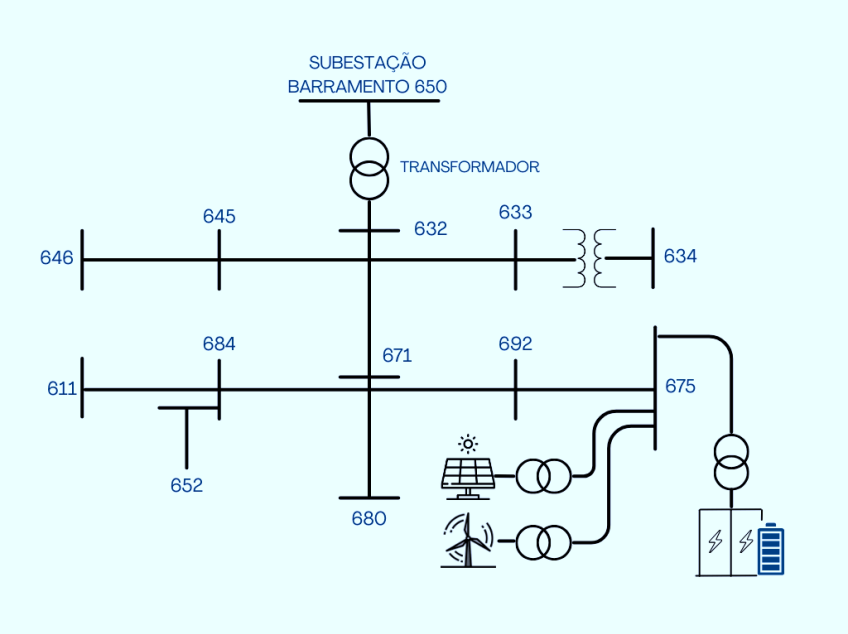
Simulação Realizada	**Configuração do Sistema**
Cenário 1	GD e BESS no Barramento 675
Cenário 2	GD no Barramento 680 e BESS no Barramento 675
Cenário 3	GD no Barramento 634 e BESS no Barramento 675

Fonte: Autoria Própria

3.4.1 Resultados da Simulação do Cenário 1

No primeiro cenário, foi definido que a instalação de toda a parte de geração de energia renovável (fotovoltaica e eólica) fosse instalada no barramento 675, barramento também que foi instalado o sistema do BESS, como mostra a figura 6

Figura 6 – Circuito para Análise da Simulação 1



Fonte: Autoria Própria

Desse modo, ao realizar as simulações, obteve-se os resultados listados na tabela[3]:

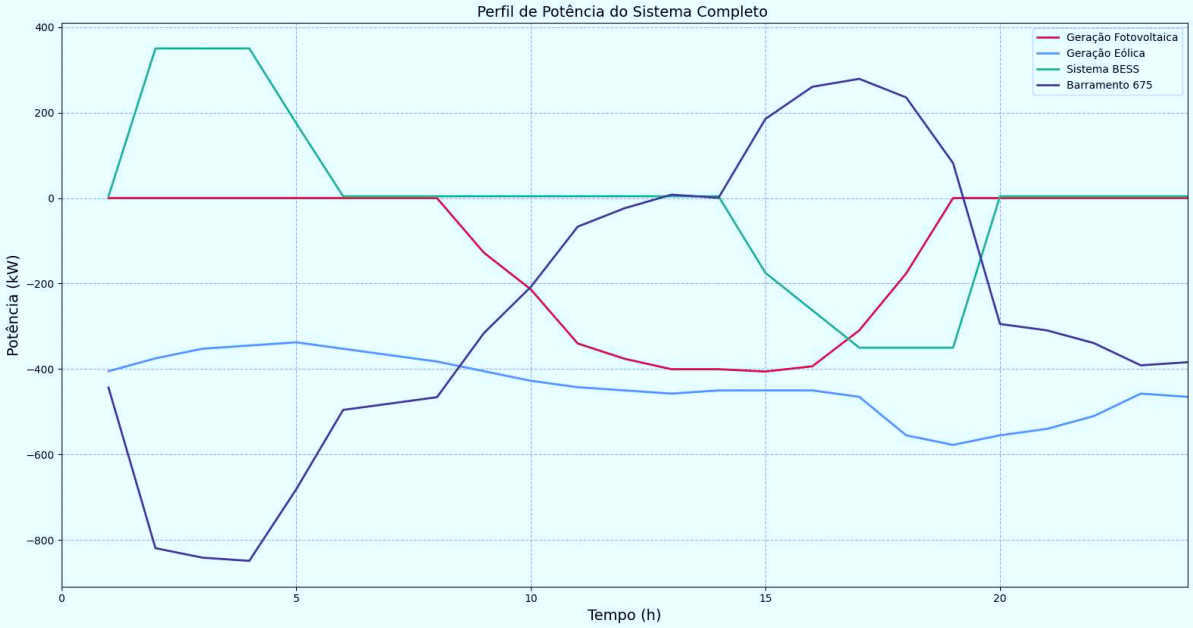
Tabela 3 – Principais Resultados da Simulação do Cenário 1

Parâmetro Analisado	**Valor**	**Unidade**
Potência Total do Circuito	3465,3	kW
Potência Ativa Suprida (Subestação)	3090,3	kW
Potência Reativa Suprida (Subestação)	1407,9	kvar
Geração Eólica (Ativa)	465,0	kW
Geração Fotovoltaica	0,0	kW
Potência do BESS	4,2	kW
Perdas Ativas Totais	85,7 (2,47%)	kW
Perdas Reativas Totais	261,4	kvar
Perdas nas Linhas	78,5	kW
Perdas nos Transformadores	7,2	kW
Tensão Mínima	0,9743	p.u.
Tensão Máxima	1,0711	p.u.

Fonte: Autoria Própria

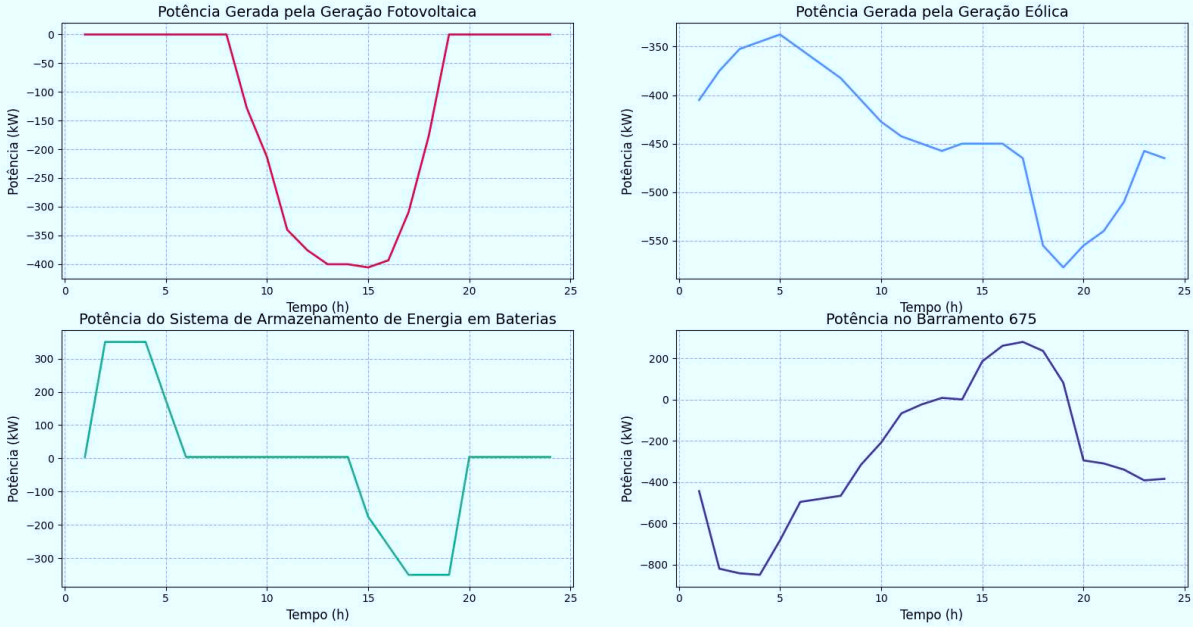
É válido o destaque também para os locais que o sistema observou valores típicos de tensão, em que foi no barramento 611 que houve a tensão mínima (**0,9743 pu**), e a tensão máxima, que foi observada no transformador da geração eólica (**1,0711 pu**)

Figura 7 – Perfil de Potência de todo o sistema



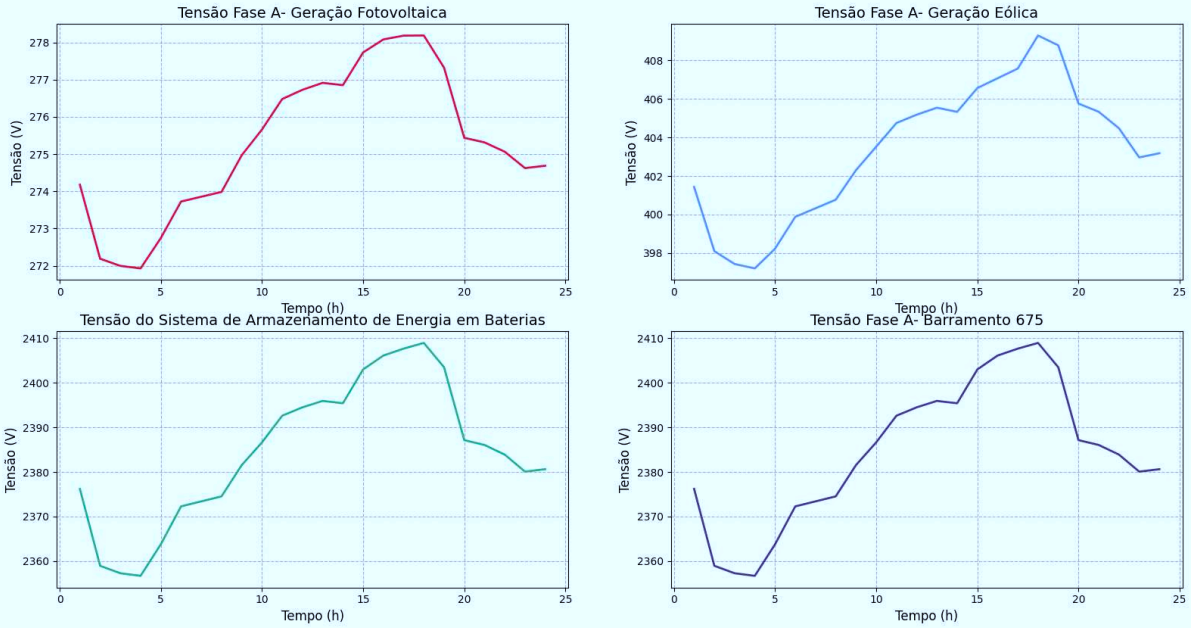
Fonte: Autoria Própria

Figura 8 – Perfil de Potência do Sistema



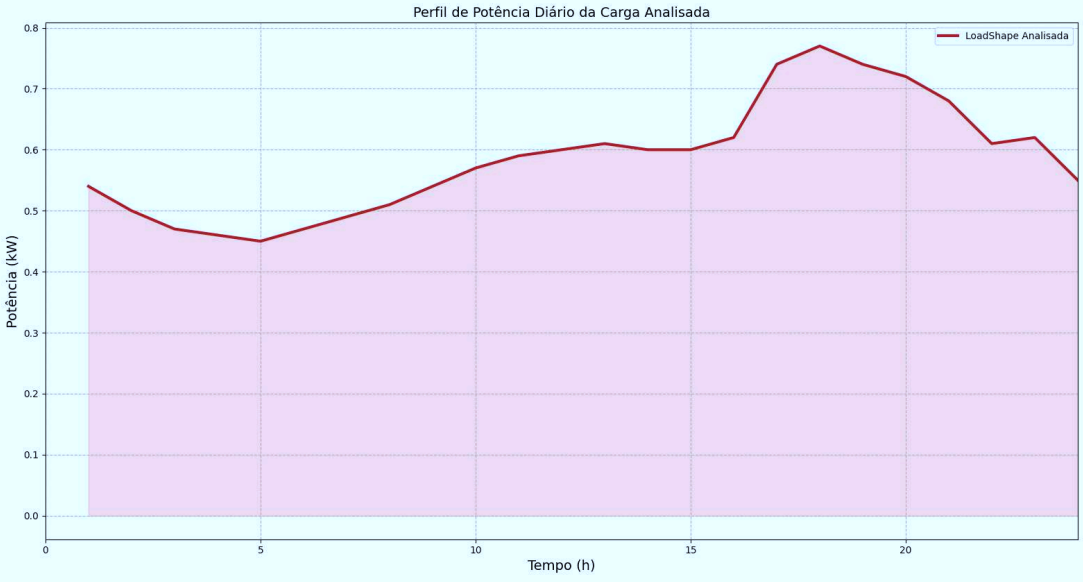
Fonte: Autoria Própria

Figura 9 – Perfil de Tensão do Sistema



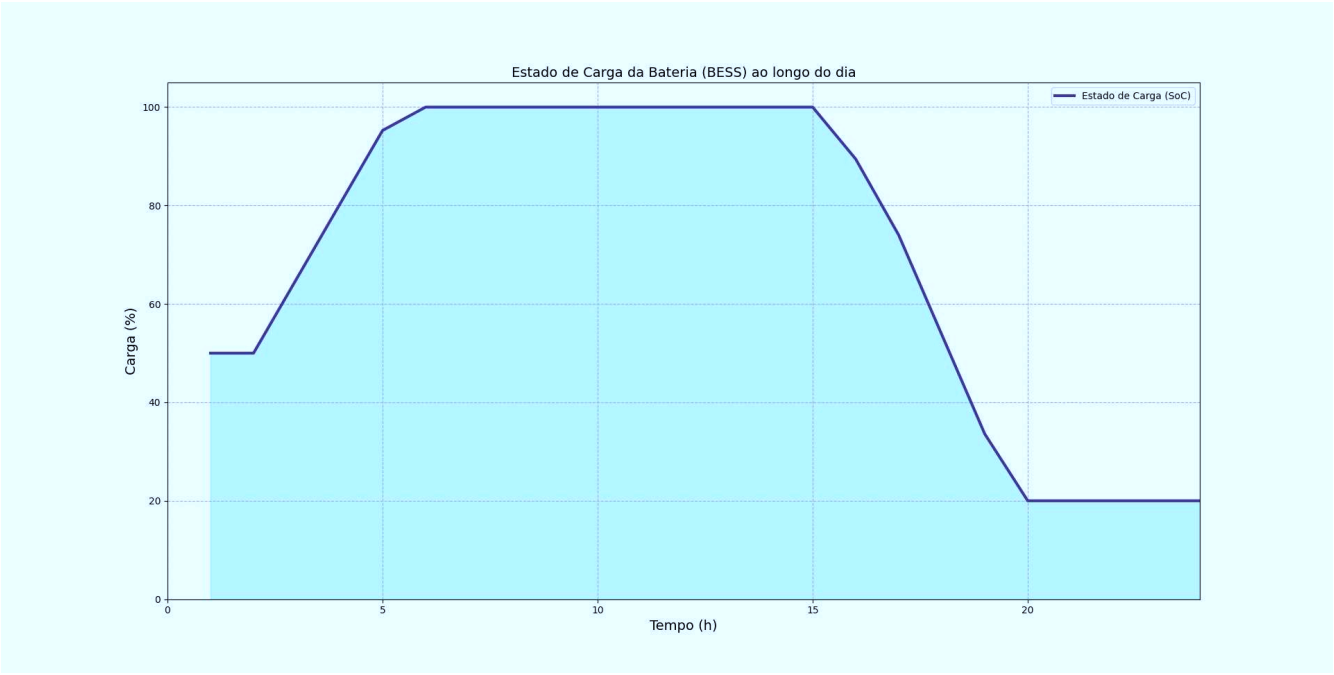
Fonte: Autoria Própria

Figura 10 – Curva de Carga Diária (*Loadshape*) simulada



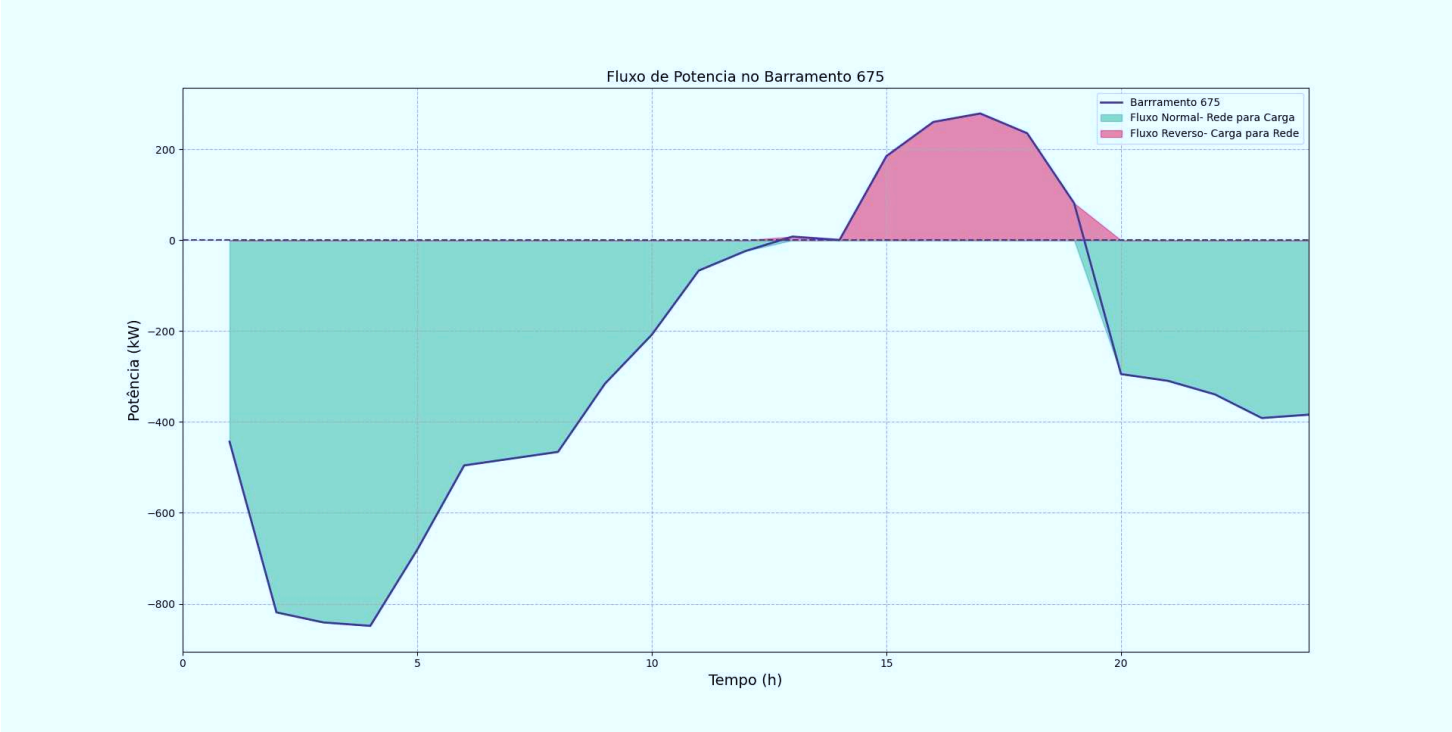
Fonte: Autoria Própria

Figura 11 – Estado de Carga (SoC) do Sistema BESS ao longo do dia



Fonte: Autoria Própria

Figura 12 – Fluxo de Potência- Barramento 675

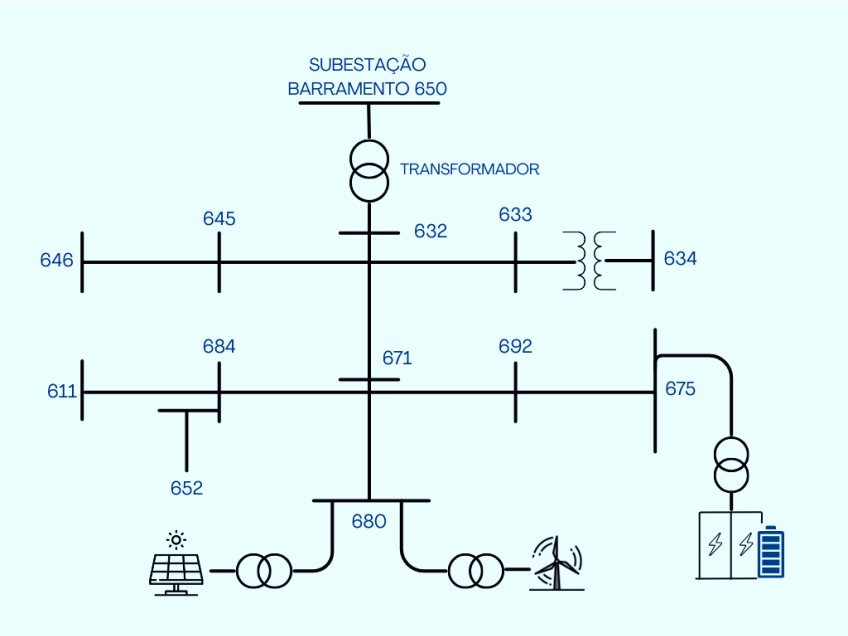


Fonte: Autoria Própria

3.4.2 Resultados da Simulação do Cenário 2

Neste outro cenário de simulação, definiu-se que oa geração fotovoltaica e eólica fossem conectadas ao barramento 680, e o sistema de armazenamento no barramento 675, como mostra a figura [13]

Figura 13 – Circuito para Análise da Simulação 2



Fonte: Autoria Própria

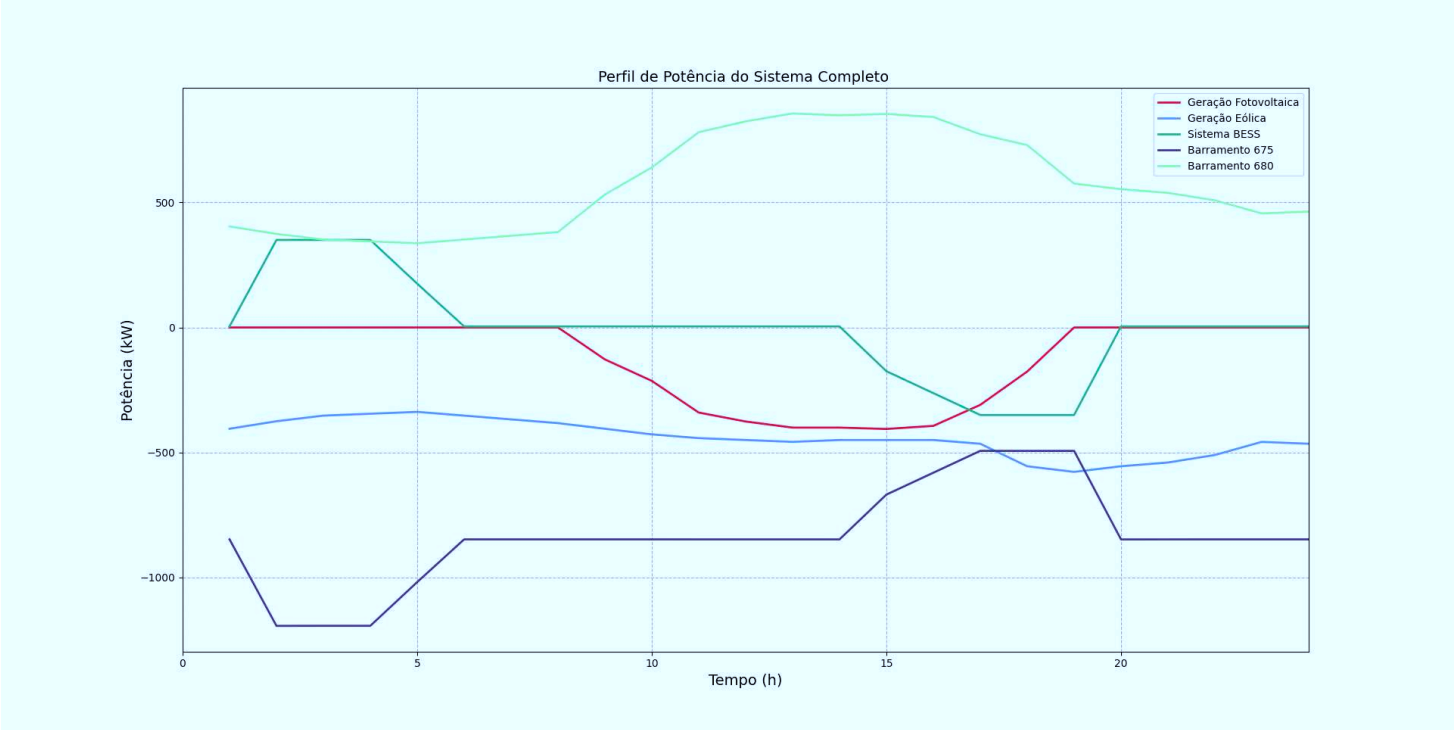
Tabela 4 – Principais Resultados da Simulação do Cenário 2

Parâmetro Analisado	**Valor**	**Unidade**
Potência Total do Circuito	3465,0	kW
Potência Ativa Suprida (Subestação)	3092,0	kW
Potência Reativa Suprida (Subestação)	1413,4	kvar
Geração Eólica (Ativa)	465,0	kW
Geração Fotovoltaica	0,0	kW
Potência do BESS	4,2	kW
Perdas Ativas Totais	87,7 (2,53%)	kW
Perdas Reativas Totais	264,8	kvar
Perdas nas Linhas	80,6	kW
Perdas nos Transformadores	7,2	kW
Tensão Mínima	0,9741	p.u.
Tensão Máxima	1,0691	p.u.

Fonte: Autoria Própria

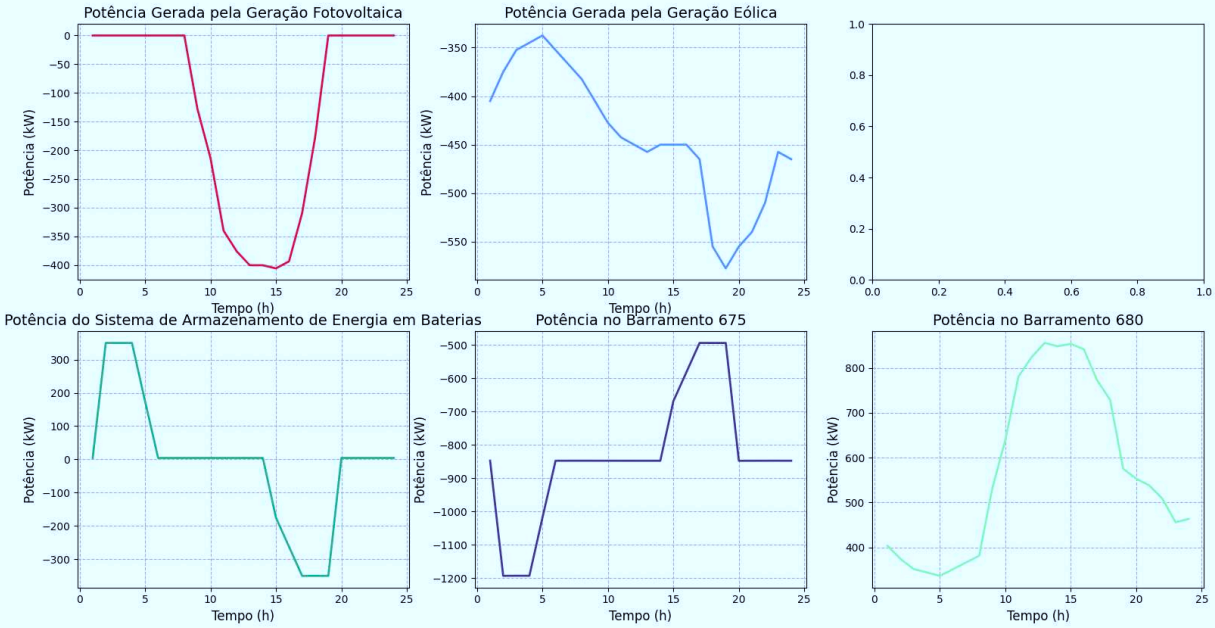
A tensão mínima foi observada também no barramento 611 (**0,9741 pu**), assim como a tensão máxima, que foi observada no transformador da geração eólica (**1,0691 pu**), como comprovado na tabela [4].

Figura 14 – Perfil de Potência de todo o sistema



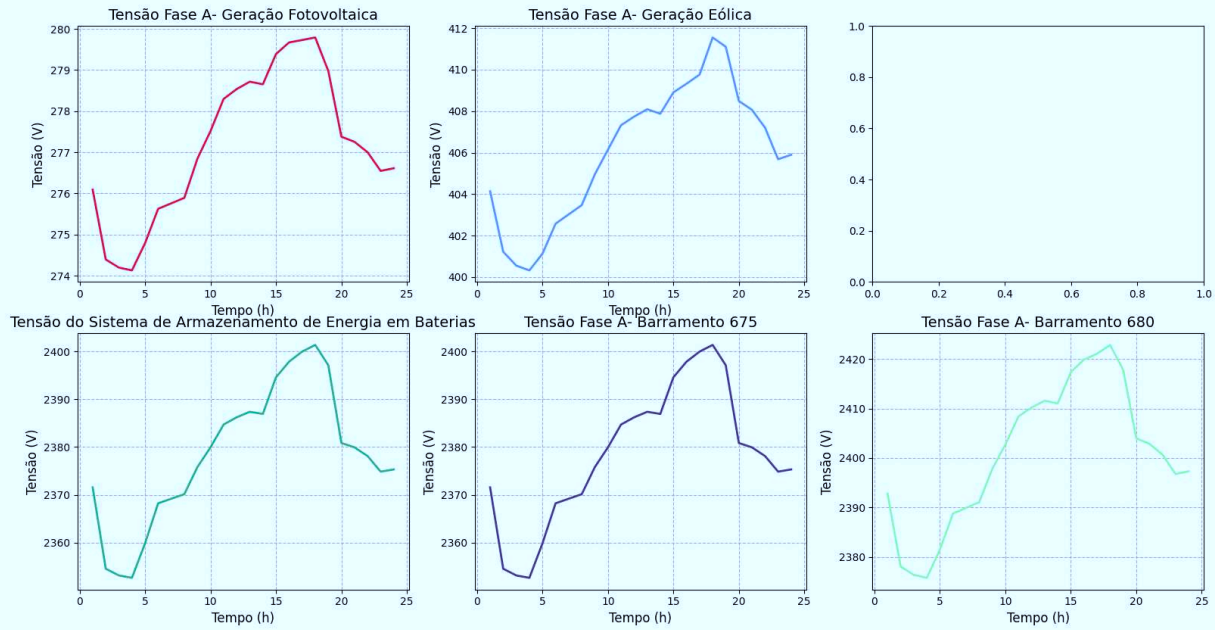
Fonte: Autoria Própria

Figura 15 – Perfil de Potência do Sistema



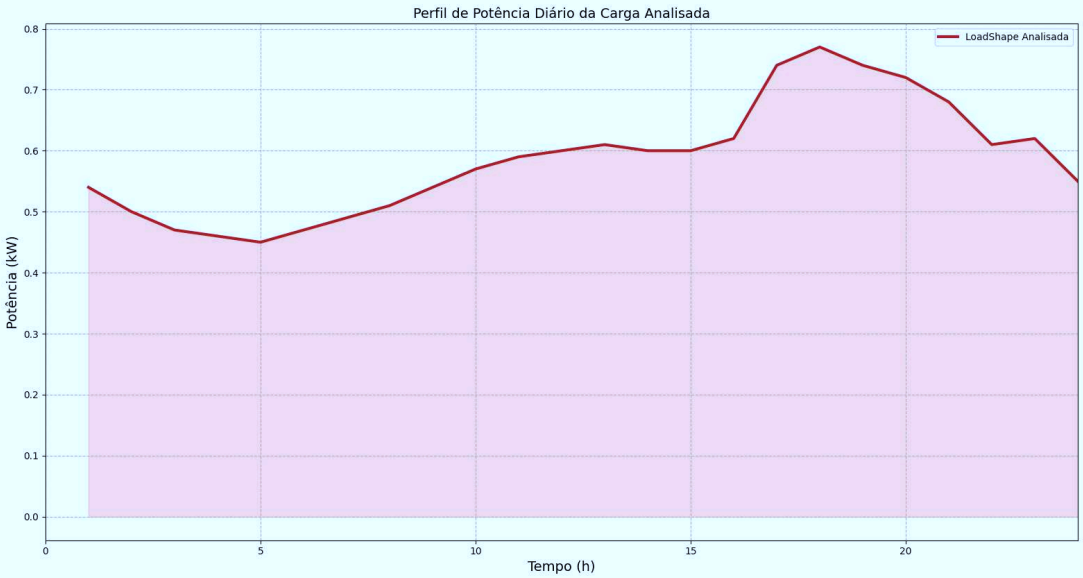
Fonte: Autoria Própria

Figura 16 – Perfil de Tensão do Sistema



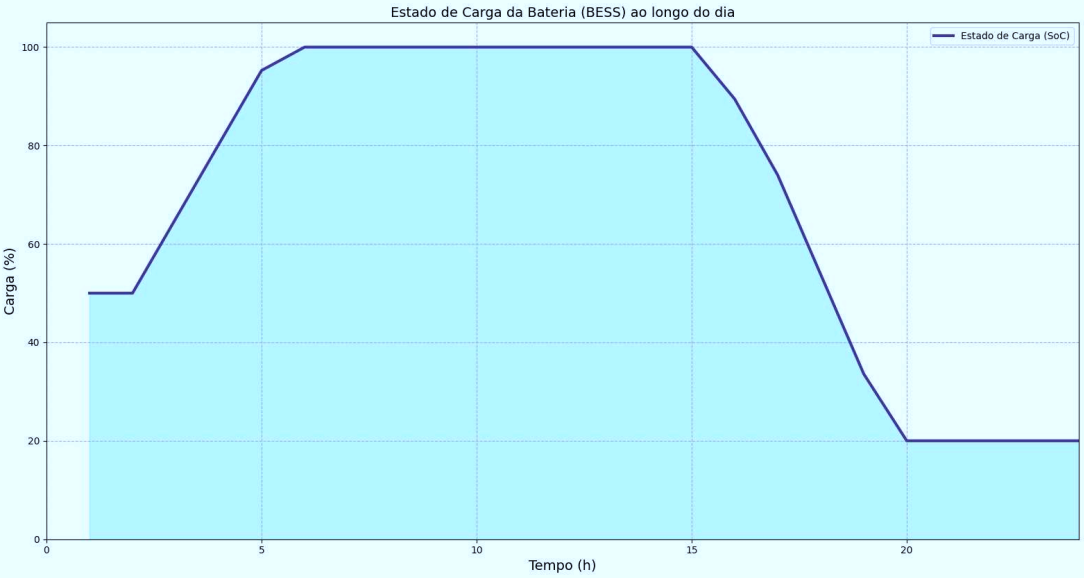
Fonte: Autoria Própria

Figura 17 – Curva de Carga Diária (*Loadshape*) simulada



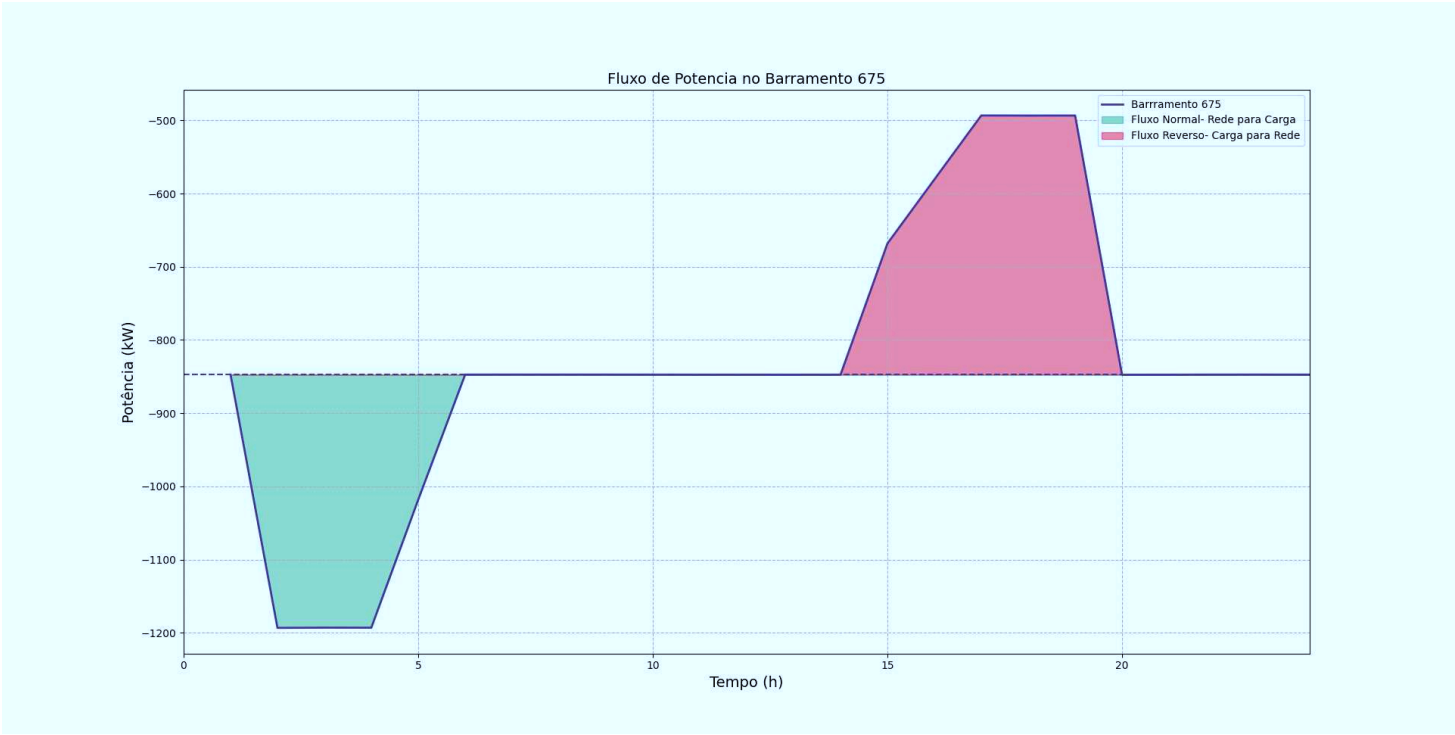
Fonte: Autoria Própria

Figura 18 – Estado de Carga (SoC) do Sistema BESS ao longo do dia



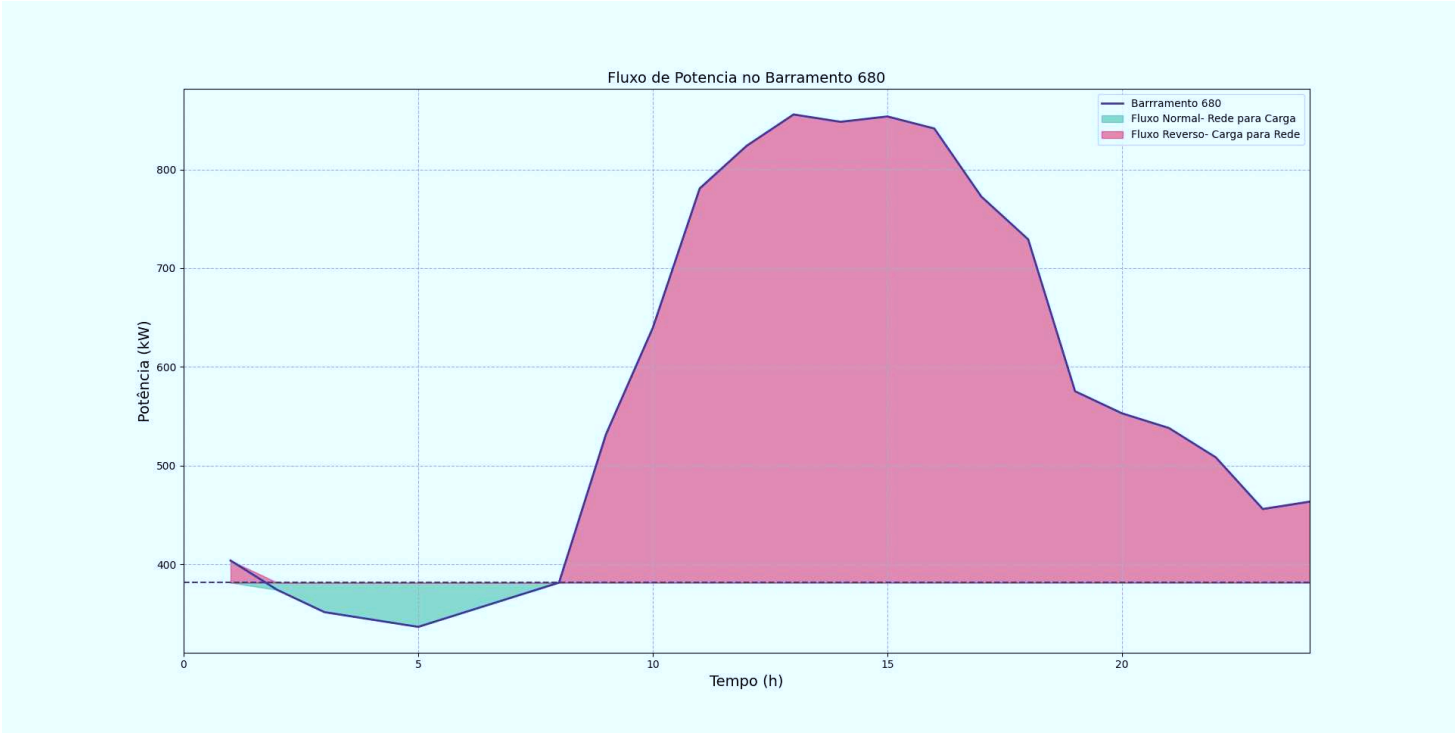
Fonte: Autoria Própria

Figura 19 – Fluxo de Potência- Barramento 675



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Fluxo de Potência- Barramento 680

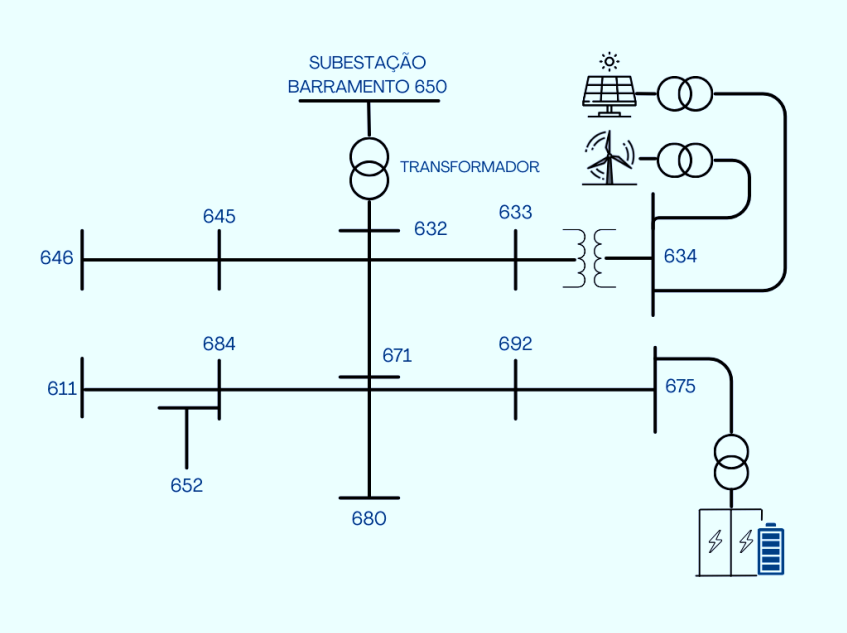


Fonte: Autoria Própria

3.4.3 Resultados da Simulação do Cenário 3

Por fim, o terceiro cenário de simulação foi feito com o objetivo de distanciar ainda mais a geração renovável do sistema de armazenamento, localizando a GD no barramento 634 e o BESS no barramento 675, configuração que é representada pela figura [21]

Figura 21 – Circuito para Análise da Simulação 3



Fonte: Autoria Própria

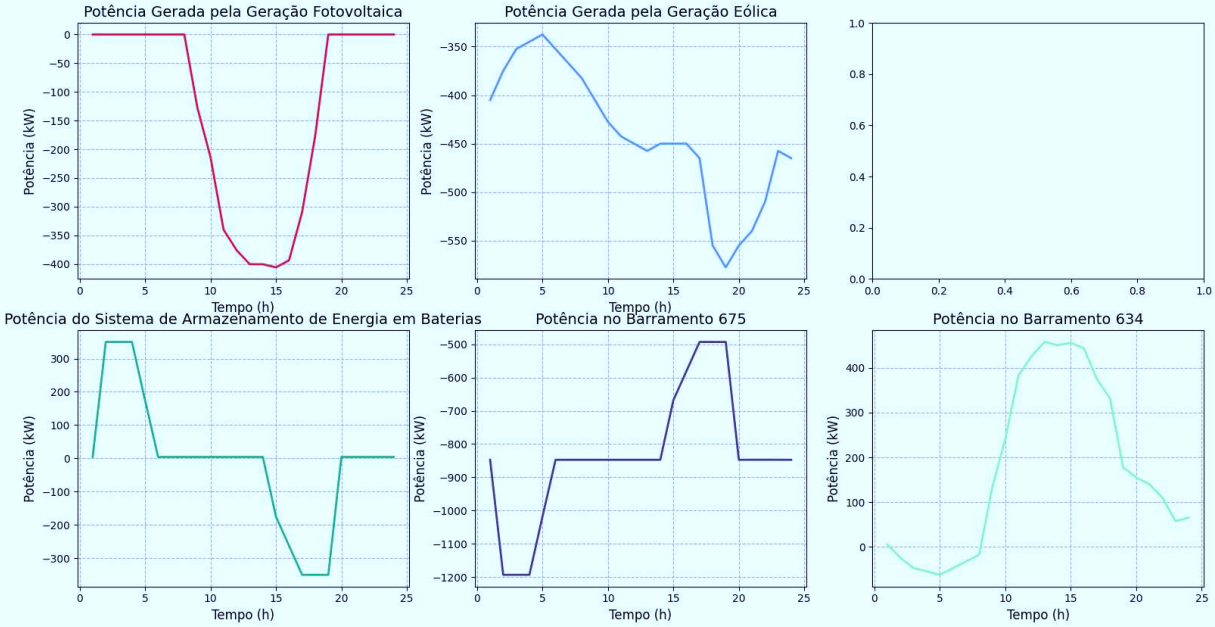
Tabela 5 – Principais Resultados da Simulação do Cenário 3

Parâmetro Analisado	**Valor**	**Unidade**
Potência Total do Circuito	3461,1	kW
Potência Ativa Suprida (Subestação)	3090,6	kW
Potência Reativa Suprida (Subestação)	1419,4	kvar
Geração Eólica (Ativa)	465,0	kW
Geração Fotovoltaica	0,0	kW
Potência do BESS	4,3	kW
Perdas Ativas Totais	90,2 (2,61%)	kW
Perdas Reativas Totais	265,9	kvar
Perdas nas Linhas	89,9	kW
Perdas nos Transformadores	0,3	kW
Tensão Mínima	0,9676	p.u.
Tensão Máxima	1,0561	p.u.

Fonte: Autoria Própria

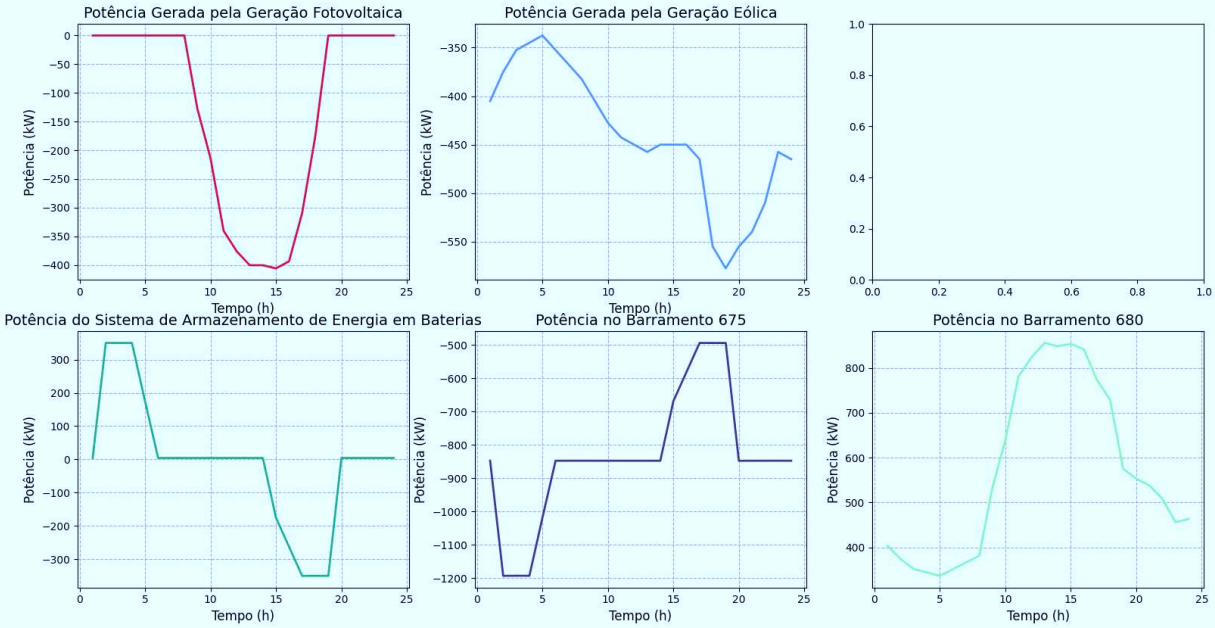
A tabela[5] mostra simulação do terceiro cenários ficou um pouco distindo, uma vez que observou-se a tensão mínima no barramento 611 (**0,9676 pu**), mas a tensão máxima foi observada no regulador de tensão RG60 (**1,0561 pu**).

Figura 22 – Perfil de Potência de todo o sistema



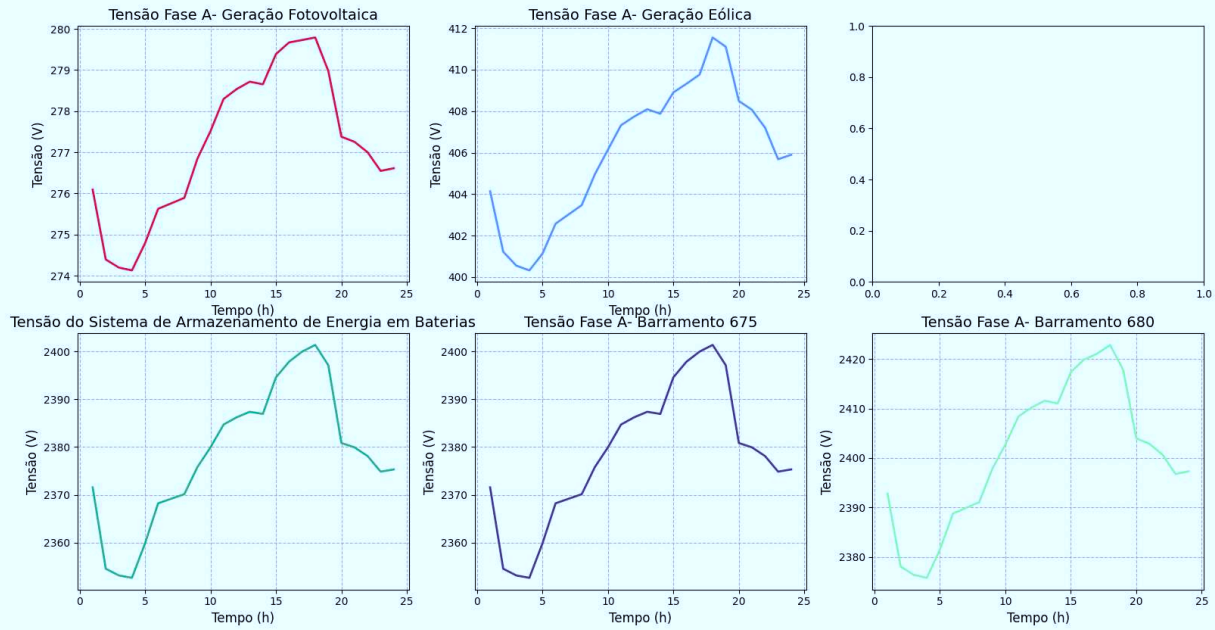
Fonte: Autoria Própria

Figura 23 – Perfil de Potência do Sistema



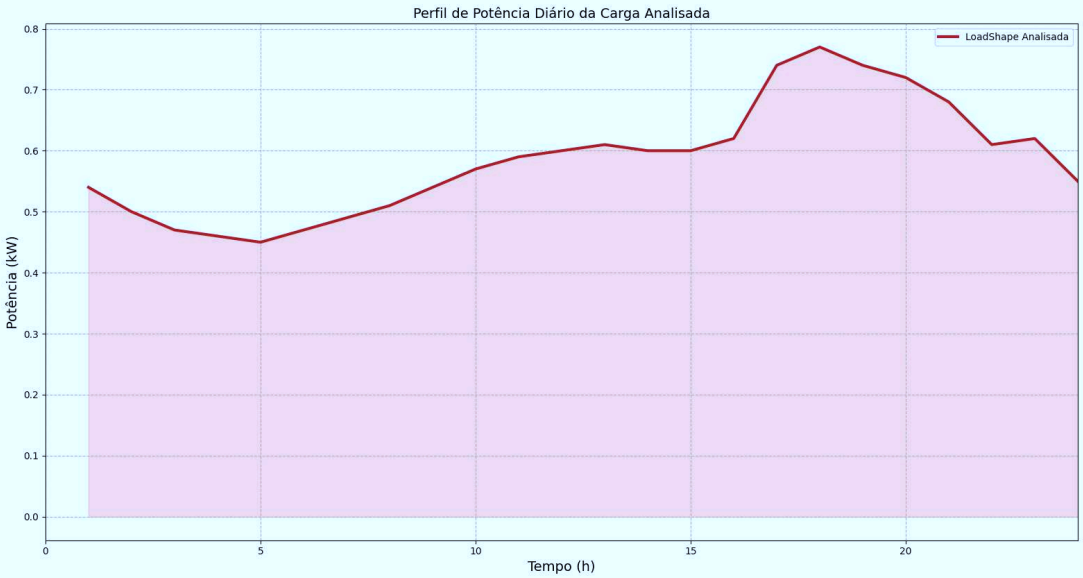
Fonte: Autoria Própria

Figura 24 – Perfil de Tensão do Sistema



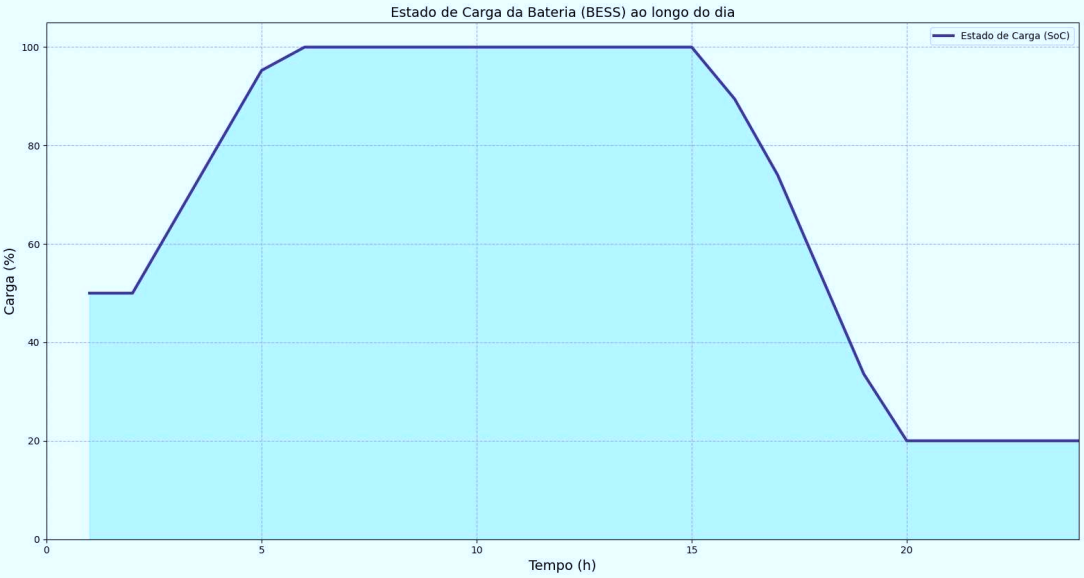
Fonte: Autoria Própria

Figura 25 – Curva de Carga Diária (*Loadshape*) simulada



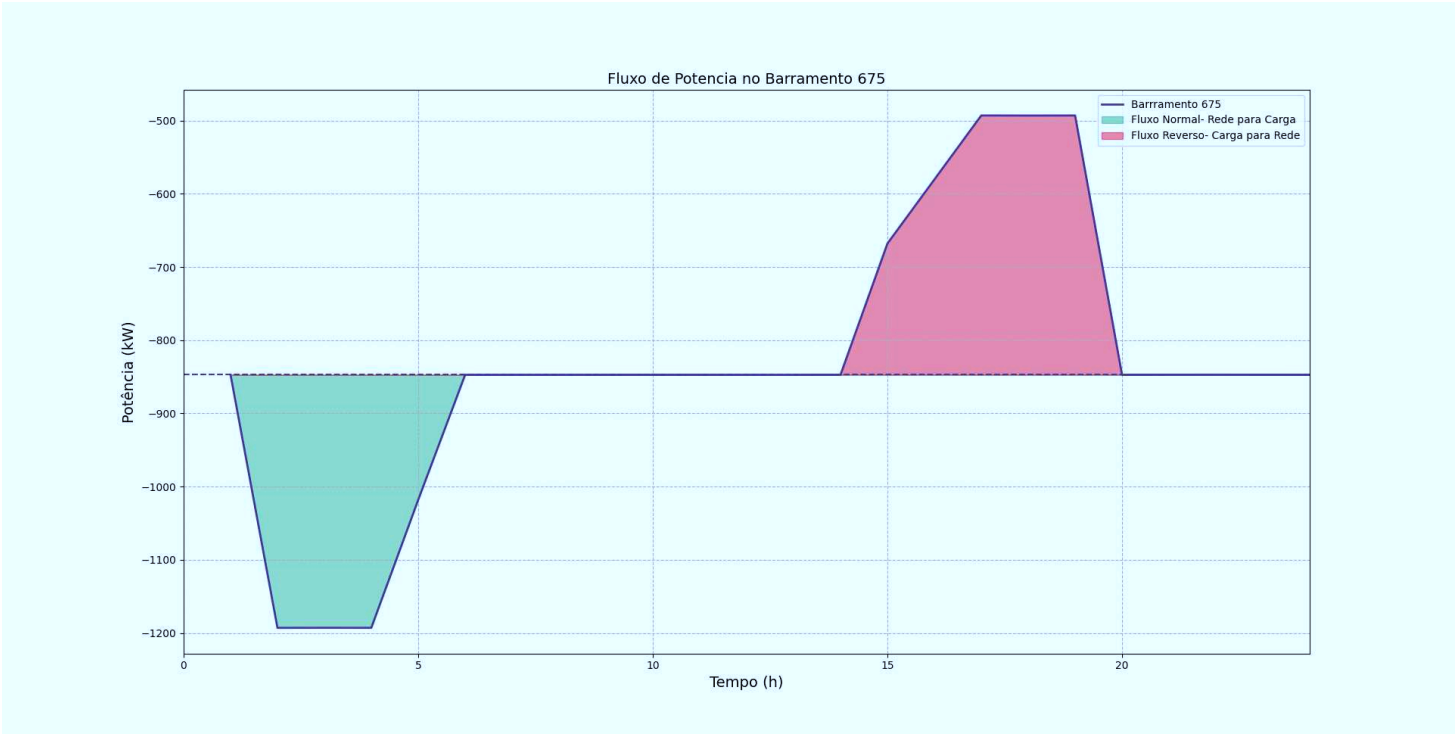
Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Estado de Carga (SoC) do Sistema BESS ao longo do dia



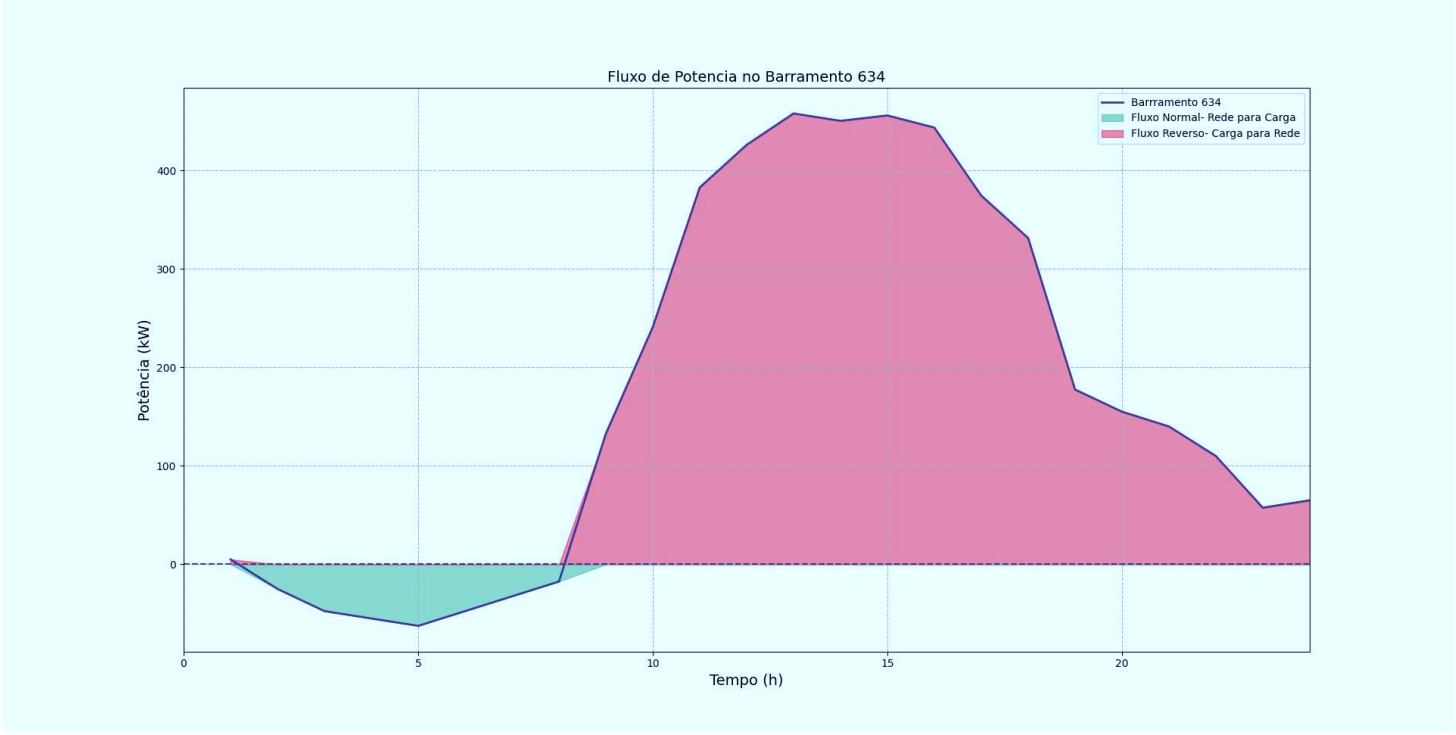
Fonte: Autoria Própria

Figura 27 – Fluxo de Potência- Barramento 675



Fonte: Autoria Própria

Figura 28 – Fluxo de Potência- Barramento 634



Fonte: Autoria Própria

3.5 Avaliação dos Resultados Obtidos

Para a realização dos resultados obtidos nas simulações realizadas, abaixo tem-se todos os principais dados, organizados em forma de tabela e divididos de acordo com o cenário que foi simulado:

Tabela 6 – Comparativo dos Resultados entre os Cenários Analisados

Parâmetro Analisado	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**
Demanda Total do Circuito (kW)	3465,3	3465,0	3461,1
Pot. Ativa da Subestação (kW)	3090,3	3092,0	3090,6
Pot. Reativa da Subestação (kvar)	1407,9	1413,4	1419,4
Potência do BESS (kW)	4,2	4,2	4,3
Perdas Ativas Totais (kW)	85,7	87,7	90,2
Perdas Ativas Percentuais (%)	2,47%	2,53%	2,61%
Perdas nas Linhas (kW)	78,5	80,6	89,9
Perdas nos Transformadores (kW)	7,2	7,2	0,3
Tensão Mínima (p.u.)	0,9743	0,9741	0,9676
Tensão Máxima (p.u.)	1,0711	1,0691	1,0561

Fonte: Autoria Própria

Ao observar os dados obtidos através das simulações, nota-se impactos significativos no comportamento da rede de distribuição, relacionados principalmente pela alteração entre a distância da alocação do barramento referente as unidades de geração distribuída da rede e o sistema de armazenamento de energia por baterias, algo que era o objetivo do presente estudo. Assim, é válido o destaque de alguns pontos, como:

3.6 Impactos nas Perdas Totais do Sistema

Em primeiro lugar, fazendo-se uma análise acerca das perdas técnicas totais do sistema, e observando graficamente o perfil de potência através das figuras [7] [14] [22], observou-se a seguinte situação:

- **Cenário 1:** As perdas totais apresentaram o menor valor, totalizando 2,47%;
- **Cenário 2:** As perdas aumentaram de 2,47% para 2,53%;
- **Cenário 3:** As perdas tiveram o seu maior valor, aumentando e chegando até 2,61%.

Neste contexto, o cenário de simulação 1 apresenta o menor número de perdas, uma vez que é o cenário em que GD e BESS estão alocados no mesmo barramento, o que faz com que o trânsito de potência percorra um menor caminho, diminuindo assim as perdas durante o processo de transmissão. Por outro lado, a maior porcentagem de perdas encontra-se justamente na terceira simulação, que é justamente o esperado, uma vez que ela vai representar o esforço maior da rede em transportar aquela energia para as baterias, que estão mais distantes, aumentando assim as perdas durante a transmissão.

3.7 Comportamento do Perfil de Tensão

Por outro lado, fica-se evidente também o impacto das alterações de cenário de simulação no perfil de tensão observado no sistema elétrico, principalmente ao observar as curvas mostradas nas figuras [9], [17], [25], de modo que o distanciamento entre a geração e o armazenamento também penalizou a qualidade da tensão entregue às barras mais remotas do sistema. No Cenário 1, a atuação local conjunta do BESS e da GD ajudou a sustentar a tensão mínima do sistema no range de 0,9743 p.u. Em contrapartida, no Cenário 3, o aumento da queda de tensão ($Z \cdot I$) provocada pelo maior fluxo de potência nas linhas fez com que a tensão mínima na mesma barra 611 sofresse uma degradação, atingindo o valor de 0,9676 p.u., aproximando-se dos limites regulatórios inferiores. Adicionalmente, observou-se uma alteração no ponto de máxima tensão do sistema. Nos Cenários 1 e 2, a injeção expressiva de potência ativa da eólica elevou a tensão no próprio transformador de acoplamento (chegando a 1,0711 p.u. no Cenário 1). No Cenário 3, com a GD distante, o ponto de maior tensão voltou a ser ditado pelo regulador principal da subestação (RG60), com 1,0561 p.u. Essa análise pode ser mais evidenciada ao observar e comparar os dados relatados na tabela [6], que contempla os principais parâmetros e grandezas do sistema analisado, a depender das condições que eles estava submetido, que era o foco do presente estudo.

4 Considerações Finais

O presente documento consolida as atividades e os resultados obtidos durante o estágio supervisionado realizado no Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM). O programa proporcionou um foco no estudo de tecnologias de Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS), permitindo a realização de estudos de impacto reais atrelados à alocação desses equipamentos no sistema elétrico. Todas as atividades propostas foram executadas com êxito, englobando desde a modelagem computacional até a atuação prática no laboratório.

Como principal conclusão extraída das simulações realizadas no software OpenDSS, conclui-se algo que era esperado, que é o fato de que a alocação ótima do sistema de armazenamento, sob a ótica da eficiência energética e estabilidade de tensão, é aquela mais próxima possível da fonte de geração distribuída intermitente. A configuração do Cenário 1 prova que a integração espacial (BESS + GD) otimiza o autoconsumo ou o armazenamento local, atenua o carregamento das linhas de distribuição, minimiza as perdas sistêmicas e oferece o melhor suporte de tensão para a rede elétrica.

Em suma, o projeto comprova a importância de um planeamento elétrico rigoroso para a inserção de novas tecnologias em redes de distribuição. A modelagem desenvolvida provou ser uma ferramenta robusta para auxiliar na tomada de decisão sobre onde conectar sistemas de armazenamento.

Além disso, o presente trabalho também permitiu a integração e uma imersão em conhecimentos observados durante a graduação de Engeharia Elétrica, como o estudo e a análise de Sistemas Elétricos de Potência, tanto de transmissão, quanto de distribuição, além da modelagem de sistemas de geração e armazenamento de energia. A aplicação desses conceitos, principalmente relacionada a Pesquisa e Desenvolvimento permitiu consolidar conceitos e desenvolver ainda mais uma abordagem mais crítica voltada para para a solução de problemas de sistemas elétricos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão deste modelo computacional para englobar simulações de fluxo de carga ao longo de períodos mais extensos (simulações anuais), de modo a capturar a sazonalidade e a variabilidade climática das fontes eólica e fotovoltaica. Além disso, a implementação de simulações com dados reais das principais distribuidoras do país é de grande valia, uma vez que ela permite uma noção mais real acerca da infraestrutura das redes e dos possíveis problemas e desafios que ela pode apresentar com a inserção desses novos sistemas.

Referências

CASTRO, N. de et al. **Relevância estratégica dos sistemas de armazenamento de energia hídrica**. 2025. Broadcast Energia. Acessado em: 10/09/2025. Disponível em: <https://energia.aebroadcast.com.br/tabs/news/747/53484388>.

Electric Power Research Institute (EPRI). **Introduction to OpenDSS**. 2026. OpenDSS Documentation. Acessado em: 17/03/2026. Disponível em: <https://opendss.epri.com/IntroductiontoOpenDSS.html>.

Enel Group. **Battery Energy Storage Systems (BESS)**. Enel Learning Hub. Acessado em: 17/03/2026. Disponível em: <https://www.enel.com/learning-hub/storage/bess>.

KERSTING, W. H. **Radial distribution test feeders**. In: IEEE. **2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings**. [S.l.], 2001. v. 2, p. 908–912.

TORRES, P. F. et al. **Energy Storage as a Transmission Asset—Assessing the Multiple Uses of a Utility-Scale Battery Energy Storage System in Brazil**. **Energies**, MDPI, v. 18, n. 4, p. 902, 2025.

WALLACH, O. **The Solar Power Duck Curve Explained**. 2022. Elements by Visual Capitalist. Acedido em: 17/03/2026. Disponível em: <https://elements.visualcapitalist.com/the-solar-power-duck-curve-explained/>.

YU, Z. et al. **Review of Battery Energy Storage Systems: Challenges, Strategies and Applications**. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 17, n. 1, 2025. Publicado a 20 de março de 2025.