



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS JOSÉ BRANCO DE LIMA

**Integração de um Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) em
uma Planta de Geração Híbrida: Estudo de Caso em Casa Nova – BA**

Recife
2025

LUCAS JOSÉ BRANCO DE LIMA

**Integração de um Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS)
em uma Planta de Geração Híbrida: Estudo de Caso em Casa Nova – BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador(a): Dr. Sérgio Pinheiro dos Santos

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima, Lucas José Branco de.

Integração de um Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS)
em uma Planta de Geração Híbrida: Estudo de Caso em Casa Nova - BA / Lucas
José Branco de Lima. - Recife, 2025.

101 p. : il., tab.

Orientador(a): Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador(a): Sérgio Pinheiro dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. BESS. 2. Sistema de Geração Híbrida. 3. Integração de Energias
Renováveis. 4. Estudos Elétricos. I. Simoni, Vicente Ribeiro. (Orientação). II.
Santos, Sérgio Pinheiro dos. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUCAS JOSÉ BRANCO DE LIMA

**Integração de um Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS)
em uma Planta de Geração Híbrida: Estudo de Caso em Casa Nova – BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 17/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Sérgio Pinheiro dos Santos (Coorientador)
AXIA Energia

Prof. Dr. Alex Ferreira Falcão Moreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. Dr. Pablo Luiz Tabosa da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa a conclusão de uma etapa importante da minha formação acadêmica e profissional, construída com o apoio de diversas pessoas e instituições, às quais registro aqui meus sinceros agradecimentos.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Vicente Simoni e Dr. Sergio Santos, expresso minha gratidão pela orientação técnica, pelos ensinamentos transmitidos e pela disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Suas contribuições foram fundamentais para o amadurecimento acadêmico e profissional alcançado durante a elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos meus supervisores de estágio, Túlio Trajano e Ricardo Tiba, agradeço pelo apoio, incentivo e confiança, especialmente durante a proposta e a viabilização da integração deste Trabalho de Conclusão de Curso às atividades desenvolvidas no estágio, tornando esta experiência ainda mais enriquecedora do ponto de vista técnico e profissional.

À AXIA Energia e a todos os parceiros envolvidos no projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), agradeço pela oportunidade de aprendizado prático, pelo ambiente colaborativo e pelo suporte técnico que contribuíram diretamente para a construção deste trabalho.

Aos colegas de estágio, agradeço pela convivência, pelas trocas de conhecimento e pelo companheirismo ao longo desse período, fatores que tornaram o processo mais produtivo e enriquecedor.

À minha família, registro meu profundo agradecimento. À minha mãe, Lúcia, e ao meu pai, Everaldo, pelo apoio constante, incentivo e compreensão ao longo de toda a trajetória acadêmica. Aos meus irmãos Renato, Renata, Rayane e Elloyse, agradeço o carinho, incentivo e apoio em todos os momentos.

Um agradecimento especial ao meu irmão gêmeo e melhor amigo, Gabriel, pela parceria, apoio incondicional e presença constante ao longo de toda esta jornada, compartilhando desafios, aprendizados e conquistas.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa significativa da minha formação acadêmica.

*“Para mim, é muito melhor compreender o universo
como ele é, do que persistir no engano, por mais
tranquilizador que possa ser”.*

Carl Sagan

RESUMO

A expansão global das fontes de energia renovável, especialmente eólica e solar, impõe desafios à operação do sistema elétrico devido à variabilidade intrínseca desses recursos, que afeta a estabilidade e a previsibilidade da geração. A hibridização de usinas, associada a Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS), apresenta-se como uma solução promissora para mitigar essas oscilações e aprimorar a integração de recursos energéticos distribuídos. Este trabalho desenvolve uma análise técnica da inserção de um BESS em uma planta de geração híbrida, tomando como estudo de caso o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Eletrobras Chesf, implementado no Complexo Eólico de Casa Nova (BA). A metodologia adotada compreende a elaboração de uma base teórica referente aos modelos de fluxo de potência e cálculo de faltas, seguida da construção da modelagem computacional da planta híbrida. Foram realizadas simulações em regime permanente nos programas computacionais ANAREDE e ANAFAS, com o objetivo de avaliar os impactos elétricos da conexão do empreendimento não apenas no Ponto de Acoplamento Comum (SE Sobradinho 230 kV), mas também na Subestação Casa Nova II, na Subestação da Planta Híbrida e nos principais componentes adjacentes ao BESS. Analisaram-se cenários com e sem a presença do sistema de armazenamento, permitindo identificar os efeitos do BESS sobre perfis de tensão, fluxos de potência e níveis de curto-circuito. Os resultados obtidos demonstram que o BESS atua predominantemente como elemento de suporte local na baixa tensão, contribuindo para ajustes de tensão e de fluxos de potência, sem promover alterações estruturais ou impactos relevantes no regime de operação das redes de média e alta tensão.

Palavras-chave: BESS; Sistema de Geração Híbrida; Integração de Energias Renováveis; Estudos Elétricos.

ABSTRACT

The global expansion of renewable energy sources, particularly wind and solar, has introduced operational challenges for power systems due to the intrinsic variability of these resources, which affects generation stability and forecasting accuracy. Hybrid power plants combined with Battery Energy Storage Systems (BESS) have emerged as a promising technological solution to mitigate such fluctuations and enhance the integration of distributed energy resources. This study presents a technical analysis of BESS integration into a hybrid generation plant, using as a case study the Research & Development (R&D) project developed by Eletrobras Chesf at the Casa Nova Wind Complex (Brazil). The methodology comprises the development of a theoretical foundation on power flow modeling and fault analysis, followed by the construction of a detailed computational model of the hybrid plant. Steady-state simulations were performed using the ANAREDE and ANAFAS software tools to assess the electrical impacts of the plant's interconnection not only at the Point of Common Coupling (Sobradinho 230 kV Substation) but also at the Casa Nova II Substation, the Hybrid Plant Substation, and the main components adjacent to the BESS. Scenarios with and without the storage system were analyzed to identify its effects on voltage profiles, power flows, and short-circuit levels. The results indicate that the BESS operates predominantly as a local support element at the low-voltage level, contributing to voltage regulation and power flow adjustments, without causing structural changes or relevant impacts on the operating regime of the medium- and high-voltage grid.

Keywords: BESS; Hybrid Generation System; Renewable Energy Integration; Electrical Power Studies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição geográfica das perdas por Constrained-off (GWh) no Brasil (Out/2021-Out/2025).	18
Figura 2 - Tipologias de combinações de usinas.	22
Figura 3 - Componentes do BESS.	25
Figura 4 - Diagrama funcional completo de um BESS	26
Figura 5 - Modelo equivalente π de uma linha de transmissão	30
Figura 6 - Modelagem de um transformador em fase	31
Figura 7 - Curva P–Q de operação em quatro quadrantes do BESS.	35
Figura 8 - Representação simplificada dos princípios de controle: (a) conversor Grid-Following (GFL); (b) conversor Grid-Forming (GFM).	36
Figura 9 - Localização geográfica e arranjo elétrico da região de Casa Nova – BA..	38
Figura 10 - Vista aérea da planta híbrida da Chesf em Casa Nova – BA.....	39
Figura 11 - Diagrama unifilar simplificado do sistema Casa Nova (230 kV – 34,5 kV)	40
Figura 12 - Modelagem elétrica do Parque Eólico Casa Nova A e da Planta Híbrida (BESS + FV + Aerogerador 18 + Carga RLC).....	41
Figura 13 - Curva PQ de Operação dos Inversores FV e Faixa Exigida pelo ONS...	45
Figura 14 - Curva P–Q do Aerogerador IMPSA IV-82 / 1,5 MW.....	47
Figura 15 - Curva PQ de Operação do Aerogerador IMPSA IV-82 e Faixa Exigida pelo ONS.....	48
Figura 16 - Distribuição geral dos componentes do BESS de Casa Nova	49
Figura 17 - Curva PQ de operação do PCS do BESS em Casa Nova	50
Figura 18 - BESS – Perfil médio horário (Cenário 1 – 30 dias representativos).....	51
Figura 19 - Componentes da Planta Híbrida – Perfil médio horário (Cenário 1 – 30 dias representativos)	52
Figura 20 - Comparação de potência média (Cenário 1 – 30 dias representativos)..	52
Figura 21 - BESS – Perfil médio horário (Cenário 2 – 60 dias representativos).....	53
Figura 22 - Componentes da Planta Híbrida – Perfil médio horário (Cenário 2 – 60 dias representativos)	53
Figura 23 - Comparação de potência média (Cenário 2 – 60 dias representativos)..	54
Figura 24 - BESS – Perfil médio horário (Cenário 3 – 100 dias representativos).....	55

Figura 25 - Componentes da Planta Híbrida – Perfil médio horário (Cenário 3 – 100 dias representativos)	55
Figura 26 - Comparação de potência média (Cenário 3 – 100 dias representativos)	56
Figura 27 - Conjunto de cartões do ANAREDE utilizados na modelagem do BESS	84
Figura 28 - Conjunto de cartões do ANAFAS utilizados na modelagem do BESS	85
Figura 29 - Cartão ANAREDE para modelagem dos transformadores da SE Híbrida	87
Figura 30 - Cartão ANAFAS para modelagem dos transformadores da SE Híbrida	87
Figura 31 - Modelagem individualizada da carga RLC no ANAREDE	88
Figura 32 - Modelagem agregada da carga RLC no ANAREDE	89
Figura 33 - Configuração para o tipo de circuito no cartão DCIR do ANAFAS	90
Figura 34 - Modelagem da carga RLC no ANAFAS	92
Figura 35 - Diagrama, Caso 1. Condição Operativa sem o BESS	93
Figura 36 – Diagrama Caso 2. BESS injetando +1 MW de potência ativa	94
Figura 37 – Diagrama, Caso 3. BESS absorvendo –1 MW (modo de carga)	95
Figura 38 – Diagrama, Caso 4. BESS fornecendo +1 MVar (suporte capacitivo)	96
Figura 39 – Diagrama, Caso 5. BESS absorvendo –1 MVar (modo indutivo)	97
Figura 40 - Diagrama de Simulação da Rede no ANAFAS	98
Figura 41 - Caso 1. Relatório de Níveis de Curto Circuito (ANAFAS)	99
Figura 42 - Caso 2. Relatório de Níveis de Curto Circuito (ANAFAS)	100
Figura 43 - Caso 3. Relatório de Níveis de Curto Circuito (ANAFAS)	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das variáveis utilizadas nas equações do Fluxo de Potência ..	29
Tabela 2 - Cores utilizadas para visualização dos equipamentos de acordo com seus níveis de tensão	41
Tabela 3 - Dados Nominais da Carga RLC	43
Tabela 4 - Dados de Placa dos Inversores Sungrow SG125HV	44
Tabela 5 - Dados Técnicos do Aerogerador IMPSA IV-82 / 1,5 MW	46
Tabela 6 - Principais características técnicas do BESS Casa Nova	49
Tabela 7 - Caso 1. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)	61
Tabela 8 - Caso 1. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)	62
Tabela 9 - Caso 1. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida.....	62
Tabela 10 – Caso 2. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)	63
Tabela 11 – Caso 2. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)	63
Tabela 12 - Caso 2. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida.....	63
Tabela 13 - Caso 3. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)	64
Tabela 14 - Caso 3. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)	64
Tabela 15 - Caso 3. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida.....	64
Tabela 16 - Caso 4. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)	65
Tabela 17 - Caso 4. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)	65
Tabela 18 - Caso 4. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida.....	66
Tabela 19 - Caso 5. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)	66
Tabela 20 - Caso 5. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)	67

Tabela 21 - Caso 5. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida.....	67
Tabela 22 - Máxima corrente de injeção dos inversores da SGH	69
Tabela 23 - Caso 1. Níveis de curto-circuito nas barras do sistema	70
Tabela 24 - Caso 2. Níveis de curto-circuito nas barras do sistema	71
Tabela 25 - Caso 3. Níveis de curto-circuito nas barras do sistema	72
Tabela 26 - Relação entre os Níveis de Curto circuito, Caso 1 e Caso 2.....	73
Tabela 27 - Relação entre os Níveis de Curto circuito, Caso 2 e Caso 3.....	74
Tabela 28 - Dados de Placa. Transformadores da SE Híbrida.....	86
Tabela 29 - Impedância nominal resultante. Transformadores SE Híbrida	86
Tabela 30 - Impedâncias na base de 100 MVA. Transformadores SE Híbrida	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAFAS	Programa de análise de faltas simultâneas
ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BESS	<i>Battery Energy Storage Systems</i> (Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias)
BMS	<i>Battery Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Baterias)
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
Curva PQ	Gráfico dos limites de potência ativa (P) e reativa (Q) de um inversor ou máquina síncrona
DEOL	Dados de Gerador Eólico Síncrono
EEGIN	Implantação de Geração Norte/Nordeste
EMS	<i>Energy Management System</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaica
GFL	<i>Grid Following</i>
GFM	<i>Grid Forming</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
IBR	<i>Inverter-Based Resource</i>
JPW	JPW Engenharia Elétrica Ltda.
LFP	Fosfato de Ferro-Lítio
LRCAP	Leilão de Reserva de Capacidade
MT	Média Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema
P&D+I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PAR/PEL	Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo
PCS	<i>Power Conversion System</i> (Sistema de Conversão de Potência)
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>

QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RLC	Carga resistiva, indutiva, capacitiva
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SE	Subestação
SGH	Sistemas de Geração Híbrida
SIN	Sistema Interligado Nacional
SoC	State of Charge (Estado de Carga)
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VEE	Vice-Presidência de Engenharia e Expansão
VSG	Virtual Synchronous Generator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO.....	16
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Geral.....	19
1.2.2	Específico	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	SISTEMAS DE GERAÇÃO HÍBRIDA	21
2.2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS	23
2.3	PANORAMA REGULATÓRIO	26
3	REFERENCIAL TEÓRICO	28
3.1	FLUXO DE POTÊNCIA	28
3.1.1	Modelagem de Linhas de Transmissão	29
3.1.2	Modelagem de Transformadores.....	30
3.2	ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO	31
3.2.1	Tipos de Curtos-Circuitos	31
3.2.2	Teorema de Fortescue	32
3.3	CONTROLE GRID FORMING (GFM) APLICADO AO BESS.....	34
4	ANÁLISES ELÉTRICAS	37
4.1	APRESENTAÇÃO DA REDE EM ESTUDO	37
4.1.1	Descrição Geral	37
4.1.2	Carga RLC.....	42
4.1.3	Planta Fotovoltaica (FV)	44
4.1.4	Aerogerador 18.....	46
4.1.5	BESS – Sistema de Armazenamento	48
4.1.6	Caracterização Operacional da Planta Híbrida a partir de Dados Reais de Operação.....	51
4.2	METODOLOGIA	57
4.3	PREMISSAS.....	58
4.3.1	Premissas para o Estudo de Fluxo de Potência	58
4.3.2	Premissas para o Estudo de Curto-Circuito.....	59
4.4	SIMULAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA	60
4.4.1	Casos de Estudo para Avaliação do Desempenho do BESS	60
4.4.2	Resultados obtidos na análise de fluxo de potência	67
4.5	SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO	69
4.5.1	Casos de Estudo para Avaliação do Desempenho do BESS	70
4.5.2	Resultados obtidos na análise de curto-circuito	73

5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	77
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICES	84
	ANEXOS	93

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro atravessa um período de significativa transformação, impulsionado pela crescente integração de fontes de energia renováveis não convencionais em sua matriz [1]. A expansão da geração eólica e solar fotovoltaica, em particular, reflete não apenas uma tendência global de busca por sustentabilidade, mas também a exploração do vasto potencial de recursos naturais do país e a crescente competitividade econômica dessas tecnologias [2].

No entanto, essa mudança paradigmática introduz complexidades operativas inéditas para o Sistema Interligado Nacional (SIN), demandando abordagens inovadoras para garantir a segurança e a eficiência do suprimento energético [3]. Este trabalho analisa uma dessas soluções emergentes: a integração de Sistemas de Armazenamento de Energia em baterias (BESS) em plantas de geração híbrida, analisando seus impactos técnicos e operativos.

1.1 MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

A escolha do tema deste trabalho teve origem em uma experiência prática marcante durante a Visita Técnica realizada entre 6 e 24 de janeiro de 2025 pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf), integrante do grupo Eletrobras¹, no âmbito da Vice-Presidência de Engenharia e Expansão (VEE) e da Gerência de Implantação de Geração Norte/Nordeste (EEGIN), vivenciada durante o meu período de estágio na companhia.

Durante o período da visita, foi possível acompanhar atividades em importantes empreendimentos da Chesf, como a Modernização das usinas Hidrelétricas de Paulo Afonso IV, Sobradinho e a as obras de Implantação no Complexo Eólico de Casa Nova.

Entretanto, o ponto mais relevante foi a passagem pela Planta Híbrida Inteligente de Casa Nova (BA), um projeto de P&D+I desenvolvido pela Chesf em parceria com o SENAI CIMATEC, FADE UFPE, Acumuladores Moura S.A.(Moura), JPW

¹ A Eletrobras alterou seu nome fantasia para “AXIA Energia” em 10/2025. Como a razão social e o CNPJ permaneceram inalterados, este trabalho mantém o nome original “Eletrobras” ao citar documentos institucionais publicados antes da mudança, preservando sua integridade histórica.

Engenharia Elétrica Ltda (JPW) e Hugreen Inteligência Energética (HUgreen), que integra fontes eólica, solar e BESS.

Durante essa visita, tive a oportunidade de observar a operação da subestação da planta híbrida, a transição para alimentação pelo BESS, e testes de intertravamentos, o que proporcionou uma compreensão concreta dos desafios e potencialidades associados à integração de múltiplas fontes renováveis e sistemas de armazenamento.

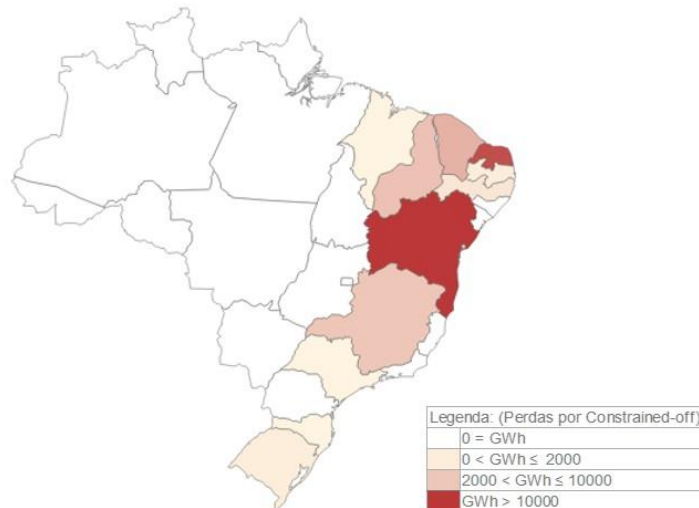
Essa vivência despertou o interesse em aprofundar o estudo técnico e analítico sobre esse tipo de configuração, motivando a escolha do tema deste Trabalho de Conclusão de Curso.

A principal motivação para este estudo reside nos desafios impostos pela natureza intermitente e variável das fontes eólica e solar [2], [4]. Essa característica intrínseca dificulta a previsibilidade da geração e pode comprometer a estabilidade e a segurança operativa do SIN, exigindo soluções inovadoras para garantir a confiabilidade do suprimento energético [3]. Um exemplo tangível desses desafios operacionais é a ocorrência de Restrição de Operação por *Constrained-off*, definida pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) como: “Redução da produção de energia por usinas despachadas centralizadamente ou conjuntos de usinas considerados na programação, seja por fontes eólicas ou fotovoltaicas, decorrente de comando do ONS. Tal redução é originada externamente às instalações das respectivas usinas” [5].

Dados públicos de Restrição de Operação disponibilizados pelo ONS [6], [7] compilados e analisados pela Eletrobras em um estudo conduzido em 2024, revelam a magnitude crescente desse problema para usinas eólicas e fotovoltaicas no Brasil. No período de outubro de 2021 a outubro de 2025, as perdas totais por *Constrained-off* atingiram uma média de 12,59%, com tendência de aumento anual. A região Nordeste, que concentrou 87,71% da geração dessas fontes no período, é particularmente afetada, apresentando as maiores perdas (GWh) do país, como ilustrado na Figura 1. Essas restrições representam não apenas um desperdício de energia limpa, mas também um impacto econômico significativo para os geradores e para o sistema [8].

Figura 1 - Distribuição geográfica das perdas por Constrained-off (GWh) no Brasil (Out/2021-Out/2025).

Estudos de Constrained-off / Estados
(2021 – 2025)



Fonte: Adaptado do Relatório “Constrained-off diário – BI” [8].

Neste contexto, a configuração de Sistemas de Geração Híbrida (SGH), formalizada no Brasil pela Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL nº 954/2021 [9], representa uma abordagem promissora. Ao combinar fontes com perfis de geração distintos e complementares no mesmo ponto de conexão, busca-se uma maior constância na produção de energia e uma otimização do uso da rede, o que pode contribuir para mitigar as restrições da Operação.

Embora a hibridização traga benefícios, a verdadeira sinergia e flexibilidade para lidar com a intermitência das renováveis e otimizar o uso da rede é alcançada com a incorporação de sistemas de armazenamento. As baterias atuam como um elemento gerenciável crucial, permitindo dissociar parcialmente o momento da geração do momento da injeção de energia na rede, isso não apenas suaviza as flutuações [10], mas habilita a planta a operar de forma mais estratégica, potencialmente reduzindo perdas por *Constrained-off* e oferecendo serviços valiosos ao sistema.

A integração de Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) às plantas híbridas, portanto, eleva o potencial dessas soluções. O BESS permite o gerenciamento ativo do fluxo de energia, absorvendo excedentes (que poderiam ser cortados por *Constrained-off*) e suprimindo déficits de geração, contribuindo para a

estabilidade da rede [11]. O estudo aprofundado dos impactos técnicos dessa integração é fundamental, especialmente considerando projetos pioneiros como o da planta híbrida da Chesf em Casa Nova, Bahia, fruto da Chamada Pública P&D+I Chesf Nº 02/2017 [12]. Este trabalho se propõe a realizar essa análise, com foco na modelagem do BESS e na avaliação de seu desempenho por meio de simulações computacionais em regime permanente, contribuindo para o conhecimento sobre esta tecnologia emergente no contexto brasileiro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar os impactos técnicos, em regime permanente, da integração de um BESS à planta de geração híbrida eólico-fotovoltaica do projeto de P&D da Chesf em Casa Nova, Bahia.

1.2.2 Específico

Para alcançar o objetivo geral, serão seguidas as seguintes etapas:

- Apresentar o referencial teórico sobre geração híbrida, tecnologia BESS e os fundamentos dos estudos de fluxo de potência e curto-circuito em sistemas de potência;
- Desenvolver a modelagem computacional da planta híbrida de Casa Nova para simulação nos programas computacionais ANAREDE - Programa de Análise de Redes e ANAFAS - Programa de análise de faltas simultâneas, com especial detalhamento no modelo do BESS e sua Curva PQ — Gráfico dos limites de potência ativa (P) e reativa (Q) de um inversor ou máquina síncrona, considerando seus limites operativos.
- Simular e analisar os impactos do BESS nos resultados de fluxo de potência, avaliando sua operação nos quatro quadrantes (injeção/absorção de potência ativa e reativa) em cenários comparativos com e sem o armazenamento;

- Simular e analisar a contribuição de corrente dos conversores do BESS para os níveis de curto-circuito da planta;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a apresentar, de maneira progressiva, o embasamento teórico, a contextualização regulatória, a modelagem desenvolvida e os resultados obtidos para a aplicação do BESS na planta híbrida de Casa Nova – BA.

O **Capítulo 1** introduz o tema, apresenta a motivação do estudo, formula o problema de pesquisa, estabelece os objetivos geral e específicos e descreve a organização do trabalho.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão da literatura, abordando os principais conceitos relacionados aos sistemas de geração híbrida, à tecnologia de armazenamento de energia em baterias, aos componentes do BESS e ao panorama regulatório aplicável aos sistemas de armazenamento no setor elétrico brasileiro e em referências internacionais.

O **Capítulo 3** desenvolve o referencial teórico dos estudos de regime permanente, contemplando os fundamentos do fluxo de potência e da análise de curto-circuito em sistemas de potência, bem como os conceitos associados ao controle *Grid Forming* (GFM) aplicado ao BESS.

O **Capítulo 4** reúne as análises elétricas realizadas, descrevendo a rede em estudo, a metodologia de modelagem adotada e as simulações em regime permanente conduzidas nos programas computacionais ANAREDE e ANAFAS. São apresentados os casos de estudo, as premissas consideradas, os cenários de operação do BESS nos quatro quadrantes da curva PQ e os resultados obtidos para fluxo de potência e curto-circuito.

Por fim, o **Capítulo 5** apresenta as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições, as limitações identificadas e as propostas para trabalhos futuros relacionados à integração de sistemas de armazenamento por bateria.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A busca por uma matriz energética mais sustentável e a necessidade de acomodar a crescente penetração de fontes renováveis intermitentes têm impulsionado inovações significativas no setor elétrico global e brasileiro. Dentre as soluções emergentes, destacam-se os SGH e o BESS, tecnologias que prometem agregar flexibilidade, otimização e confiabilidade à rede elétrica. Esta revisão da literatura contextualiza o desenvolvimento dessas tecnologias, com foco no panorama brasileiro.

2.1 Sistemas de Geração Híbrida

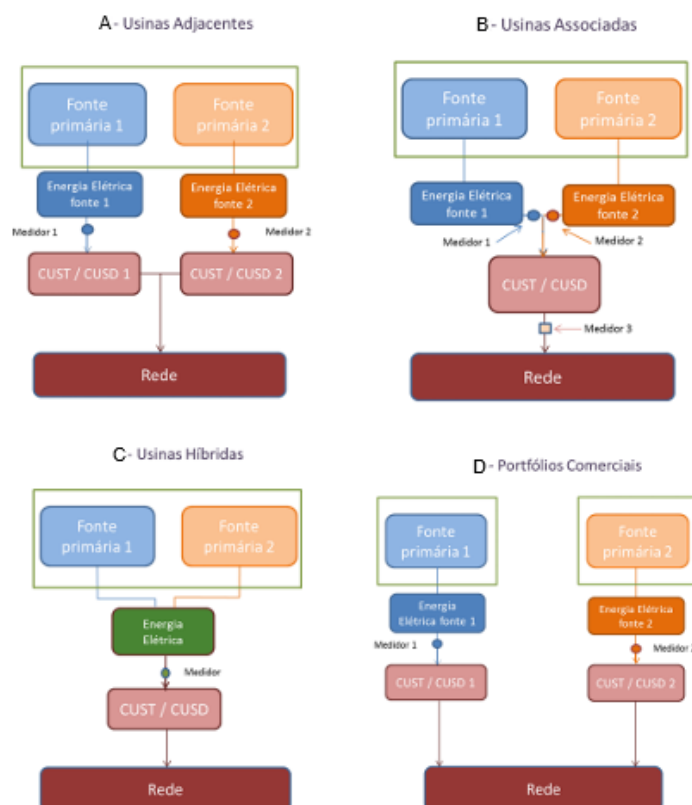
A ANEEL define formalmente a Sistema de Geração Híbrida (SGH) como uma instalação que combina diferentes tecnologias de geração sob uma outorga única [9]. Essa abordagem permite explorar a complementaridade temporal e espacial entre diferentes recursos energéticos, como o eólico e o solar, que frequentemente apresentam perfis de geração distintos ao longo do dia ou do ano. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) categorizou diferentes arranjos para a integração dessas fontes, denominadas Tipologias A, B, C e D, que variam quanto ao nível de integração física e compartilhamento de infraestrutura [3]:

- **Tipologia A: Usinas Adjacentes** - Usinas de diferentes fontes primárias construídas em proximidade, eventualmente compartilhando terreno ou instalações de interesse restrito (redes internas), mas sem compartilhamento de equipamentos de geração ou de infraestrutura de conexão. Cada usina tem sua própria outorga e é independente do ponto de vista regulatório e operacional. O benefício está em pequenas sinergias e eventuais economias locais; não são consideradas verdadeiramente híbridas pela EPE.
- **Tipologia B: Usinas Associadas** - Duas ou mais usinas de fontes distintas próximas fisicamente, compartilhando fisicamente e contratualmente parte da infraestrutura de conexão, como subestações ou linhas de transmissão. O compartilhamento permite ganhos operacionais e aproveitamento da complementaridade entre as fontes, mas cada usina mantém outorgas

separadas e operação independente. Podem realizar acordos específicos para o uso conjunto da infraestrutura elétrica.

- **Tipologia C: Usinas Híbridas (Stricto Sensu)** - Instalação única na qual ocorre integração física e operacional no processo de geração: equipamentos de conversão de energia (como inversores e transformadores) são compartilhados, e não há distinção clara da origem da energia produzida na saída do sistema. A energia gerada é indissociável entre as fontes. Possui uma única outorga e trata-se da tipologia considerada autenticamente híbrida pela EPE.
- **Tipologia D: Portfólios Comerciais ou Contratuais** - Arranjo que combina usinas/fonte distintas em um portfólio comercial ou contratual, sem qualquer integração física ou compartilhamento de infraestrutura entre os empreendimentos. A complementaridade ocorre apenas em nível de negociação ou contratos de venda de energia, não trazendo benefícios de sinergia operacional ou otimização de uso da infraestrutura do sistema.

Figura 2 - Tipologias de combinações de usinas.



Fonte: Adaptado de “Usinas Híbridas: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento.” [3].

Essas tipologias ajudam a identificar os diferentes graus de integração possíveis entre fontes (solar, eólica, hidráulica, biomassa etc.), embasando a análise regulatória e comercial sobre usinas híbridas no Brasil.

Os principais benefícios apontados para os SGH incluem a otimização do uso do sistema de transmissão, reduzindo a ociosidade da rede; o aumento do fator de capacidade da planta combinada; e a possibilidade de sinergias operacionais [3].

2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias

Paralelamente ao desenvolvimento dos SGH, os BESS assumem papel estratégico na transição energética. Globalmente, o custo das baterias, principalmente as de íon-lítio, tem diminuído significativamente, impulsionando sua aplicação em larga escala, estima-se que até 2030 o custo total instalado de uma bateria de íon-lítio poderá cair entre 51%-61% [13].

No contexto nacional, a EPE destaca o potencial das baterias para diversas aplicações, desde a integração de fontes renováveis até a prestação de serviços ancilares, como controle de tensão e frequência [14].

Um BESS moderno transcende a simples acumulação de energia, configurando-se como um sistema eletroeletrônico integrado, dotado de inteligência para gerenciamento dinâmico do fluxo energético e da qualidade de potência. Seus principais subsistemas são descritos a seguir:

Baterias: O núcleo do armazenamento, convertendo energia elétrica em química e vice-versa. Dentre as tecnologias, as de Íon-Lítio predominam no mercado atual para aplicações estacionárias devido à sua alta densidade energética, eficiência e vida útil [15].

BMS (Battery Management System): é o responsável pelo monitoramento, proteção e controle das baterias que compõem o sistema de armazenamento de energia (BESS). Seu objetivo é garantir a operação segura, eficiente e confiável, monitorando continuamente parâmetros como tensão, corrente, temperatura e o estado de carga do sistema (SoC - *State of Charge*) de cada célula.

A arquitetura do BMS é distribuída em níveis hierárquicos. Cada módulo ou rack de baterias possui um BMS local (*rack-level*), que coleta informações e as envia para o BMS central, responsável pela coordenação geral do banco de baterias. Este, por sua vez, comunica-se com o controlador mestre (EMS) e o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), permitindo o monitoramento remoto e a integração com os sistemas de supervisão e controle da planta [10].

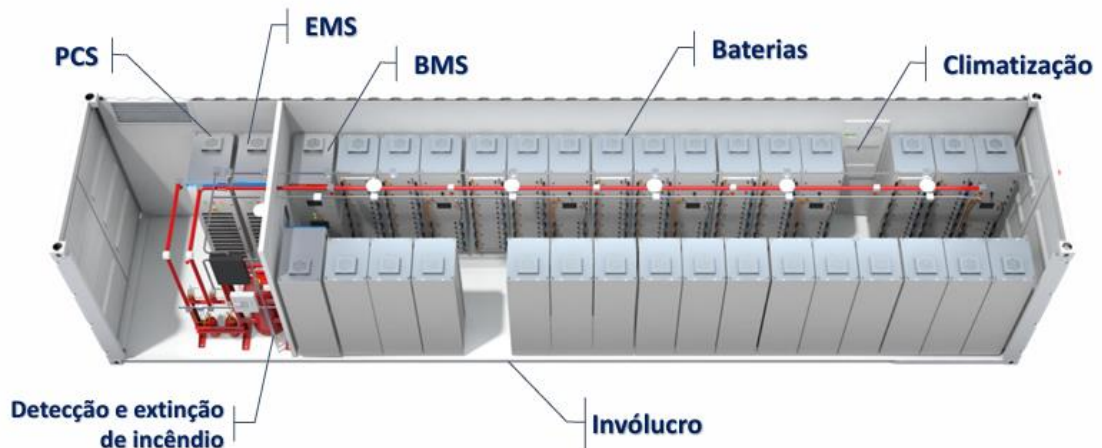
PCS (*Power Conversion System*): Inversor bidirecional que realiza a interface entre o barramento de corrente contínua (CC) das baterias e a rede de corrente alternada (CA). Controla o fluxo de potência ativa e reativa (carga e descarga) e é fundamental para a qualidade da energia injetada e para a capacidade de integração à rede [10].

EMS (*Energy Management System*): O "cérebro" do BESS, responsável por implementar as estratégias de controle e otimização da operação. O EMS coordena a atuação do PCS com base em dados do BMS, sinais da rede, previsões de geração/demanda ou comandos externos, visando maximizar os benefícios técnicos e econômicos da aplicação do BESS [10].

Componentes Auxiliares:

- Climatização: mantém a temperatura interna dos módulos dentro da faixa ideal, normalmente utilizando sistemas HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*), garantindo o desempenho térmico e a longevidade das células [16].
- Detecção e Extinção de incêndio: Atua como camada adicional de segurança no BESS, complementando as funções do BMS. Caso sejam detectadas temperaturas acima dos limites operacionais, o BMS interrompe o sistema; porém, em situações de fuga térmica, a atuação do sistema de supressão é essencial. Esse sistema é acionado automaticamente por sensores de gás, fumaça ou calor, liberando o agente extintor adequado para conter o evento e evitar sua propagação [16].
- Involucro: Estrutura ou compartimento que envolve, protege e isola componentes elétricos e eletrônicos de agentes externos (poeira, umidade, impacto, ruído)

Figura 3 - Componentes do BESS.



Fonte: Sistemas de Armazenamento de Energia - UPE [17]

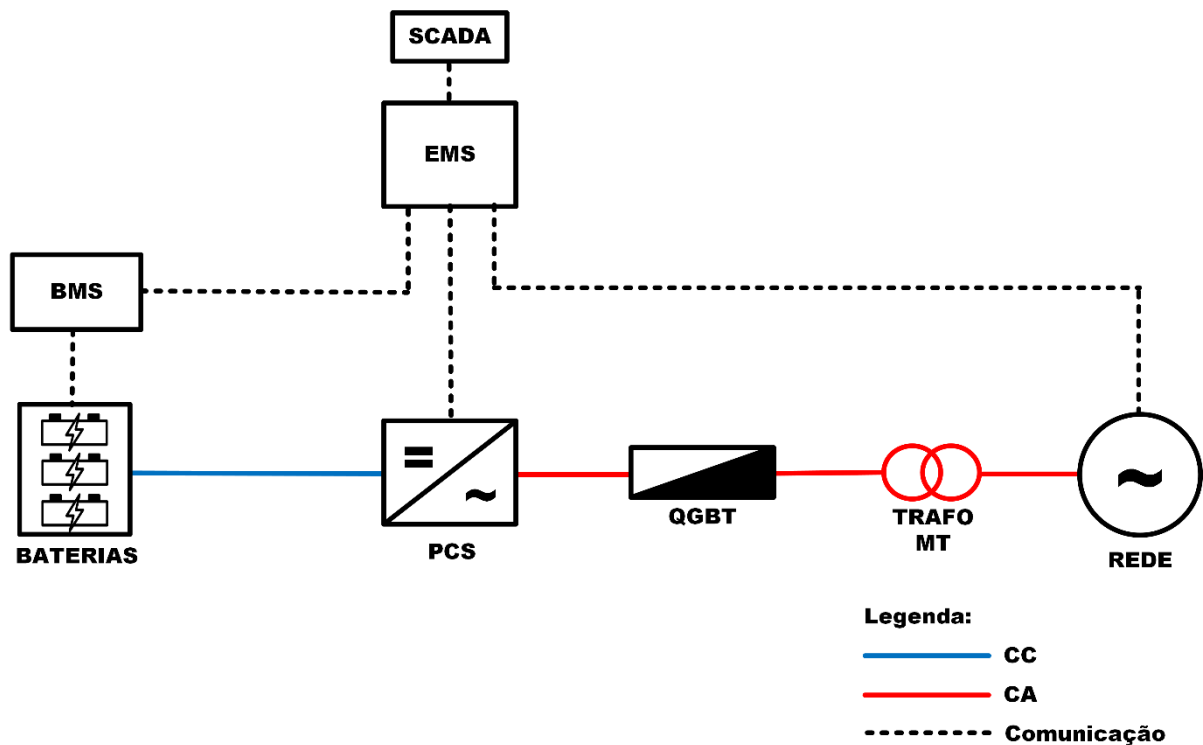
A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, a arquitetura funcional de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS), destacando o encadeamento dos fluxos de energia e comunicação entre os principais subsistemas. O diagrama evidencia como os diferentes blocos interagem de maneira coordenada para permitir a operação segura e eficiente do sistema.

O fluxo de energia tem início nas baterias, que armazenam energia em CC sob a supervisão do BMS. Este realiza o monitoramento das condições elétricas e térmicas das células e comunica-se com os níveis superiores de controle. A energia em CC é então encaminhada ao PCS, responsável pela conversão bidirecional entre CC e CA e pelo controle da potência ativa e reativa trocada com a rede [18].

Após a conversão, a energia é conduzida ao Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), responsável pela proteção, seccionamento e medição do circuito de saída do PCS. Esse conjunto compõe a etapa de conexão à rede, permitindo a integração do sistema de armazenamento a diferentes topologias de SGH.

Paralelamente ao fluxo de energia, ocorre o fluxo de comunicação e controle, mostrado no diagrama por meio das linhas tracejadas. Nessa camada, o Energy Management System (EMS) exerce a coordenação global do sistema, integrando informações provenientes do BMS, do PCS e de sistemas supervisórios (SCADA) ou de despacho. Essa estrutura hierárquica possibilita que o BESS atue de forma autônoma e adaptativa, respondendo às condições operativas da rede ou da planta à qual está associado [18].

Figura 4 - Diagrama funcional completo de um BESS



Fonte O autor, adaptado de “Aula 02 Componentes do BESS” [18]

A combinação de SGH com BESS representa a fronteira tecnológica para a gestão de plantas renováveis, conferindo maior controle e flexibilidade. Estudos de caso no Brasil já exploram essa integração, analisando o dimensionamento e os benefícios operativos [2], [4].

2.3 Panorama Regulatório

A incorporação de sistemas de armazenamento de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) representa um dos maiores desafios atuais do setor elétrico brasileiro. Apesar do avanço tecnológico observado nos últimos anos, o arcabouço regulatório ainda se encontra em fase de consolidação, exigindo a atuação coordenada de instituições como o Ministério de Minas e Energia (MME), a ANEEL, a EPE e o ONS.

A REN ANEEL nº 954/2021 [9] foi um passo fundamental ao estabelecer as regras para outorga e acesso à rede de SGH e usinas associadas. Contudo, a regulamentação ainda está em evolução, especialmente no que tange aos modelos de negócio para BESS, a remuneração por serviços ancilares e as regras de

participação em mecanismos de mercado, como o Leilão de Reserva de Capacidade (LRCAP) [19], [20].

Nesse sentido, o ONS iniciou em 2024 um trabalho denominado "Prospecção de requisitos técnicos para conexão de sistemas de armazenamento de Energia por Baterias no SIN" [21]. No qual visa definir os requisitos específicos para BESS, baseando-se em referências internacionais de normas técnicas e práticas de outros operadores de sistema. Como parte desse processo, o ONS realizou duas edições de um workshop em 2025 (junho e julho), contando com a participação de diversos fabricantes internacionais de BESS para discutir as capacidades e desafios tecnológicos. Atualmente, na ausência de requisitos específicos, o ONS utiliza como referência provisória os critérios estabelecidos no Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede [22], originalmente voltado para centrais eólicas e fotovoltaicas.

Uma das frentes atuais de estudo do ONS é a avaliação da tecnologia e dos requisitos para inversores com controle GFM, considerados essenciais para a estabilidade futura do SIN. ONS apresentou as bases conceituais dos inversores formadores de rede, destacando o papel do GFM na provisão de inércia sintética, amortecimento de oscilações e capacidade de black start,

Paralelamente, as discussões provenientes das consultas públicas da ANEEL [23], [24] e as análises da EPE [3], [13] continuam sendo cruciais para moldar o futuro dessas tecnologias no Brasil.

Esses eventos marcaram um passo importante na discussão sobre a futura regulação técnica nacional para integração de sistemas de armazenamento de energia ao SIN. A tecnologia BESS, embora ainda em fase inicial de implantação em larga escala, é vista como fundamental para a transição energética, como evidenciado por projetos de P&D+I como o que motiva este trabalho.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta as bases teóricas e os modelos fundamentais que embasarão as análises realizadas neste trabalho. O foco recai sobre os estudos de regime permanente e a modelagem dos componentes da planta híbrida para simulação computacional, com especial detalhamento na representação do Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) e suas funcionalidades.

3.1 Fluxo de Potência

O estudo de fluxo de potência opera sob a premissa de regime permanente, analisando o sistema em um ponto de operação equilibrado. Seu objetivo principal é determinar as tensões (módulo e ângulo) em todas as barras do sistema elétrico, bem como os fluxos de potência ativa e reativa nos equipamentos (linhas, transformadores), para uma condição específica de geração e carga. Para formular o problema, as barras da rede são classificadas conforme as variáveis conhecidas e desconhecidas, no qual V e θ , referentes ao módulo e ao ângulo de fase da tensão respectivamente, e P e Q geração líquida de potência ativa e injeção líquida de potência reativa, respectivamente [25].

- **Barra PQ:** Potências ativa (P) e reativa (Q) injetadas são conhecidas; módulo e ângulo da tensão ($|V|, \theta$) são desconhecidos.
- **Barra PV:** Potência ativa (P) e módulo da tensão ($|V|$) são especificados; potência reativa (Q) e ângulo da tensão (θ) são desconhecidos.
- **Barra de Referência:** Módulo ($|V|$) e ângulo (θ , geralmente 0°) da tensão são fixados; potências ativas (P) e reativas (Q) injetadas são desconhecidas e ajustam-se para balancear o sistema.

Matematicamente, o problema se baseia na aplicação da Primeira Lei de Kirchhoff a cada barra, resultando em um sistema de equações algébricas não lineares que relacionam as injeções de potência às tensões nodais. O conjunto de equações do fluxo de potência é formado por duas equações para cada tipo de barra, expresso por [25]:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_k(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.2)$$

Em que, cada variável pode ser identificada na Tabela 1:

Tabela 1 - Descrição das variáveis utilizadas nas equações do Fluxo de Potência

k	$=1, \dots, NB$, sendo NB o número da rede
Ω_k	conjunto das barras vizinhas da barra k
V_k, V_m	magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k - m$
θ_k, θ_m	ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$
P_{km}	fluxo de potência ativa no ramo $k - m$
Q_{km}	fluxo de potência reativa no ramo $k - m$
Q_k^{sh}	componente da injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra k

Fonte: Adaptado do livro “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica” [25]

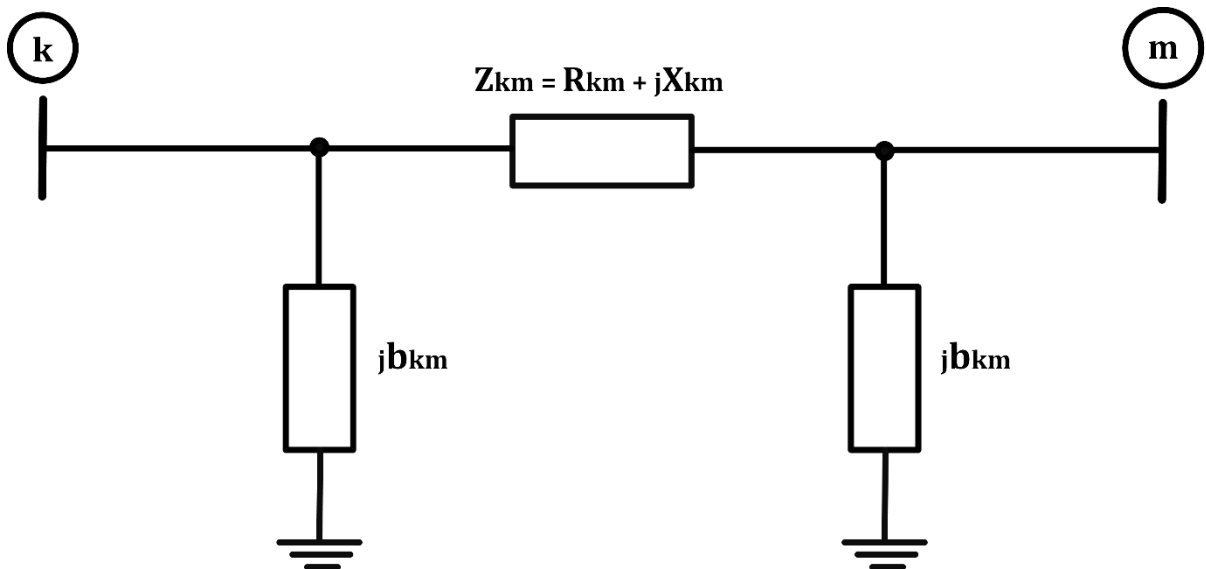
O problema do fluxo de potência se baseia na aplicação da Primeira Lei de Kirchhoff a cada barra, resultando em um sistema de equações algébricas não lineares que relacionam as injeções de potência às tensões nodais [25]. Programas computacionais como o ANAREDE utilizam métodos numéricos iterativos, como o Newton-Raphson ou o Desacoplado Rápido, para resolver este sistema [26]. A representação precisa dos componentes da rede é crucial para a qualidade dos resultados, conforme detalhado a seguir para linhas e transformadores.

3.1.1 Modelagem de Linhas de Transmissão

Para estudos de fluxo de potência, linhas de transmissão de média e alta tensão são adequadamente representadas pelo modelo π nominal equivalente. Este modelo concentra os parâmetros distribuídos da linha (resistência R , reatância indutiva X e

susceptância capacitiva B) em elementos discretos, conforme ilustrado na Figura 5. A impedância série Z_{km} é constituída pela resistência série R_{km} e pela reatância série X_{km} , enquanto a susceptância shunt representa B_{km}^{sh} [25].

Figura 5 - Modelo equivalente π de uma linha de transmissão

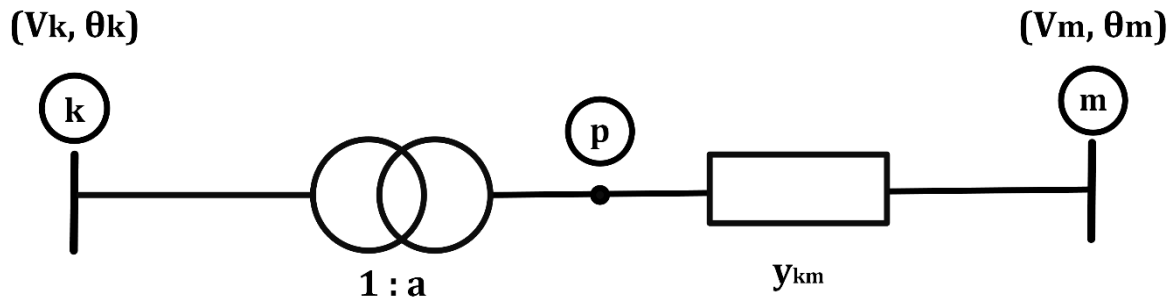


Fonte: O Autor, adaptado do livro “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica” [25]

3.1.2 Modelagem de Transformadores

Transformadores são componentes essenciais para adequar os níveis de tensão na rede. Em estudos de fluxo de potência, eles são geralmente representados por um modelo de circuito equivalente série, através de uma impedância série y_{km} . Um aspecto fundamental na modelagem é a representação da relação de espiras variável (tap), presente em muitos transformadores de potência para fins de controle de tensão. O tap é modelado como $1:t$. Para um transformador em fase t é um número real ($t = a$) e para um transformador defasador t é um número complexo ($t = ae^{j\varphi}$) [25].

Figura 6 - Modelagem de um transformador em fase



Fonte: O Autor, adaptado do livro “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica” [25].

3.2 ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO

O estudo de curto-circuito é outro pilar da análise de sistemas de potência em regime permanente, sendo fundamental para o dimensionamento adequado de equipamentos (disjuntores, barramentos, transformadores), para a especificação de malhas de aterramento, a coordenação de sistemas de proteção e a análise geral da segurança operativa do sistema elétrico [27]. Este estudo visa calcular as correntes e tensões em diferentes pontos da rede durante a ocorrência de faltas (curtos-circuitos), que representam condições anormais de operação, como contatos acidentais entre fases ou entre fase e terra, resultando em correntes de magnitude significativamente elevada. A análise dessas condições é crucial para garantir que os equipamentos suportem os esforços térmicos e mecânicos e que as proteções atuem de forma seletiva e rápida [27].

3.2.1 Tipos de Curtos-Circuitos

As faltas em sistemas trifásicos podem ser classificadas em dois grandes grupos: simétricas (ou equilibradas) e assimétricas (ou desequilibradas).

- **Curto-Circuito Trifásico:** É o único tipo de falta simétrica, ocorrendo quando as três fases entram em contato simultâneo através de uma impedância de falta (Z_f), podendo ou não envolver a terra [27]. Embora seja o tipo menos frequente estatisticamente, geralmente resulta nas maiores magnitudes de corrente de falta, sendo frequentemente o caso crítico para a especificação da capacidade

de interrupção de disjuntores e da suportabilidade eletromecânica de barramentos [28], [29]. A análise deste tipo de falta é simplificada, pois o sistema permanece equilibrado, permitindo o uso de um modelo monofásico equivalente, baseado na rede de sequência positiva [27].

Curtos-Circuitos Assimétricos: São os tipos mais comuns e envolvem apenas uma ou duas fases, resultando em desequilíbrio entre as correntes e tensões de fase [27].

- **Monofásico:** Contato entre uma das fases e a terra, através de uma impedância de falta (Z_f). É a falta mais frequente em sistemas com neutro efetivamente aterrado [28]. A magnitude da corrente depende fortemente da impedância de sequência zero do sistema [27].
- **Bifásico:** Contato entre duas fases através de uma impedância de falta (Z_f), sem envolvimento da terra ou pelo contato entre duas fases e a terra simultaneamente, através de impedâncias de falta [27].

3.2.2 Teorema de Fortescue

A análise de faltas assimétricas é viabilizada pelo Teorema de Fortescue, que permite decompor um sistema trifásico desequilibrado de fasores (tensões ou correntes) em três sistemas trifásicos equilibrados: sequência positiva, negativa e zero [27], [28].

- **Componentes de Sequência Positiva ($\underline{V}_1, \underline{I}_1$):** Sistema equilibrado com a mesma sequência de fase da alimentação original. Representa a operação normal do sistema [27].
- **Componentes de Sequência Negativa ($\underline{V}_2, \underline{I}_2$):** Sistema equilibrado com sequência de fase oposta à original. Surge apenas em condições de desequilíbrio [27].
- **Componentes de Sequência Zero ($\underline{V}_0, \underline{I}_0$):** Três fasores iguais em módulo e ângulo. Surgem apenas em desequilíbrios que envolvem a terra (ou neutro) [27].
- **Representação Matricial:**

Os fasores de fase podem ser relacionados às componentes de sequência por meio da transformação direta de Fortescue:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A transformação inversa, usada para calcular as componentes de sequência a partir dos fasores de fase, é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Onde,

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (3.5)$$

a o operador de fase, usado para rotacionar 120° em cada etapa de uma sequência trifásica positiva.

Vantagens do Método:

Para um sistema linear e simétrico, as redes correspondentes a cada sequência (positiva, negativa e zero) são desacopladas [28]. Assim:

- Uma corrente de sequência positiva gera apenas queda de tensão de sequência positiva, e o mesmo vale para as demais sequências.
- Cada componente do sistema (geradores, transformadores, linhas) possui impedâncias específicas para cada sequência (Z_1, Z_2, Z_0), sendo normalmente $Z_1 = Z_2$, enquanto Z_0 difere devido ao caminho de retorno pelo neutro ou terra. [27].

Dessa forma, a análise de faltas assimétricas é simplificada: montam-se três redes monofásicas equivalentes e conectam-se seus terminais no ponto de falta, de acordo com as restrições impostas pelo tipo de curto (monofásico à terra, bifásico ou bifásico à terra). Isso permite calcular correntes e tensões de sequência, e, por fim, as grandezas de fase [27].

Programas computacionais como o ANAFAS implementam o método das componentes simétricas para o cálculo de correntes de curto-circuito [30]. É importante destacar que fontes baseadas em conversores (IBRs - *Inverter-Based*

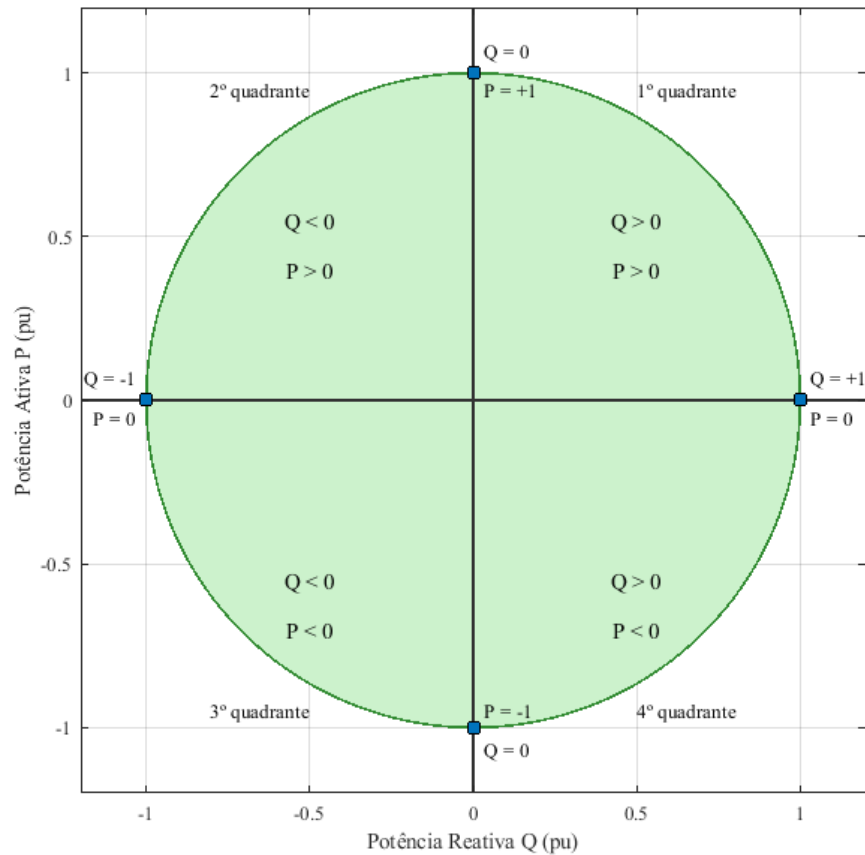
Resources), como BESS, têm comportamento distinto de máquinas síncronas durante faltas, limitando a corrente injetada, o que demanda modelos específicos que considerem o limite de corrente e a dinâmica do conversor.

3.3 CONTROLE GRID FORMING (GFM) APLICADO AO BESS

Conforme discutido no Capítulo 2, a modelagem do BESS, é essencial para representar suas características elétricas e operacionais e compreender sua interação com o sistema elétrico em diferentes condições de carga e geração. Diferentemente das usinas eólicas e fotovoltaicas, o BESS é capaz de operar nos quatro quadrantes da curva PQ, ou seja, injetando ou absorvendo potência ativa e reativa conforme as necessidades da rede, visualizado na Figura 7.

Entre as estratégias de controle aplicadas aos inversores do PCS, destaca-se o *Grid Forming* (GFM), tecnologia que permite ao BESS assumir papel ativo na regulação da rede, especialmente em sistemas com predominância de fontes eletrônicas.

Figura 7 - Curva P–Q de operação em quatro quadrantes do BESS.



Fonte: O autor (2025)

O controle GFM é a tecnologia de controle aplicada aos conversores de potência de sistemas de armazenamento em baterias (BESS) mais recentes. Diferentemente do controle *Grid Following* (GFL), em que o inversor apenas segue a tensão e a frequência impostas pela rede, o GFM é capaz de formar a própria referência elétrica, atuando como fonte de tensão controlada [31]. Essa característica permite que o BESS opere de forma autônoma, mantendo a tensão e a frequência locais mesmo em condições de rede fraca ou durante operação ilhada.

De acordo com as especificações internacionais — publicadas por operadores como a AEMO (Austrália) [32], a NERC (América do Norte) [33] e o consórcio UNIFI/NREL (EUA) [34], inversores com controle GFM devem ser capazes de fornecer suporte dinâmico de tensão e frequência, inércia sintética e resposta rápida a distúrbios, características essenciais para redes com elevada participação de fontes eletrônicas.

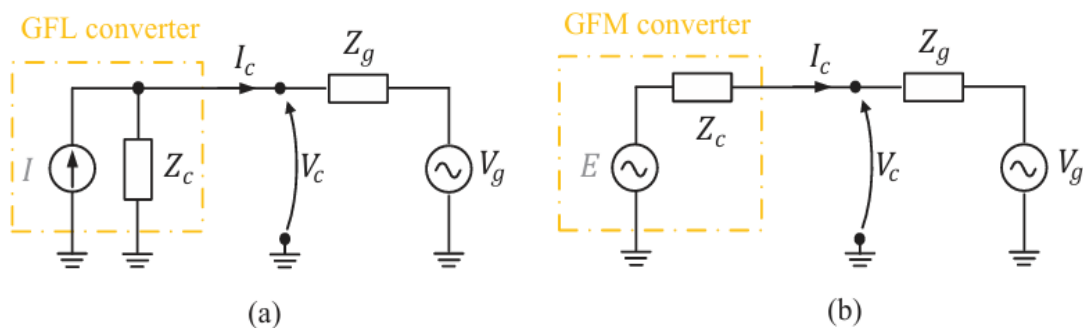
O *Coordinador Eléctrico Nacional* (CEN) do Chile [35] e a IEC [36] reforçam esses requisitos, reconhecendo o GFM como tecnologia-chave para a estabilidade de sistemas híbridos e micro redes.

Entretanto, os custos para a instalação de inversores do tipo GFM é mais elevado, o que leva a sua utilização limitada e dependendo de incentivo do operador do sistema. Nesse sentido, o ONS está trabalhando para viabilizar que os empreendimentos BESS sejam implementados exclusivamente com inversores do tipo GFM.

Fisicamente, o inversor GFM é modelado como uma fonte de tensão atrás de uma impedância, o que o torna capaz de controlar simultaneamente potência ativa (P) e reativa (Q) de acordo com a demanda do sistema [31]. Essa capacidade de controle em ambos os eixos P e Q é o que viabiliza o modo de operação nos quatro quadrantes da curva PQ, explorado neste trabalho.

A Figura 8, apresenta uma comparação entre os modos de controle GFL e GFM, evidenciando a diferença entre o comportamento de um inversor dependente de rede e um formador de rede, como o utilizado neste estudo.

Figura 8 - Representação simplificada dos princípios de controle: (a) conversor Grid-Following (GFL); (b) conversor Grid-Forming (GFM).



Fonte: Artigo “Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends – A Review “ [31]

A compreensão do controle GFM é fundamental para a representação adequada do BESS nas simulações elétricas desenvolvidas neste trabalho. No contexto da planta híbrida de Casa Nova, o inversor da fabricante Kehua, atua como fonte de tensão controlada, permitindo a operação do BESS nos quatro quadrantes da curva PQ de injeção e absorção de potência ativa e reativa. A metodologia de modelagem, parametrização e análise desses casos é apresentada no Capítulo 4.

4 ANÁLISES ELÉTRICAS

4.1 APRESENTAÇÃO DA REDE EM ESTUDO

Este capítulo apresenta a modelagem elétrica da planta híbrida Casa Nova – BA, integrando os subsistemas eólico, fotovoltaico, armazenamento em baterias (BESS) e uma carga RLC de ensaio. A partir das informações técnicas obtidas em relatórios da Eletrobras Chesf e demais parceiros do projeto de P&D+I CHESF nº 02/2017, foram definidos os parâmetros elétricos e operacionais utilizados nas simulações de regime permanente.

O arranjo em estudo tem como objetivo representar, de forma simplificada e fiel, o comportamento elétrico do complexo Casa Nova A e de sua integração com a Planta Híbrida Inteligente da Chesf, possibilitando a análise dos fluxos de potência, controle reativo e contribuição do BESS sob diferentes condições operativas.

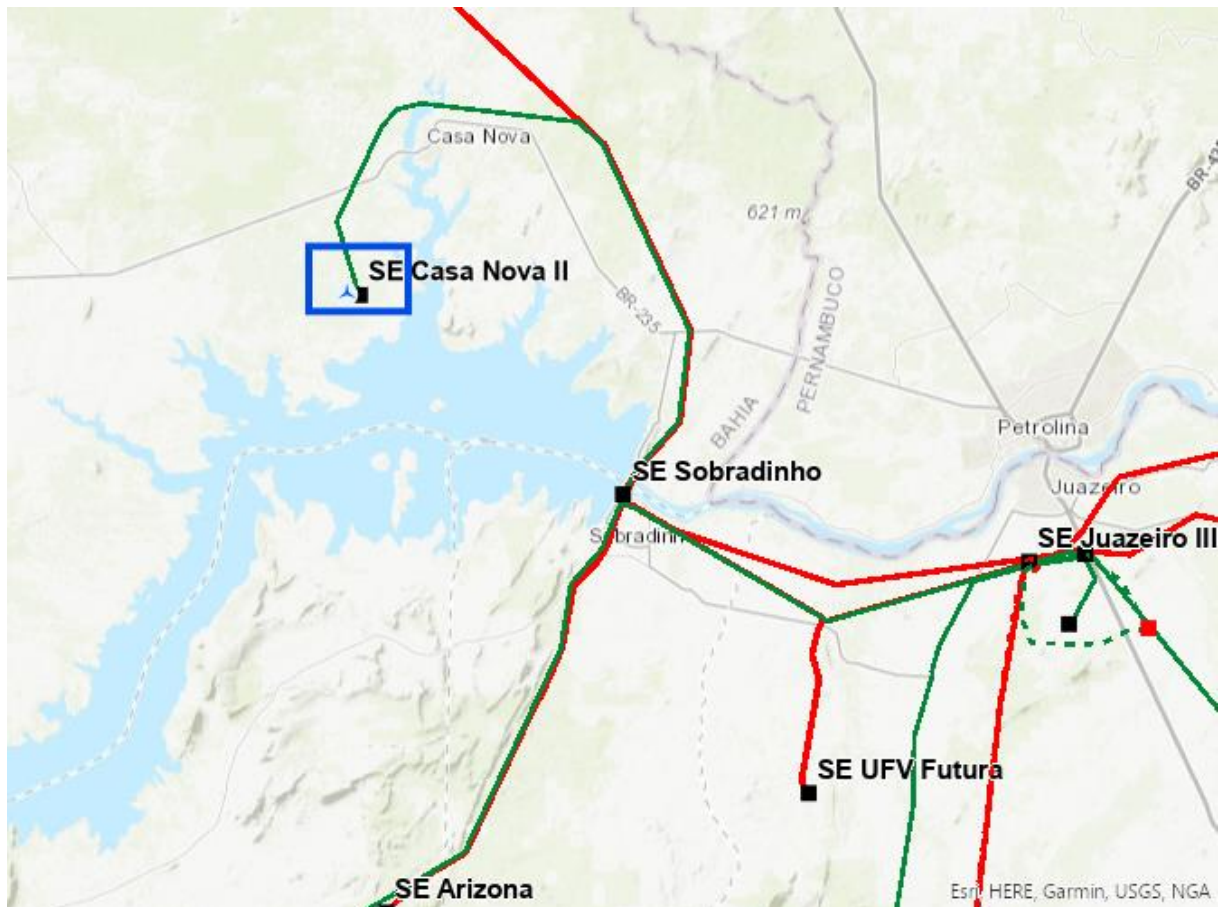
Para o estudo, foi montada uma rede do tipo da microrrede, utilizado o Aerogerador 18 do empreendimento eólico, em conjunto com uma carga RLC, planta fotovoltaica e o BESS, esse conjunto forma uma Planta Híbrida piloto e facilmente escalável para todo o empreendimento de Casa Nova.

Nos subitens seguintes, são descritos os principais componentes que compõem o sistema modelado, incluindo suas características nominais, curvas de operação e funções no contexto da microrrede.

4.1.1 Descrição Geral

O empreendimento híbrido em estudo está localizado no município de Casa Nova – BA, CEP 47300-000, na região Norte do estado da Bahia, próxima às margens do reservatório de Sobradinho, observa-se o mapa da região em estudo na Figura 9, divulgado pela EPE [37]. A Planta Híbrida se integra ao Parque Eólico Casa Nova A, que ocupa uma área contígua às usinas eólicas existentes - Casa Nova II e III (61,1 MW) - do complexo, ligadas a Subestação Casa Nova II de propriedade da Chesf. O projeto foi concebido para avaliar, em condições reais, a integração entre geração eólica, geração fotovoltaica e BESS, permitindo estudos de desempenho, controle e suporte à rede [38].

Figura 9 - Localização geográfica e arranjo elétrico da região de Casa Nova – BA



Fonte: Webmap EPE [37]

Na Figura 10 é apresentado a vista aérea do empreendimento, evidenciando a planta fotovoltaica, a subestação híbrida abrigada e, ao fundo e os componentes do BESS.

Figura 10 - Vista aérea da planta híbrida da Chesf em Casa Nova – BA

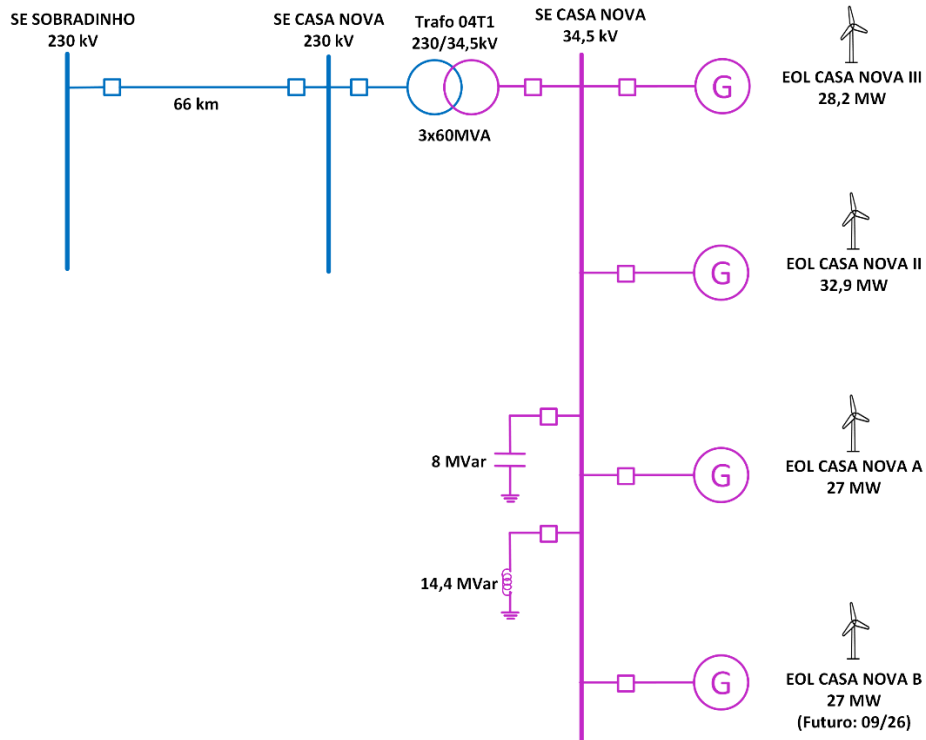


Fonte: Arquivo Eletrobras Chesf [39].

O parque Eólico Casa Nova A, composto por dezoito aerogeradores de 1,5 MW cada, totalizando 27 MW de capacidade instalada. A rede coletora em 34,5 kV converge para a Subestação Casa Nova II 230/34,5 kV, que se conecta radialmente ao barramento de 230 kV da SE Sobradinho, integrando-o ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

A visão geral do diagrama unifilar do sistema Casa Nova é evidenciado na Figura 11, no qual pode-se observar a interligação entre os parques eólicos e a Subestação Sobradinho 230 kV.

Figura 11 - Diagrama unifilar simplificado do sistema Casa Nova (230 kV – 34,5 kV)



Fonte: O autor (2025), adaptado de [38]

Para análise da hibridização da planta, foi proposto e implantado um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento regulado pela ANEEL e conduzido pela Eletrobras Chesf, com o objetivo de avaliar a operação coordenada entre as fontes renováveis e o BESS.

Na sequência, a Figura 12 mostra a modelagem elétrica completa do Parque Eólico Casa Nova A e da Planta Híbrida, a partir das representações dos diagramas oficiais da Gerência de Normatização e Tempo Real, Eletrobras Chesf [40], [41], seguindo o padrão cores e de codificação definido pela Instrução Normativa - Chesf [42], conforme a Tabela 2. Essa representação serviu de base para a modelagem computacional do arranjo físico empregada nas análises de fluxo de potência e curto-circuito.

A relação de transformação de cada equipamento foi especificada conforme o nível de tensão nominal de cada subsistema: 0,69/34,5 kV para o BESS, 0,6/34,5 kV para a planta fotovoltaica e 0,38/34 kV para a carga RLC. [43], [44], [45].

Os valores de impedância informados nos dados de placa dos transformadores da SE Híbrida atendem ao limite máximo de 14% estabelecido pelos Procedimentos de Rede do ONS, Submódulo 2.6 – Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos (item 4.1.5.1) [46]. Para fins de modelagem computacional, os parâmetros foram convertidos para a base de 100 MVA utilizada nos programas computacionais ANAREDE e ANAFAS. A consolidação completa dos dados de placa, das conversões de base e dos cartões de modelagem dos transformadores da SE Híbrida, encontra-se apresentada no Apêndice C.

4.1.2 Carga RLC

A carga RLC utilizada na modelagem da planta híbrida de Casa Nova foi especificada no âmbito do Projeto de P&D “Desenvolvimento de Carga Teste RLC para Microrredes”, coordenado pelo Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em parceria com a JPW, no contexto da implantação experimental da microrrede da Subestação Casa Nova II - Chesf [47].

Este equipamento foi projetado para ensaios em regime permanente e transitório de sistemas híbridos, permitindo reproduzir condições reais de carga e avaliar o desempenho das fontes eólica, fotovoltaica e do sistema de armazenamento (BESS) durante operação conectada ou ilhada.

A carga é composta por três conjuntos independentes, resistivo, indutivo e capacitivo (RLC) moduláveis em degraus, com tensão nominal de 380 V, frequência de 60 Hz e potência total de 1,6 MVA. O conjunto é instalado em container marítimo abrigado, com sistema de ventilação forçada, proteções térmicas e elétricas automáticas, e monitoramento remoto via sistema de supervisão do micro rede [47].

Tabela 3 - Dados Nominais da Carga RLC

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Potência total aparente	S	1600	kVA
Potência ativa (R)	P_r	1285	kW
Potência reativa indutiva (L)	Q_{In}	960	kVAr
Potência reativa capacitiva (C)	Q_{cap}	960	kVAr
Fator de potência ajustável	$\cos(\varphi)_{ajust}$	0,8011 (indutivo ↔ capacitivo)	—
Tensão AC Nominal	V_{ac}	380	V
Frequência nominal	f	60	Hz
Fornecedores principais	—	Resistores: Denktherm / Indutores: SP Trafo / Capacitores: WEG	—

Fonte: UFPE; JPW Engenharia Ltda [47].

Composição Modular: Segundo a especificação básica elaborada pela UFPE, a carga é formada por 48 módulos independentes, permitindo variação controlada de potência e fator de potência.

A modulação final proposta é a seguinte:

- **Resistivas** (18 módulos – 1285 kW): 1×5 kW; 1×10 kW; 2×20 kW; 2×50 kW; 1×60 kW; 1×70 kW; 10×100 kW.
- **Indutivas** (15 módulos – 960 kVAr): 2×5 kVAr; 1×10 kVAr; 2×20 kVAr; 2×50 kVAr; 8×100 kVAr.
- **Capacitivas** (15 módulos – 960 kVAr): 2×5 kVAr; 1×10 kVAr; 2×20 kVAr; 2×50 kVAr; 8×100 kVAr.

Essa modularidade garante flexibilidade operacional e reduz custos de manutenção, além de facilitar a simulação de múltiplos cenários de carga nos estudos da rede.

A carga RLC constitui elemento experimental essencial à modelagem da planta híbrida de Casa Nova, fornecendo flexibilidade para representar diferentes condições

de demanda ativa e reativa em regime permanente. Sua especificação e construção seguem o padrão de engenharia da Chesf e as diretrizes técnicas da UFPE [47].

A representação elétrica da carga RLC adotada neste estudo foi implementada tanto no ANAREDE quanto no ANAFAS, exigindo diferentes abordagens para a modelagem dos módulos resistivos, indutivos e capacitivos. A descrição metodológica completa está apresentada de forma consolidada nos Apêndices D e E.

4.1.3 Planta Fotovoltaica (FV)

O subsistema Fotovoltaico (FV) que compõe a usina híbrida de Casa Nova – BA foi projetado e comissionado pela HUGreen. O sistema está conectado ao barramento de 34,5 kV da Subestação Casa Nova II, compartilhando a interface com o parque eólico e o sistema de armazenamento (BESS). [48].

A planta FV é composta por oito inversores *Sungrow* SG125HV, cada um com potência nominal de 125 kVA, resultando em potência total instalada de 1 MVA. A potência CC dos módulos é de aproximadamente 1000 kWp, formada por módulos *JA Solar* 540 Wp, montados sobre seguidores solares (*trackers*) *ARCTECH Skyline*, otimizados para a latitude local. [48].

Na Tabela 4 é indicado os principais dados de placa do Inversor SG125HV, parâmetros utilizados nos estudos da Planta Híbrida.

Tabela 4 - Dados de Placa dos Inversores Sungrow SG125HV

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Potência de Saida (AC)	S	125	kVA
Corrente máx. de curto-circuito	$I_{máx}$	120	A
Tensão AC Nominal	V_{ac}	0,6	kV
Fator de potência nominal	$\cos(\varphi)_{nom}$	> 0,99	—
Fator de potência ajustável	$\cos(\varphi)_{ajust}$	0,8 (adiantado) a 0,8 (atrasado)	—
Eficiência máxima	η	98,9	%

Tipo de controle	—	GFL (Grid - Following)	—
------------------	---	------------------------	---

Fonte: O Autor, adaptado do Manual do Usuário – Inversor SG125HV [49].

De acordo com o manual técnico do inversor *Sungrow* SG125HV [49], o equipamento possui fator de potência nominal superior a 0,99 quando operando em plena carga, o que assegura operação praticamente unitária sob potência máxima. Entretanto, o inversor permite ajuste de fator de potência na faixa 0,8 adiantado a 0,8 atrasado, dessa forma:

$$P = S \times FP \quad (4.1)$$

$$P = 125 \text{ k} \times 0,8$$

$$P = 100 \text{ kW}$$

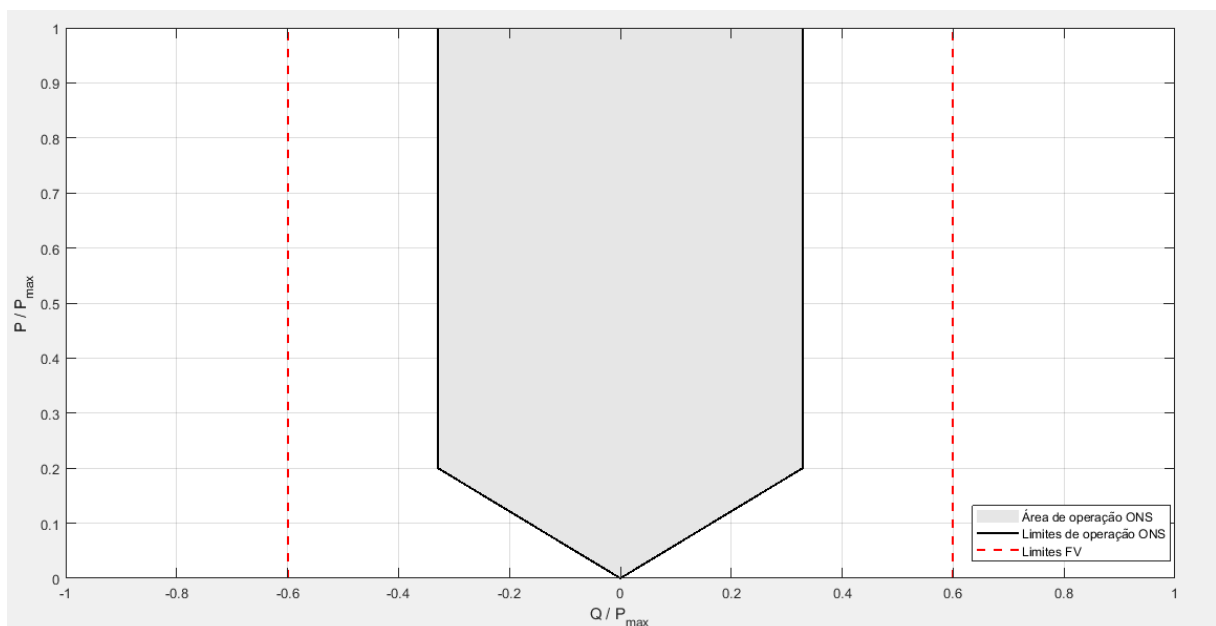
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.2)$$

$$Q = \sqrt{125k^2 - 100k^2}$$

$$Q = 75 \text{ kvar}$$

Assim, quando operando em fator de potência ajustável a planta fotovoltaica completa (8 inversores) apresenta capacidade de controle reativo de $\pm 600 \text{ kvar}$.

Figura 13 - Curva PQ de Operação dos Inversores FV e Faixa Exigida pelo ONS



Fonte: O Autor, adaptado dos Procedimentos de Rede/ONS [22].

A Figura 13 apresenta a curva PQ obtida a partir dos dados de placa dos inversores e dos parâmetros nominais de operação. Observa-se que a faixa de operação da planta se encontra totalmente contida dentro da área de conformidade com os limites mínimos exigidos pelo Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede do ONS [22].

4.1.4 Aerogerador 18

O aerogerador integrante da Planta Híbrida também compõe o parque eólico de Casa Nova A. Historicamente esses aerogeradores são de projeto Vensys e fabricação IMPSA, modelo IV-82 de 1,5 MW. No entanto, os conversores utilizados são de fabricação Goldwind, que em 2008 tornou-se acionista majoritária da Vensys, sendo assim, detentora da tecnologia e licenciamento da Vensys. Devido ao fato de haver mais de um fabricante envolvido na construção dos aerogeradores, convencionou-se a utilização da identificação do aerogerador como sendo IMPSA - IV-82, que foi a fabricante do gerador [38].

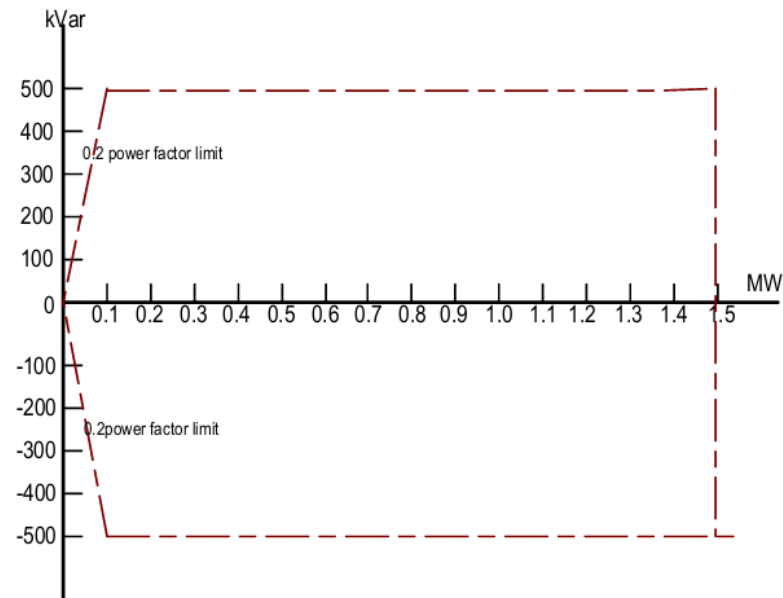
Tabela 5 - Dados Técnicos do Aerogerador IMPSA IV-82 / 1,5 MW

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Potência nominal	P_{nom}	1,5	MW
Tensão AC Nominal	V_{ac}	0,62	kV
Corrente máx. de curto-circuito	$I_{máx}$	1600	A
Frequência	f	60	Hz
Fator de potência nominal	$\cos(\varphi)_{nom}$	1	—
Fator de potência ajustável	$\cos(\varphi)_{ajust}$	0,90 ind. ↔ 0,90 cap.	—
Potência reativa nominal	Q_{max}	±0,5	MVAr
Tipo de controle	—	GFL (Grid - Following)	—

Fonte: O autor, adaptado do *Goldwing Grid Connection Performance Report* [50].

A Figura 14, mostra a curva PQ do aerogerador, com base nos dados do relatório *Goldwind – Grid Connection Performance* [50], que define os limites de operação de potência ativa e reativa para diferentes condições de despacho.

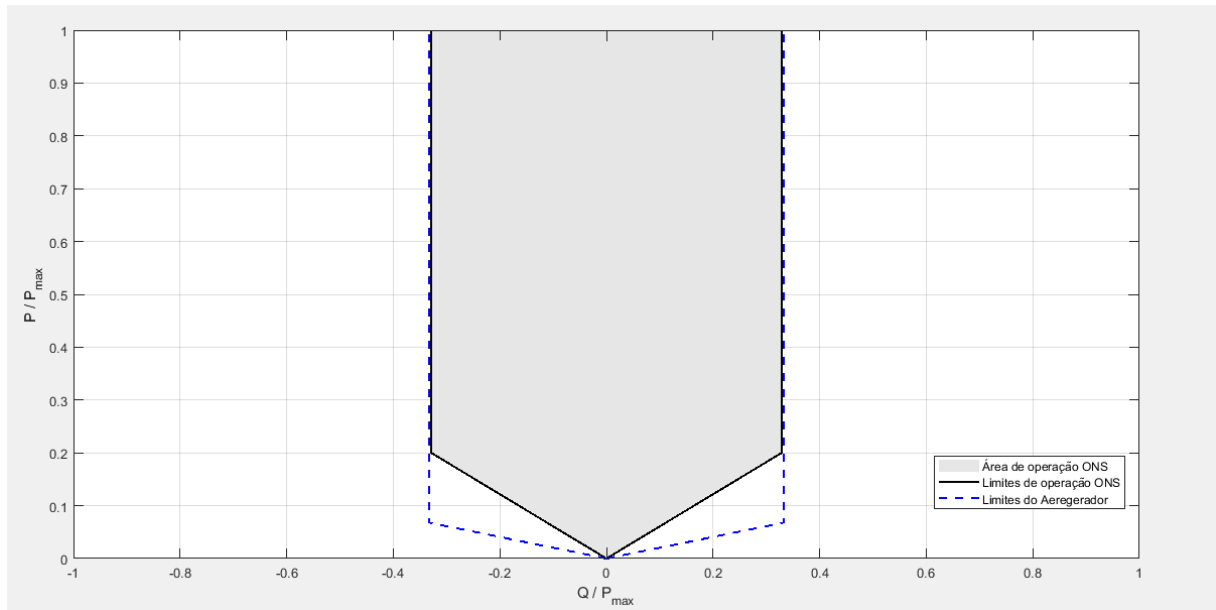
Figura 14 - Curva P–Q do Aerogerador IMPSA IV-82 / 1,5 MW



Fonte: *Goldwing Grid Connection Performance Report* [50].

Da mesma forma que a curva PQ da FV, é possível analisar que a curva PQ do aerogerador atende ao Procedimento de Rede do ONS [22]:

Figura 15 - Curva PQ de Operação do Aerogerador IMPSA IV-82 e Faixa Exigida pelo ONS



Fonte: O Autor, adaptado dos Procedimentos de Rede/ONS [22].

4.1.5 BESS – Sistema de Armazenamento

O BESS instalado na Planta Híbrida, possui capacidades de 1000 kW / 1404 kWh, foi dimensionado a partir dos estudos conduzidos pelo SENAI CIMATEC e pela Chesf, que indicou uma melhor atenuação no controle de *Constrained-off* da SGH alinhado com o melhor retorno financeiro [51].

A instalação e comissionamento do BESS da SGH foi realizado pela Acumuladores Moura. De acordo com o Relatório de Comissionamento da empresa [52], o BESS instalado na SGH de Casa Nova é composto por:

- PCS (*Power Conversion System*) modelo BCS1250K-B-HUD, bidirecional, trifásico;
- 04 racks de baterias CATL, totalizando 1404 kWh de energia nominal;
- Sistema de gerenciamento BMS/SEM;
- Painel de controle (PNCLP) e rack de telecomunicações;
- Transformador auxiliar de 60 kVA (690/380 V).

Na Figura 16 pode-se observar a distribuição desses componentes na SGH:

Figura 16 - Distribuição geral dos componentes do BESS de Casa Nova



Fonte: Relatório de Comissionamento do Sistema BESS Casa Nova/Moura [52]

Tabela 6 - Principais características técnicas do BESS Casa Nova

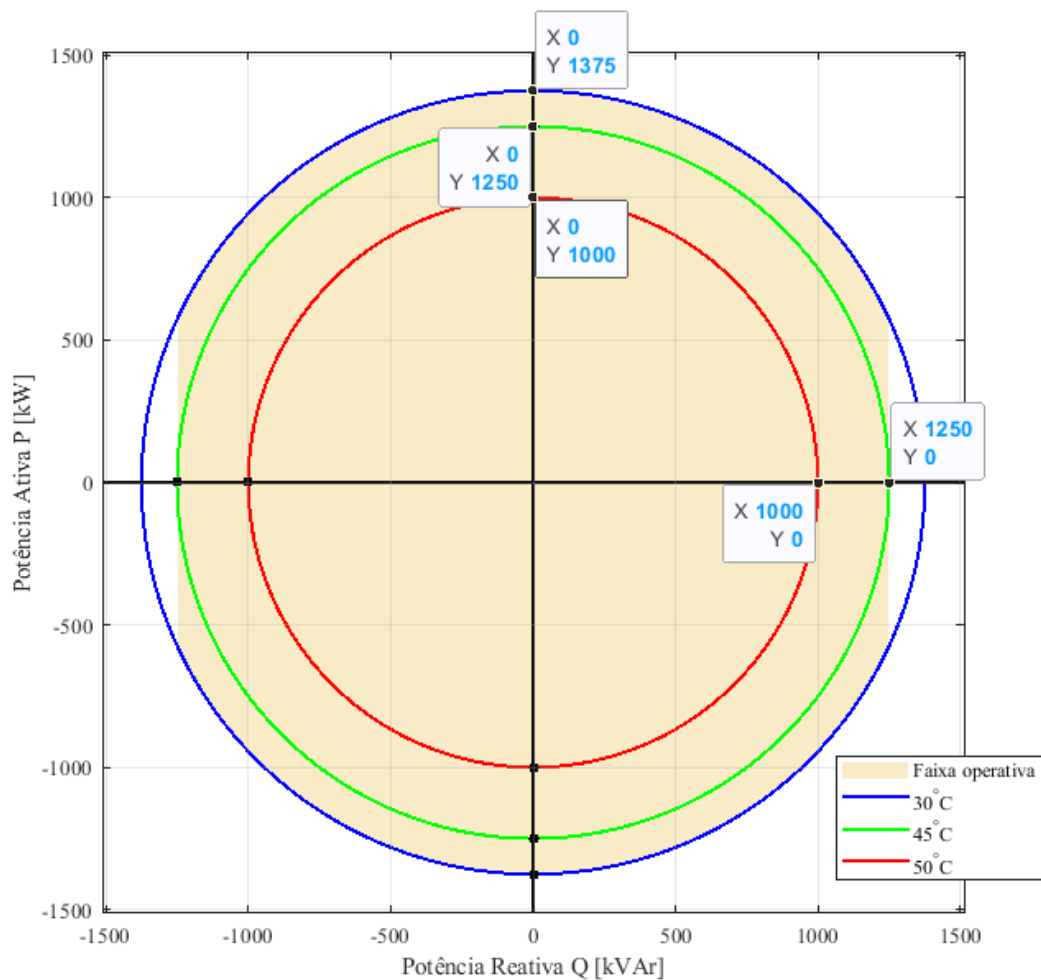
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Potência nominal do PCS	S_{nom}	1250	kVA
Potência ativa nominal	P_{nom}	1000	kW
Energia nominal	E_{nom}	1404	kWh
Tensão AC nominal	V_{AC}	0,69	kV
Corrente máx. de curto-circuito	$I_{máx}$	1046	A
Frequência	f	50/60	Hz
Fator de potência nominal	$\cos(\varphi)_{nom}$	>0,99	—
Fator de potência ajustável	$\cos(\varphi)_{ajust}$	1 ind. \leftrightarrow 1 cap.	—
Tecnologia das células	—	LFP (LiFePO ₄)	—
Tipo de controle	—	GFM (Grid - Forming)	—

Fonte: Adaptado, [52], [53], [54]

Faixa operativa de potência e curva PQ:

A curva de capacidade do BESS, observada na Figura 17, foi elaborada com base nas especificações da curva PQ do modelo Kehua BCS1750K [55], pertencente à mesma família do modelo instalado em Casa Nova (BCS1250K-B-HUD), utilizando os dados do catálogo da fabricante [53]. O gráfico foi desenvolvido em MATLAB (Versão Online) [56] e representa a capacidade bidirecional do conversor nos quatro quadrantes de operação, com a faixa de potência ativa e reativa variando de acordo com diferentes temperaturas de operação do PCS.

Figura 17 - Curva PQ de operação do PCS do BESS em Casa Nova



Fonte: O autor (2025)

4.1.6 Caracterização Operacional da Planta Híbrida a partir de Dados Reais de Operação

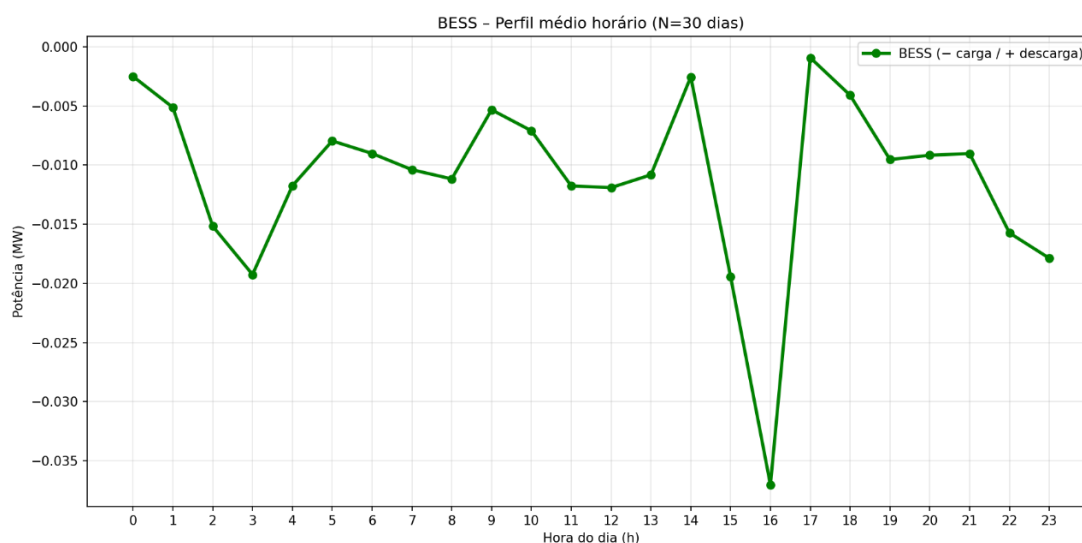
Os dados de operação utilizados neste trabalho foram obtidos em conjunto com a equipe do SENAI CIMATEC, responsável pelo acompanhamento e pela operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Os registros originais encontram-se em resolução temporal de um minuto e contemplam medições simultâneas da geração eólica, da geração fotovoltaica e da operação do sistema de armazenamento.

Para fins de análise operacional, os dados foram processados em ambiente Python e organizados por dia de operação, de modo a permitir a caracterização do comportamento típico da planta ao longo de um ciclo diário. A seleção dos dias analisados foi realizada por meio de um critério de representatividade, baseado na similaridade do perfil diário da potência total da planta, conforme a metodologia implementada no código desenvolvido.

Cenário 1 – Operação típica com 30 dias representativos

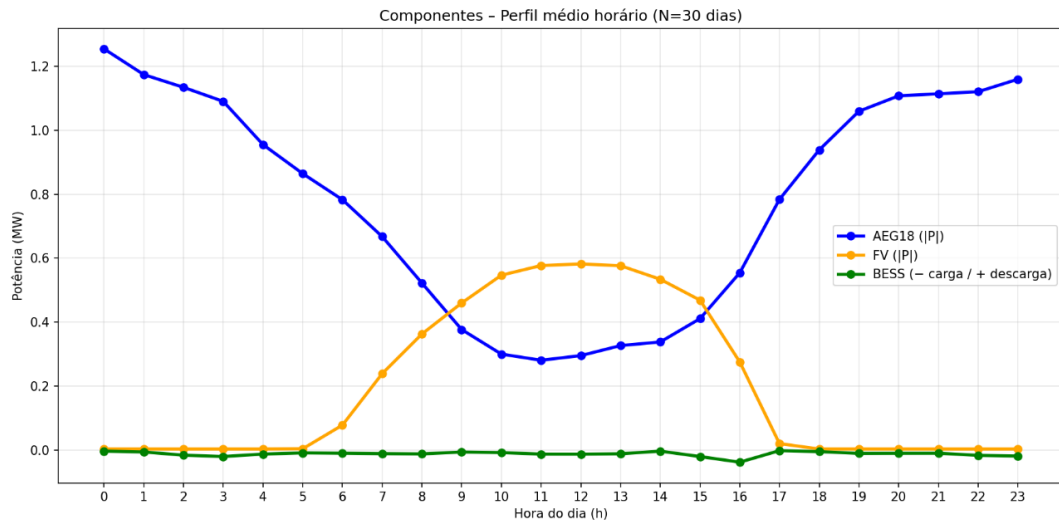
Conjunto formado pelos 30 dias mais representativos do comportamento operacional da planta, obtidos a partir do critério de similaridade do perfil diário da potência total.

Figura 18 - BESS – Perfil médio horário (Cenário 1 – 30 dias representativos)



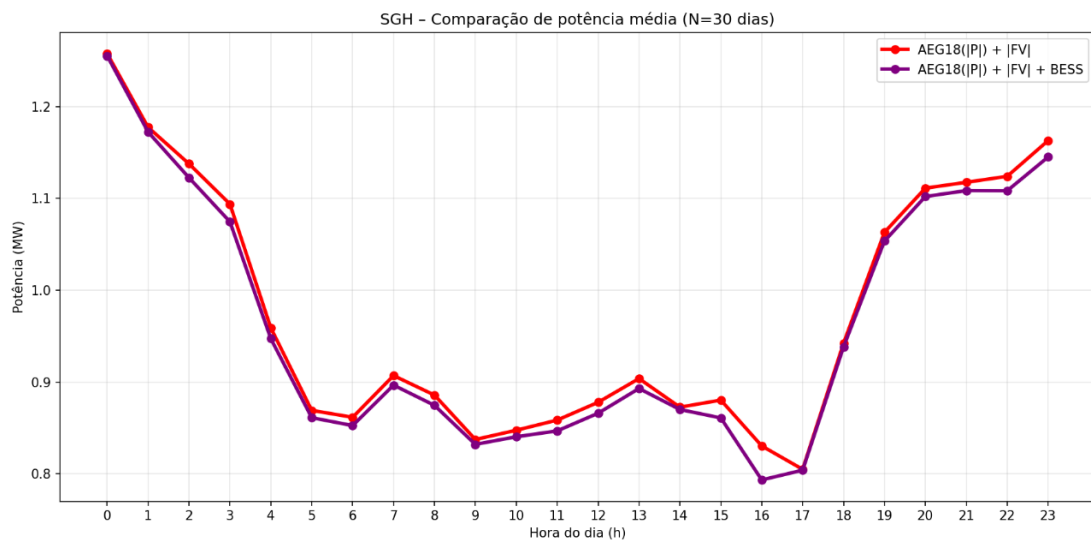
Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Figura 19 - Componentes da Planta Híbrida – Perfil médio horário (Cenário 1 – 30 dias representativos)



Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Figura 20 - Comparação de potência média (Cenário 1 – 30 dias representativos)



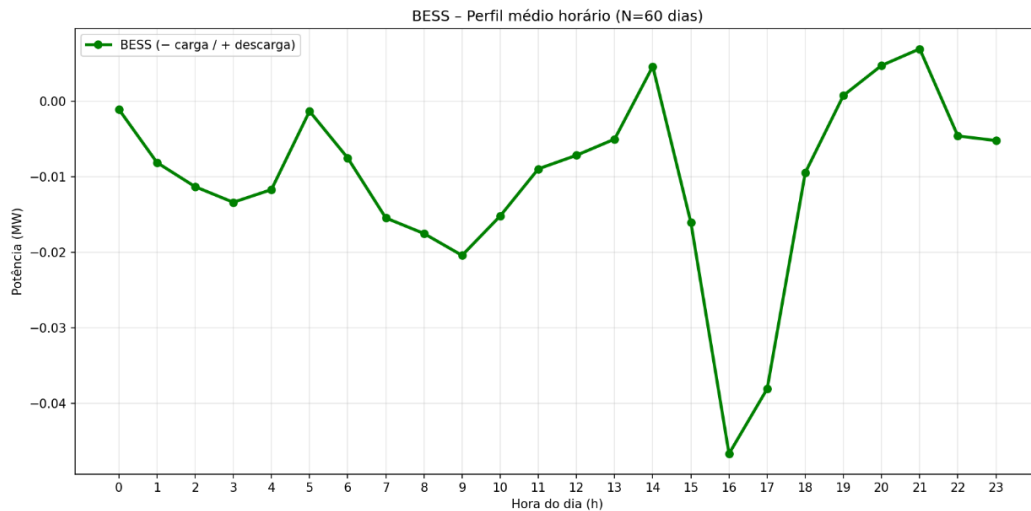
Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Observa-se que o conjunto de 30 dias representativos já permite identificar o comportamento típico diário da planta híbrida, evidenciando a complementaridade entre a geração eólica e fotovoltaica, bem como a atuação do BESS na suavização do perfil de potência total, especialmente nos períodos de maior variabilidade das fontes renováveis.

Cenário 2 – Operação típica com 60 dias representativos

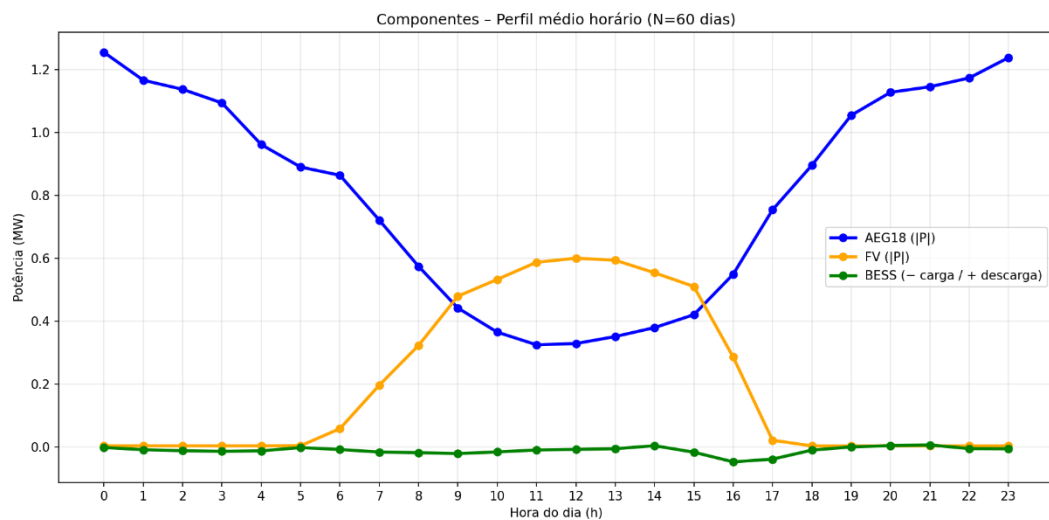
Conjunto formado pelos 60 dias mais representativos do comportamento operacional da planta.

Figura 21 - BESS – Perfil médio horário (Cenário 2 – 60 dias representativos)



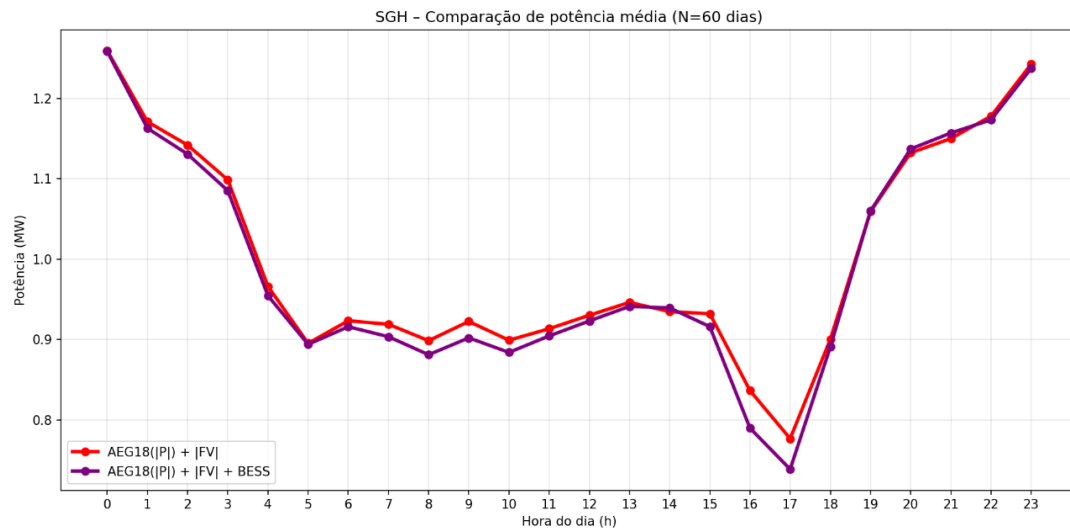
Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Figura 22 - Componentes da Planta Híbrida – Perfil médio horário (Cenário 2 – 60 dias representativos)



Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Figura 23 - Comparação de potência média (Cenário 2 – 60 dias representativos)



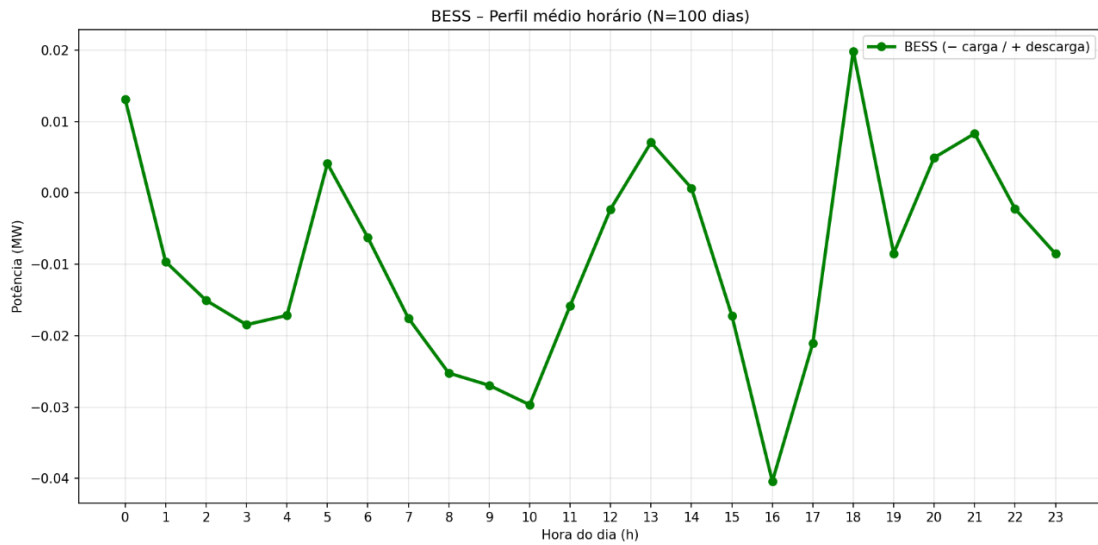
Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Com a ampliação do número de dias considerados, o Cenário 2 apresenta perfis médios horários mais suaves, indicando maior convergência em relação ao comportamento médio da planta. A atuação do BESS mantém-se consistente ao longo do dia, reforçando seu papel no suporte à estabilidade da potência injetada pela planta híbrida.

Cenário 3 – Operação típica com 100 dias representativos

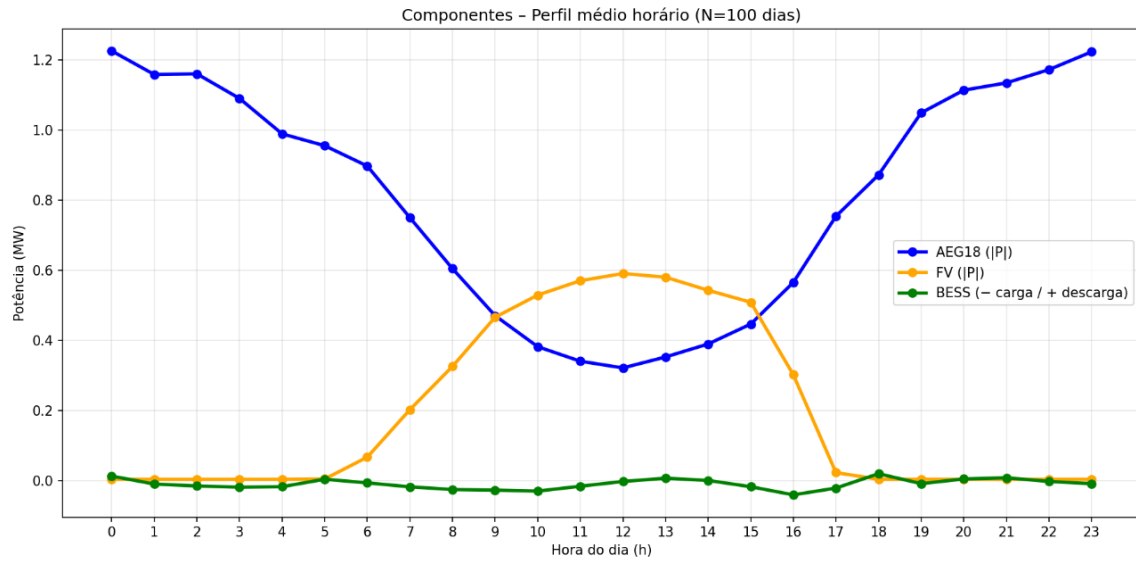
Conjunto formado pelos 100 dias mais representativos do comportamento operacional da planta.

Figura 24 - BESS – Perfil médio horário (Cenário 3 – 100 dias representativos)



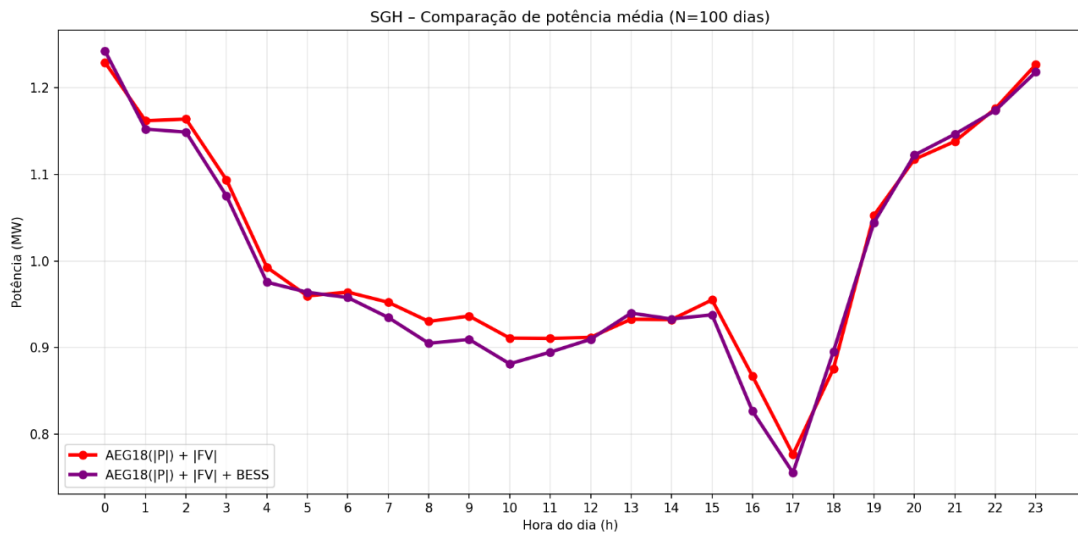
Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Figura 25 - Componentes da Planta Híbrida – Perfil médio horário (Cenário 3 – 100 dias representativos)



Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

Figura 26 - Comparação de potência média (Cenário 3 – 100 dias representativos)



Fonte: Dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. Elaboração própria a partir de processamento em ambiente Python

No Cenário 3, correspondente a 100 dias representativos, os perfis médios horários refletem de forma mais consolidada o comportamento operacional da planta híbrida, com menor influência de variações pontuais. Esse cenário pode ser interpretado como uma representação robusta do regime típico de operação da planta ao longo do período analisado.

A caracterização operacional apresentada nesta seção complementa a descrição da rede em estudo ao incorporar dados reais de operação da planta híbrida eólico-solar com BESS. A análise dos diferentes cenários evidencia a convergência dos perfis médios horários à medida que o número de dias considerados é ampliado, estabelecendo uma base consistente para a interpretação dos estudos de simulação desenvolvidos nos capítulos subsequentes.

4.2 METODOLOGIA

Os estudos elétricos foram conduzidos utilizando os programas ANAREDE (versão 12.0.1 – multiusuário) e ANAFAS (versão 7.6.3 – multiusuário), ambos desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). O acesso a essas ferramentas foi realizado por meio de licença institucional da Eletrobras Chesf, viabilizada através do estágio do autor junto à empresa.

O ANAREDE foi empregado para as análises de fluxo de potência em regime permanente, enquanto o ANAFAS foi utilizado para o cálculo das correntes de curto-circuito trifásico e assimétrico.

O caso de estudo adotado corresponde ao Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo (PAR/PEL) 2024, Verão 2029/2030 Máxima Diurna – NE Exportador, disponibilizado pelo ONS através do Portal SINtegre [57]. Esse caso representa o comportamento esperado do Sistema Interligado Nacional (SIN) em horizonte de médio prazo, destacando o escoamento de potência da Região Nordeste em direção às demais regiões do país.

A escolha desse caso se justifica pela sua relevância técnica, visto que reproduz as condições operativas de um sistema com elevada penetração de fontes renováveis variáveis (eólica e solar), de forma análoga à realidade da Planta Híbrida de Casa Nova – BA, onde se insere a Usina Eólica Casa Nova B (27 MW, previsão de operação em 2026), conectada ao barramento de 34,5 kV da Subestação Sobradinho e representada nas simulações realizadas.

A metodologia adotada compreendeu duas etapas principais:

- Simulação de fluxo de potência, com o objetivo de avaliar o perfil de tensões, carregamentos e transferências de potência ativa e reativa nos principais corredores do sistema elétrico regional;
- Simulação de curto-circuito, destinada à determinação das correntes de falta trifásica e monofásica em pontos estratégicos, verificando o impacto do sistema de armazenamento (BESS) na suportabilidade e seletividade da rede.

4.3 PREMISSAS

As premissas adotadas nos estudos elétricos seguiram as recomendações estabelecidas no Submódulo 2.3 - Premissas, Critérios e Metodologia para Estudos Elétricos do ONS [58], [59].

Esse documento estabelece as condições de modelagem, os parâmetros de referência e os limites operativos a serem observados nos estudos de regime permanente e transitório do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Para este trabalho, as premissas foram organizadas conforme a natureza dos estudos realizados, sendo apresentadas separadamente para os casos de fluxo de potência e curto-circuito.

4.3.1 Premissas para o Estudo de Fluxo de Potência

O estudo de fluxo de potência tem por objetivo avaliar o comportamento elétrico do sistema em regime permanente, verificando o perfil de tensões, os carregamentos dos equipamentos e o intercâmbio de potência ativa e reativa entre os barramentos.

De acordo com as diretrizes do Submódulo 2.3 [59], foram adotadas as seguintes condições de modelagem:

- As cargas foram representadas com 100% de potência constante (P e Q), assumindo-se operação em regime permanente;
- Os limites de carregamento das linhas de transmissão, transformadores e autotransformadores seguiram os valores definidos nos Cadastros de Limites Operacionais (CD-CT) e nos Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST);
- As tensões de referência foram mantidas em 1,0 p.u. nas barras controladas, com atuação automática dos reguladores de tensão das unidades geradoras;
- As simulações foram conduzidas para a condição de carga pesada, representando o cenário mais crítico de operação do sistema.

O modelo de simulação contemplou a Planta Híbrida de Casa Nova – BA, composta pela carga RLC, geração eólica, fotovoltaica e pelo Sistema de Armazenamento por Baterias (BESS).

As curvas PQ e os limites de potência ativa e reativa foram definidos com base nas especificações técnicas e nos limites de intercâmbio do barramento de 34,5 kV da Subestação Sobradinho.

Essas premissas asseguram que o estudo de fluxo de potência reproduza as condições operativas estabelecidas pelo ONS, garantindo comparabilidade com os resultados oficiais do Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo (PAR/PEL).

4.3.2 Premissas para o Estudo de Curto-Circuito

O estudo de curto-circuito tem como finalidade determinar as correntes de falta em diferentes pontos do sistema, avaliando a suportabilidade dos equipamentos e a seletividade da proteção.

As premissas adotadas seguiram os critérios definidos nos Procedimentos de Rede do ONS [58] e considerando os aspectos técnicos utilizados no manual do ANAFAS [30] para as simulações:

- $I_{m\acute{a}x}$: Valor máximo de corrente que pode ser injetado pelo conversor, em ampéres rms.
- Modelagem da rede: representação completa em sequência positiva, negativa e zero, conforme o Teorema de Fortescue;
- Tipos de faltas analisadas: monofásico, trifásico e bifásico-terra.

Adicionalmente, em virtude da ausência de dados de impedância de sequência zero nos catálogos dos transformadores e demais componentes da planta híbrida, adotou-se a premissa $Z_0 = Z_1$ para a modelagem das impedâncias no ANAFAS. Garantindo consistência entre as redes equivalentes representadas. Tal premissa foi aplicada uniformemente aos transformadores, a carga RLC e aos elementos associados ao BESS e a FV.

Essas premissas garantem que o estudo de curto-circuito reproduza as condições operativas e normativas, permitindo avaliar de forma precisa o impacto da inserção do

BESS na rede elétrica regional e a compatibilidade de sua operação com os critérios de proteção vigentes.

4.4 SIMULAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Para a realização das simulações, foram ajustados os parâmetros de operação e modelagem de acordo com as características elétricas da planta e as recomendações do Submódulo 2.3 – Critérios dos Procedimentos de Rede do ONS [58].

Para definir um cenário inicial o transformador elevador 34,5/230 kV da SE Casa Nova II teve seu TAP ajustado para 0,97, de modo a garantir que o barramento de 34,5 kV operasse próximo a 1,0 p.u.

A curva PQ do conversor PCS do BESS, Figura 17, foi definida para a faixa de temperatura de 50°C, representando o cenário mais conservador de operação reativa, no qual os limites de potência ativa e reativa são simultaneamente restritivos. Essa escolha permite avaliar o desempenho do sistema em uma condição de operação segura e tecnicamente mais desafiadora.

As usinas eólicas Casa Nova II e Casa Nova III foram consideradas operando em sua injeção máxima de potência ativa combinada de 61,1 MW, conforme o ponto de maior despacho observado no caso de referência. A Usina Eólica Casa Nova B, com capacidade instalada de 27 MW e previsão de operação para setembro de 2026, foi incluída na modelagem a fim de representar a futura topologia do complexo eólico, conectada ao barramento de 34,5 kV da SE Sobradinho.

O BESS foi modelado com capacidade de operação bidirecional, permitindo simular tanto condições de injeção quanto de absorção de potência ativa e reativa. A modelagem detalhada do BESS adotada no ANAREDE, incluindo os cartões utilizados, é apresentada no **Apêndice A**.

4.4.1 Casos de Estudo para Avaliação do Desempenho do BESS

O conjunto de simulações desenvolvido neste trabalho tem como finalidade analisar o impacto da operação do BESS no desempenho elétrico da planta híbrida e na interação com o parque eólico Casa Nova A, foram definidos diferentes cenários representativos das condições de operação do sistema, abrangendo situações com e

sem a atuação do BESS e variações na sua injeção ou absorção de potência ativa e reativa nos parâmetros de sua curva PQ, conforme foram indicados na Figura 17.

Os casos têm por objetivo identificar eventuais benefícios ou restrições decorrentes da operação do BESS, considerando os Procedimentos de Rede do ONS [22], [58] especialmente quanto aos limites de tensão, suporte reativo e comportamento no PAC. A comparação entre os cenários permite avaliar de forma objetiva a contribuição do BESS para a estabilidade de tensão e para a operação coordenada da planta híbrida.

A seguir, apresentam-se os casos simulados, incluindo a descrição dos parâmetros de cada situação e as tabelas com dados correspondente com os níveis de tensão nos barramentos da Planta Híbrida e barramentos próximos da rede. As figuras completas correspondentes aos resultados das simulações de fluxo de potência, incluindo perfis de tensão e fluxos de potência PQ para os quatro casos estudados, encontram-se disponibilizadas no **Anexo A**.

Caso 1 - Condição Operativa sem o BESS:

Este caso representa a condição base de operação da planta híbrida, sem contribuição do Sistema de Armazenamento de Energia (BESS). O objetivo é estabelecer um cenário de referência que permita avaliar, de forma comparativa, o impacto da inserção do BESS nos casos subsequentes. A partir desta condição, são analisados os níveis de tensão das barras de baixa e média tensão da SGH e do aerogerador 17, verificando-se o atendimento aos limites operativos definidos no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS (0,95 a 1,05 pu em regime permanente) [58].

Tabela 7 - Caso 1. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	98106	1.000
Aerogerador 18	98107	1.000
Usina FV	98122	0.997
Usina FV (geração)	98123	1.000
Carga RLC	98128	0.994

Fonte: O autor (2025).

Tabela 8 - Caso 1. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	99106	1.001
Aerogerador 18	99107	1.001
SE Híbrida	99121	1.001
Usina FV	99122	1.001
Carga RLC	99128	1.001
SE Casa Nova II (34,5 kV)	5742	1.000
SE Casa Nova II (230 kV)	5739	0.992
SE Sobradinho (230 kV)	6301	1.000

Fonte: O autor (2025).

Tabela 9 - Caso 1. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida

De (Barra)	Para (Barra)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	FP	Região
99121	99106	1,2	-0,7	0,86	SE Híbrida
5742	5739	112,9	-27,1	0,97	SE Casa Nova II (34,5 kV)
5739	6301	-111,2	34	-0,96	SE Sobradinho (230 kV)

Fonte: O autor (2025).

Os resultados do caso base indicam que, na ausência do BESS, a planta híbrida opera dentro das condições de normalidade estabelecidas pelo Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS [58], com todas as tensões estabelecidas na faixa de 0,95 a 1,05 pu e o fator de potência no PAC de 0,96 indutivo em conformidade com Submódulo 2.10 [22].

Para as demais barras da vizinhança do sistema SGH, seus parâmetros poderão ser vistos na Figura 35 apresentada no ANEXO A.

Caso 2 - BESS injetando +1 MW de potência ativa:

Neste cenário, o Sistema de Armazenamento de Energia (BESS) opera em modo de descarga, injetando +1 MW de potência ativa ao sistema. Esta condição representa um estado típico de suporte ativo à planta híbrida, no qual o BESS contribui para o atendimento parcial da demanda interna e para a transferência de potência para o barramento de 34,5 kV de SE Híbrida. O objetivo deste caso é avaliar o impacto da injeção ativa do BESS sobre os níveis de tensão das barras na sua proximidade.

Tabela 10 – Caso 2. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	98106	1.000
Aerogerador 18	98107	1.000
Usina FV	98122	0.997
Usina FV (inversor)	98123	1.000
BESS	98124	0.997
BESS (Inversor)	98125	1.000
Carga RLC	98128	0.994

Fonte: O autor (2025).

Tabela 11 – Caso 2. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	99106	1.001
Aerogerador 18	99107	1.002
SE Híbrida	99121	1.001
Usina FV	99122	1.001
BESS	99124	1.001
Carga RLC	99128	1.001
SE Casa Nova II (34,5 kV)	5742	1.000
SE Casa Nova II (230 kV)	5739	0.992
SE Sobradinho (230 kV)	6301	1.000

Fonte: O autor (2025)

Tabela 12 - Caso 2. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida

De (Barra)	Para (Barra)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	FP	Região
99121	99106	2,2	-1	0,91	SE Híbrida
5742	5739	113,9	-27,2	0,97	SE Casa Nova II (34,5 kV)
5739	6301	-112,2	34,4	-0,96	SE Sobradinho (230 kV)

Fonte: O autor (2025)

Para as demais barras da vizinhança do sistema SGH, seus parâmetros poderão ser vistos na Figura 36, apresentada no ANEXO A.

Caso 3 – BESS absorvendo –1 MW (modo de carga):

Neste cenário, o Sistema de Armazenamento de Energia (BESS) opera em modo de carga, absorvendo –1 MW de potência ativa do sistema. Esta condição representa um estado típico no qual o BESS atua como carga adicional.

Tabela 13 - Caso 3. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	98106	1.000
Aerogerador 18	98107	1.000
Usina FV	98122	0.997
Usina FV (inversor)	98123	1.000
BESS	98124	1.003
BESS (Inversor)	98125	1.000
Carga RLC	98128	0.994

Fonte: O autor (2025)

Tabela 14 - Caso 3. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	99106	1.001
Aerogerador 18	99107	1.001
SE Híbrida	99121	1.001
Usina FV	99122	1.001
BESS	99124	1.001
Carga RLC	99128	1.001
SE Casa Nova II (34,5 kV)	5742	1.000
SE Casa Nova II (230 kV)	5739	0.992
SE Sobradinho (230 kV)	6301	1.000

Fonte: O autor (2025).

Tabela 15 - Caso 3. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida

De (Barra)	Para (Barra)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	FP	Região
99121	99106	0,2	-0,5	0,37	SE Híbrida
5742	5739	111,9	-27,1	0,97	SE Casa Nova II (34,5 kV)
5739	6301	-110,2	33,7	-0,96	SE Sobradinho (230 kV)

Fonte: O autor (2025).

Para as demais barras da vizinhança do sistema SGH, seus parâmetros poderão ser vistos na Figura 37, apresentada no ANEXO A.

Caso 4 – BESS fornecendo +1 MVar (suporte capacitivo):

Neste cenário, o Sistema de Armazenamento de Energia (BESS) opera fornecendo +1 *Mvar* ao sistema, atuando como elemento capacitivo para suporte de tensão. Essa condição representa a capacidade do BESS de elevar o módulo da tensão em suas barras de conexão através da injeção de potência reativa, contribuindo para a regulação de tensão local.

Tabela 16 - Caso 4. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	98106	1.000
Aerogerador 18	98107	1.000
Usina FV	98122	0.997
Usina FV (inversor)	98123	1.000
BESS	98124	1.041
BESS (Inversor)	98125	1.041
Carga RLC	98128	0.995

Fonte: O autor (2025).

Tabela 17 - Caso 4. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	99106	1.002
Aerogerador 18	99107	1.002
SE Híbrida	99121	1.002
Usina FV	99122	1.002
BESS	99124	1.002
Carga RLC	99128	1.002
SE Casa Nova II (34,5 kV)	5742	1.000
SE Casa Nova II (230 kV)	5739	0.992
SE Sobradinho (230 kV)	6301	1.000

Fonte: O autor (2025).

Tabela 18 - Caso 4. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida

De (Barra)	Para (Barra)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	FP	Região
99121	99106	1,2	0,2	0,99	SE Híbrida
5742	5739	112,9	-26,8	0,97	SE Casa Nova II (34,5 kV)
5739	6301	-111,2	33,7	-0,96	SE Sobradinho (230 kV)

Fonte: O autor (2025).

Para as demais barras da vizinhança do sistema SGH, seus parâmetros poderão ser vistos na Figura 38, apresentada no ANEXO A.

Caso 5 – BESS absorvendo –1 MVar (modo indutivo):

Neste cenário, o Sistema de Armazenamento de Energia (BESS) opera absorvendo -1 Mvar de potência reativa do sistema, atuando como elemento indutivo. Essa condição representa uma situação em que o BESS contribui para a redução do módulo de tensão em suas barras de conexão, permitindo avaliar o efeito da absorção de potência reativa sobre o perfil de tensão local.

Tabela 19 - Caso 5. Dados de Barra, Baixa Tensão (BT)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	98106	1.000
Aerogerador 18	98107	1.000
Usina FV	98122	0.997
Usina FV (inversor)	98123	1.000
BESS	98124	0.958
BESS (Inversor)	98125	0.958
Carga RLC	98128	0.993

Fonte: O autor (2025).

Tabela 20 - Caso 5. Dados de Barras, Média Tensão e Alta Tensão (MT – 34,5 kV; AT – 230 kV)

Nome	Número de Barra	Tensão (pu)
Aerogerador 17	99106	1.001
Aerogerador 18	99107	1.001
SE Híbrida	99121	1.001
Usina FV	99122	1.001
BESS	99124	1.001
Carga RLC	99128	1.000
SE Casa Nova II (34,5 kV)	5742	0.999
SE Casa Nova II (230 kV)	5739	0.992
SE Sobradinho (230 kV)	6301	1.000

Fonte: O autor (2025).

Tabela 21 - Caso 5. Fluxos PQ e fator de potência no PAC e ramos adjacentes da planta híbrida

De (Barra)	Para (Barra)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	FP	Região
99121	99106	1,2	-1,7	0,58	SE Híbrida
5742	5739	112,9	-27,4	0,97	SE Casa Nova II (34,5 kV)
5739	6301	-111,2	34,4	-0,96	SE Sobradinho (230 kV)

Fonte: O autor (2025).

Para as demais barras da vizinhança do sistema SGH, seus parâmetros poderão ser vistos na Figura 39, apresentada no ANEXO A.

4.4.2 Resultados obtidos na análise de fluxo de potência

A partir dos cenários simulados no ANAREDE, observou-se que a atuação do BESS, tanto em potência ativa quanto reativa, não provocou alterações significativas nos níveis de tensão no PAC – SE Sobradinho ou na SE Casa Nova II. Esse comportamento já era esperado, uma vez que a potência do BESS ($\pm 1 MW / \pm 1 MVar$) representa uma pequena fração do fluxo transferido pela Rede Básica, cuja ordem de grandeza supera 100 MW.

Em todos os casos, o fator de potência observado no PAC manteve-se em aproximadamente 0,96 indutivo, atendendo plenamente à faixa de operação estabelecida pelo Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede (0,95 indutivo a 1,0) [22]. Assim, as variações nos modos de operação do BESS (descarga, carga,

fornecimento ou absorção de reativos) não foram suficientes para alterar o FP visto pelo sistema no ponto de entrega.

A influência do BESS concentrou-se principalmente na Planta Híbrida, especialmente nas barras de baixa tensão associadas ao PCS. Nos casos de fornecimento reativo (+1 $MVar$), verificaram-se elevações de tensão locais de até 1,041 pu , enquanto a absorção reativa (−1 $MVar$) reduziu a tensão mínima para aproximadamente 0,958 pu . Esses valores, embora perceptíveis na BT, foram amplamente amortecidos na MT, onde os níveis de tensão permaneceram praticamente constantes (1,001 a 1,002 pu) em todos os cenários avaliados.

De forma geral, os resultados indicam que o BESS exerce impacto localizado na SGH, compatível com sua potência nominal, sem comprometer o atendimento aos limites de tensão definidos pelo ONS [58]. Além disso, a operação reativa do BESS demonstra capacidade efetiva de suporte de tensão local.

4.5 SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO

Para a realização das simulações foram utilizados os dados elétricos estabelecidos ao longo do Capítulo 4. Um dos parâmetros mais relevantes para a representação dos inversores nos estudos de curto-circuito é o valor máximo de corrente que cada equipamento pode injetar durante a falta. A Tabela 22 consolida os valores de $I_{máx}$ considerados para os principais componentes da planta híbrida.

Tabela 22 - Máxima corrente de injeção dos inversores da SGH

Componente	$I_{máx}$ (A)	Observação
FV	960	A instalação possui 8 inversores: $120 \times 8 = 960$
Aerogerador 18	1600	—
BESS	1046	—

Fonte: O autor (2025)

Representação do BESS no ANAFAS: Conforme o Submódulo 2.3, a modelagem das usinas eólicas em estudos de curto-circuito deve considerar a tecnologia empregada nos aerogeradores [58], o que inclui os sistemas baseados em conversores eletrônicos. O Manual do ANAFAS reforça essa diretriz ao recomendar a utilização do cartão **DEOL** – Dados de Gerador Eólico Síncrono, destinado à representação de equipamentos que, durante uma falta, se comportam como fontes de corrente de sequência positiva [30].

Embora o PCS do BESS opere em modo GMF em regime permanente, assumindo comportamento de fonte de tensão controlada, ainda não existe no ANAFAS uma modelagem específica para esses conversores. Assim, a utilização do cartão **DEOL** constitui a abordagem mais aderente à topologia do equipamento e ao comportamento real do PCS durante faltas, no qual sua contribuição permanece limitada pela corrente máxima definida pelo fabricante. A modelagem detalhada do BESS adotada no ANAFAS, incluindo os cartões utilizados, é apresentada no **Apêndice B**.

4.5.1 Casos de Estudo para Avaliação do Desempenho do BESS

O conjunto de simulações de curto-circuito desenvolvido neste trabalho tem como finalidade quantificar a influência do BESS, nos níveis de corrente de falta da Planta Híbrida, da Usina Eólica Casa Nova A e no PAC. Para isso, foram definidos três cenários representativos, permitindo identificar os níveis de curto circuito trifásico, monofásico e bifásico - terra.

A comparação dos três cenários permite identificar a variação dos níveis de curto-circuito, fornecendo uma visão objetiva do impacto incremental do BESS. O diagrama unifilar e relatórios completos correspondente às simulações encontram-se reunidos no **Anexo B**.

Caso 1 – Sistema sem a Planta Híbrida:

Este primeiro cenário, representa a condição de referência do sistema, considerando apenas a rede da Chesf sem a conexão da Planta Híbrida ao Parque Eólico de Casa Nova A. Esse cenário permite identificar os níveis de curto-circuito naturais do sistema elétrico no PAC e nas barras da SE Casa Nova II, servindo como base comparativa para avaliar o impacto provocado pela inserção das unidades geradoras e do BESS nos casos subsequentes.

Tabela 23 - Caso 1. Níveis de curto-circuito nas barras do sistema

Nome	Número (Barra)	Tensão (kV)	Níveis de Curto-Circuito		
			Trifásico (kA)	Monofásico (kA)	Bifásico-Terra (kA)
SE Sobradinho (PAC)	6301	230	21,54	21,24	21,47
SE Casa Nova II	5742	34,5	11,27	4,61	10,39
	5739	230	3,26	3,71	3,69
Eólica Casa Nova B	95742	34,5	10,74	4,29	9,86
Eólica Casa Nova II	92200	34,5	11,25	4,6	10,36
Eólica Casa Nova III	93300	34,5	11,27	4,61	10,38
Aerogerador 17	99106	34,5	9,78	3,79	8,86
	98106	0,62	21,69	23,1	22,53

Fonte: O autor, (2025)

Os resultados completos das demais barras da vizinhança elétrica do sistema encontram-se consolidados na Figura 41, apresentada no Anexo B.

Caso 2 – Sistema com a Planta Híbrida e sem o BESS

Este cenário incorpora à modelagem a contribuição da Planta Híbrida — aerogerador 18, FV e carga RLC — mantendo o BESS desconectado. Esse cenário possibilita avaliar o acréscimo de corrente de falta decorrente apenas das unidades geradoras da SGH, isolando a influência do BESS para comparação subsequente com o próximo caso.

Tabela 24 - Caso 2. Níveis de curto-circuito nas barras do sistema

Nome	Número (Barra)	Tensão (kV)	Níveis de Curto-Circuito		
			Trifásico (kA)	Monofásico (kA)	Bifásico-Terra (kA)
SE Sobradinho (PAC)	6301	230	21,54	21,24	21,47
SE Casa Nova II	5742	34,5	11,26	4,61	10,38
	5739	230	3,26	3,71	3,7
Eólica Casa Nova B	95742	34,5	10,73	4,29	9,85
Eólica Casa Nova II	92200	34,5	11,24	4,6	10,35
Eólica Casa Nova III	93300	34,5	11,26	4,61	10,37
Aerogerador 17	98106	0,62	21,69	23,1	22,53
	99106	34,5	9,77	3,79	8,85
SE Híbrida	99121	34,5	10,18	3,59	8,22
Aerogerador 18	99107	34,5	9,55	3,49	7,74
	98107	0,62	21,55	23	22,45
Usina FV	99122	34,5	10,11	3,59	8,18
	98123	0,6	20,06	20,32	20,22
Carga RLC	99128	34,5	10,11	3,59	8,18
	98128	0,38	34,2	35,88	35,4

Fonte: O autor, (2025)

Os resultados completos das demais barras da vizinhança elétrica do sistema encontram-se consolidados na Figura 42, apresentada no Anexo B.

Caso 3 – Sistema com a Planta Híbrida e com o BESS

O Caso 3 acrescenta à configuração anterior a entrada do PCS do BESS, modelado no ANAFAS com o cartão DEOL e corrente máxima de contribuição conforme Tabela 25. Esse cenário apresenta a condição completa de operação da Planta Híbrida, permitindo quantificar o impacto incremental do BESS nos níveis de curto-circuito trifásico, monofásico e bifásico-terra em cada barra analisada.

Tabela 25 - Caso 3. Níveis de curto-circuito nas barras do sistema

Nome	Número (Barra)	Tensão (kV)	Níveis de Curto-Circuito		
			Trifásico (kA)	Monofásico (kA)	Bifásico-Terra (kA)
SE Sobradinho (PAC)	6301	230	21,54	21,24	21,47
SE Casa Nova II	5742	34,5	11,26	4,61	10,38
	5739	230	3,26	3,71	3,7
Eólica Casa Nova B	95742	34,5	10,73	4,29	9,85
Eólica Casa Nova II	92200	34,5	11,24	4,6	10,35
Eólica Casa Nova III	93300	34,5	11,26	4,61	10,37
Aerogerador 17	98106	0,62	21,69	23,1	22,53
	99106	34,5	9,77	3,79	8,85
SE Híbrida	99121	34,5	10,18	3,59	8,22
Aerogerador 18	98107	0,62	21,55	23	22,45
	99107	34,5	9,55	3,49	7,74
Usina FV	99122	34,5	10,11	3,59	8,18
	98123	0,6	20,06	20,32	20,22
Carga RLC	99128	34,5	10,11	3,59	8,18
	99128	34,5	34,2	35,88	35,4
BESS	99124	34,5	10,11	3,59	8,18
	98125	0,69	19,18	19,46	19,35

Fonte: O autor, (2025)

Os resultados completos das demais barras da vizinhança elétrica do sistema encontram-se consolidados na Figura 43, apresentada no Anexo B.

4.5.2 Resultados obtidos na análise de curto-circuito

A comparação entre os cenários evidencia que a contribuição das unidades da Planta Híbrida, resulta em variações inferiores a 0,1% nos níveis de curto-circuito das barras analisadas. Tal comportamento decorre do fato de que esses equipamentos são baseados em conversores eletrônicos com corrente limitada a valores fixados pelo fabricante. De modo semelhante, a inserção do BESS não produz incrementos adicionais, confirmando que o PCS atua como fonte de corrente limitada e não afeta significativamente a suportabilidade do sistema.

Tabela 26 - Relação entre os Níveis de Curto circuito, Caso 1 e Caso 2

Nome	Tipo de Curto-Circuito	Níveis de Curto-Circuito (kA)		Variação	
		SEM SGH e SEM BESS	COM SGH e SEM BESS	kA	%
SE Sobradinho (230 kV - PAC)	Trifásico	21,54	21,54	0	0,00
	Monofásico	21,24	21,24	0	0,00
	Bifásico-Terra	21,47	21,47	0	0,00
SE Casa Nova II (34,5 kV)	Trifásico	11,27	11,26	0,01	0,09
	Monofásico	4,61	4,61	0	0,00
	Bifásico-Terra	10,39	10,38	0,01	0,10
SE Casa Nova II (230 kV)	Trifásico	3,26	3,26	0	0,00
	Monofásico	3,71	3,71	0	0,00
	Bifásico-Terra	3,69	3,7	0,01	0,27
Eólica Casa Nova B	Trifásico	10,74	10,73	0,01	0,09
	Monofásico	4,29	4,29	0	0,00
	Bifásico-Terra	9,86	9,85	0,01	0,10
Eólica Casa Nova II	Trifásico	11,25	11,24	0,01	0,09
	Monofásico	4,6	4,6	0	0,00
	Bifásico-Terra	10,36	10,35	0,01	0,10
Eólica Casa Nova III	Trifásico	11,27	11,26	0,01	0,09
	Monofásico	4,61	4,61	0	0,00
	Bifásico-Terra	10,38	10,37	0,01	0,10
Aerogerador 17 (34,5 kV)	Trifásico	9,78	9,77	0,01	0,10
	Monofásico	3,79	3,79	0	0,00
	Bifásico-Terra	8,86	8,85	0,01	0,11
Aerogerador 17 (0,62 kV)	Trifásico	21,69	21,69	0	0,00
	Monofásico	23,1	23,1	0	0,00
	Bifásico-Terra	22,53	22,53	0	0,00

Tabela 27 - Relação entre os Níveis de Curto circuito, Caso 2 e Caso 3

Nome	Tipo de Curto-Circuito	Níveis de Curto-Circuito (kA)		Variação	
		COM SGH e SEM BESS	COM SGH e COM BESS	kA	%
SE Sobradinho (230 kV - PAC)	Trifásico	21,54	21,54	0	0,00
	Monofásico	21,24	21,24	0	0,00
	Bifásico-Terra	21,47	21,47	0	0,00
SE Casa Nova II (34,5 kV)	Trifásico	11,26	11,26	0	0,00
	Monofásico	4,61	4,61	0	0,00
	Bifásico-Terra	10,38	10,38	0	0,00
SE Casa Nova II (230 kV)	Trifásico	3,26	3,26	0	0,00
	Monofásico	3,71	3,71	0	0,00
	Bifásico-Terra	3,7	3,7	0	0,00
Eólica Casa Nova B	Trifásico	10,73	10,73	0	0,00
	Monofásico	4,29	4,29	0	0,00
	Bifásico-Terra	9,85	9,85	0	0,00
Eólica Casa Nova II	Trifásico	11,24	11,24	0	0,00
	Monofásico	4,6	4,6	0	0,00
	Bifásico-Terra	10,35	10,35	0	0,00
Eólica Casa Nova III	Trifásico	11,26	11,26	0	0,00
	Monofásico	4,61	4,61	0	0,00
	Bifásico-Terra	10,37	10,37	0	0,00
Aerogerador 17 (34,5 kV)	Trifásico	9,77	9,77	0	0,00
	Monofásico	3,79	3,79	0	0,00
	Bifásico-Terra	8,85	8,85	0	0,00
Aerogerador 17 (0,62 kV)	Trifásico	21,69	21,69	0	0,00
	Monofásico	23,1	23,1	0	0,00
	Bifásico-Terra	22,53	22,53	0	0,00
SE Híbrida	Trifásico	10,18	10,18	0	0,00
	Monofásico	3,59	3,59	0	0,00
	Bifásico-Terra	8,22	8,22	0	0,00
Aerogerador 18 (34,5 kV)	Trifásico	9,55	9,55	0	0,00
	Monofásico	3,49	3,49	0	0,00
	Bifásico-Terra	7,74	7,74	0	0,00
Aerogerador 18 (0,62 kV)	Trifásico	21,55	21,55	0	0,00
	Monofásico	23	23	0	0,00
	Bifásico-Terra	22,45	22,45	0	0,00
Usina FV (34,5 kV)	Trifásico	10,11	10,11	0	0,00
	Monofásico	3,59	3,59	0	0,00
	Bifásico-Terra	8,18	8,18	0	0,00
Usina FV (0,6 kV)	Trifásico	20,06	20,06	0	0,00
	Monofásico	20,32	20,32	0	0,00
	Bifásico-Terra	20,22	20,22	0	0,00

Carga RLC (34,5 kV)	Trifásico	10,11	10,11	0	0,00
	Monofásico	3,59	3,59	0	0,00
	Bifásico-Terra	8,18	8,18	0	0,00
Carga RLC (0,38 kV)	Trifásico	34,2	34,2	0	0,00
	Monofásico	35,88	35,88	0	0,00
	Bifásico-Terra	35,4	35,4	0	0,00

Conforme estabelece o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede, variações iguais ou superiores a $\pm 10\%$ nos níveis de curto-circuito (trifásico, monofásico ou bifásico-terra) devem ser identificadas como potenciais indicadoras de necessidade de reavaliação dos ajustes de proteção, especialmente nas barras de fronteira, para fins de elaboração do Plano Anual de Reajustes das Proteções de Fronteira [58].

No presente estudo, entretanto, a comparação entre os três cenários simulados, evidenciou variações extremamente reduzidas, tipicamente inferiores a 0,1% em todas as barras analisadas. Tais valores estão muito abaixo do limiar normativo de $\pm 10\%$, indicando que a inserção da SGH e do BESS não altera de forma significativa os níveis de curto-circuito do PAC e das barras de 34,5 kV, nem demanda ajustes adicionais de proteção segundo os critérios do ONS. Esse resultado reforça que a conexão da planta híbrida, incluindo o PCS do BESS, agrega benefícios operativos ao sistema sem impor impactos relevantes à coordenação das proteções ou à suportabilidade dos equipamentos existentes.

Outro ponto que merece destaque refere-se aos valores de curto-circuito observados nos barramentos de baixa tensão (BT), particularmente na barra associada à carga RLC, cujos níveis de corrente apresentaram valores superiores aos demais elementos da Planta Híbrida. Esse comportamento não está relacionado a uma maior capacidade de contribuição da carga, mas sim ao nível de tensão nominal do barramento, que opera em 380 V. Considerando que a potência de curto-circuito trifásico é dada por

$$S_{cc} = \sqrt{3}V \times I \quad (4.1)$$

Observa-se que correntes mais elevadas na BT são naturalmente compensadas pelo menor valor de tensão, resultando em potências de curto-circuito da mesma ordem de magnitude das demais unidades da Planta Híbrida.

Potência de curto-circuito (Caso 3 - Trifásico):

$$S_{cc,AE18} = \sqrt{3} \times 620 \times 21,55 \text{ k} = 23,14 \text{ MVA}$$

$$S_{cc,FV} = \sqrt{3} \times 600 \times 20,06 \text{ k} = 20,83 \text{ MVA}$$

$$S_{cc,BESS} = \sqrt{3} \times 690 \times 19,18 \text{ k} = 22,89 \text{ MVA}$$

$$S_{cc,RLC} = \sqrt{3} \times 380 \times 34,20 \text{ k} = 22,55 \text{ MVA}$$

Assim, verifica-se que, embora a corrente de curto-circuito do barramento de 380 V seja maior, a potência de curto-circuito permanece compatível com a faixa observada para os demais equipamentos da Planta Híbrida, confirmando a coerência física dos resultados e reforçando que não há contribuição anômala da carga RLC para o curto-circuito do sistema.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo avaliar o comportamento elétrico da planta híbrida de Casa Nova, composta por geração eólica, fotovoltaica, carga RLC e um sistema de armazenamento de energia (BESS), com ênfase nas análises de fluxo de potência e curto-circuito sob diferentes condições operativas do BESS. Para isso, consolidou-se previamente um referencial teórico abrangente envolvendo Sistemas de Geração Híbridas, tecnologias de armazenamento, fundamentos de fluxo de potência e modelagem de faltas em sistemas trifásicos, estabelecendo as bases conceituais e matemáticas que sustentaram as modelagens desenvolvidas nos programas computacionais ANAREDE e ANAFAS.

A modelagem computacional construída representou de forma coerente a topologia real do empreendimento, incorporando a planta fotovoltaica, o aerogerador 18, a carga RLC modular, o arranjo de transmissão em 230/34,5 kV e o BESS, incluindo sua curva de capacidade PQ em quatro quadrantes. Os estudos de fluxo de potência permitiram avaliar diferentes cenários de operação do BESS, variando injeção e absorção de potência ativa e reativa. Os resultados evidenciaram que as principais alterações introduzidas pelo BESS ocorrem no nível de baixa tensão, com efeito direto sobre perfis de tensão e circulação de potências no PAC e ramos adjacentes. Em todos os casos simulados, as tensões permaneceram dentro dos limites regulamentares, e os carregamentos dos ramos e transformadores não atingiram condições críticas, indicando que o BESS, para a potência instalada considerada, desempenha predominantemente o papel de elemento de suporte local, contribuindo para o ajuste do fator de potência, controle de tensão e redistribuição moderada das trocas de potência ativa.

As análises de curto-circuito complementaram o estudo, avaliando a contribuição dos conversores para correntes de falta monofásicas, trifásicas e bifásicas-terra. Com base nos limites máximos de corrente informados pelos fabricantes dos inversores, os resultados mostraram que a contribuição da planta híbrida — incluindo o BESS — permanece limitada e não produz elevações significativas nos níveis de curto-circuito nas barras em média e alta tensão. Observou-se que os valores obtidos permanecem próximos aos associados às máquinas síncronas existentes, não ultrapassando capacidades típicas de interrupção dos equipamentos da rede. Confirmou-se também

que a carga RLC, embora relevante para o regime permanente, não altera de forma significativa as magnitudes de corrente de curto, reforçando a consistência física e metodológica das premissas adotadas.

Por fim, é importante reconhecer algumas limitações inerentes ao desenvolvimento deste estudo. A modelagem realizada baseou-se majoritariamente em dados de placa, manuais de fabricantes e documentações técnicas disponíveis para os equipamentos da planta híbrida, o que exigiu a consolidação de informações provenientes de múltiplas fontes e, em alguns casos, a adoção de premissas quando dados completos não estavam disponíveis. Além disso, a ausência, no atual arcabouço regulatório brasileiro, de requisitos específicos para sistemas de armazenamento e para conversores em modo GFM, limita o nível de detalhamento com que tais dispositivos podem ser representados em estudos elétricos, especialmente em sistemas fracos.

Soma-se a isso o fato de que os programas computacionais do CEPEL — amplamente utilizados no país e exigidos pelo ONS para estudos de acesso — ainda não dispõem de modelos nativos para BESS, o que demandou a utilização de representações agregadas e simplificadas compatíveis com as capacidades do ANAREDE e do ANAFAS. Tais limitações reforçam a necessidade de evolução das ferramentas computacionais e do amadurecimento regulatório para permitir análises mais abrangentes e aderentes à realidade operacional desses sistemas. Mesmo assim, o conjunto de resultados obtidos demonstra consistência técnica e cumpre os objetivos propostos, servindo como base sólida para o aprofundamento de estudos futuros no âmbito da integração de BESS em plantas híbridas e no contexto da operação do Sistema Interligado Nacional.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações identificadas e nas oportunidades de continuidade associadas à integração de sistemas de armazenamento em plantas híbridas, apresentam-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Realizar estudos dinâmicos e transitórios utilizando ferramentas adequadas (ANATEM, ATP), avaliando a resposta do BESS e dos demais conversores a perturbações rápidas e condições de rede fraca.

- Investigar a contribuição do BESS na mitigação de eventos de *Constrained-off*, integrando a modelagem elétrica com métodos de otimização de operação e cenários realistas de despacho.
- Avaliar diferentes configurações e dimensionamentos do BESS (potência, energia, arquitetura de conexão), comparando seus impactos elétricos e operacionais.
- Replicar a metodologia adotada em outras plantas híbridas ou empreendimentos com alto nível de penetração renovável, permitindo análises comparativas e generalização dos resultados.
- Aprofundar o estudo regulatório envolvendo requisitos técnicos para BESS e conversores GMF, à luz de referências internacionais e das diretrizes emergentes no ONS.

REFERÊNCIAS

1. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Usinas Híbridas no Contexto do Planejamento Energético**. EPE. Rio de Janeiro. 2019.
2. FERNANDES, L. E. S. et al. **Integração de sistema de armazenamento em usina híbrida eólica-solar**: estudo de caso no município de Casa Nova, Bahia. Congresso Brasileiro de Energia Solar, IX. Florianópolis: [s.n.]. 2022.
3. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Usinas Híbridas: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento**. EPE. Rio de Janeiro. 2018.
4. MIRANDA, R. L. et al. **Insertion of PV-BESS Hybrid Plant in a Wind Farm: Case Study of Casa Nova, Bahia**. THE XIV LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2022. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2022.
5. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Manual de Procedimentos da Operação: Módulo 5 - Submódulo 5.13 - Rotinas de Pós-Operação - RO-AO.BR.13 - Apuração de Restrição de Operação por Constrained-off de Usinas Eólicas e Usinas Fotovoltaicas**. ONS. Rio de Janeiro. 2025.
6. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Dados de Restrição de Operação por Constrained-off de Usinas Eólicas, 2025. Disponível em: https://dados.ons.org.br/dataset/restricao_coff_eolica_usi. Acesso em: 25 outubro 2025.
7. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Dados de Restrição de Operação por Constrained-off de Usinas Fotovoltaicas, 2025. Disponível em: https://dados.ons.org.br/dataset/restricao_coff_fotovoltaica. Acesso em: 25 outubro 2025.
8. ELETROBRAS - ESTUDOS ELETROENERGÉTICOS DA GERAÇÃO. **Constrained-off diário - Power BI**. ELETROBRAS - EEGAS. Rio de Janeiro. 2024. Documento Interno.
9. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 954, de 30 de novembro de 2021**. ANEEL. Brasília, DF. 2021.
10. ZHENYONG, Y. et al. Review of Battery Energy Storage Systems: Challenges, Strategies and Applications. **International Journal of Engineering and Technology**, 17, 2025.
11. BIGNUCOLO, F. et al. Integration of Lithium-Ion Battery Storage Systems in Hydroelectric Plants for Supplying Primary Control Reserve. **Energies**, 10, 2017.
12. COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. **Chamada Pública nº 02/2017 para recebimento de proposta(s) de projeto de P&D+I: Aerogeradores e as melhorias no processo de conversão de energia com integração a outras fontes**. Recife. 2017.
13. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030**. IRENA. Abu Dhabi. 2017.

14. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Sistemas de Armazenamento em Baterias: Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento**. EPE. Rio de Janeiro. 2019.
15. LIU, W.; PLACKE, T.; CHAU, K. T. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. **Energy Reports**, 8, 2022. 4058-4084.
16. XING,. Explicação dos principais componentes do sistema de armazenamento de energia da bateria. **Lithium Battery Techno**, 2024. Disponível em: <<https://www.lithiumbatterytech.com/pt/battery-energy-storage-system-key-components-explained/>>. Acesso em: 07 Novembro 2025.
17. RAMOS, F.; DIAS, R. **Sistemas de Armazenamento de Energia (Aula 1)**. Universidade de Pernambuco. Recife. 2024.
18. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. AULA 02 COMPONENTES DO BESS. **Youtube**, 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=FxmyFttLe7k&list=PLh68XGrJ318fURAIy6Y1LQSCi_cWWmL9p&index=2>. Acesso em: 12 Novembro 2025.
19. VALER, R. LRCAP 2026: o que esperar das novas regras para BESS? **Canal Solar**, 2025. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/lrcap-2026-o-que-esperar-das-novas-regras-para-bess/>>. Acesso em: 20 setembro 2025.
20. ZAMBONI, L.; CASTRO, B. **Modelo de Negócios em Armazenamento de Energia**. Grupo de Estudos do Setor Elétrico - UFRJ. Rio de Janeiro. 2023.
21. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Workshop Requisitos Técnicos de Conexão de Sistemas de Armazenamento de Energia via Baterias no SIN. **ONS**, 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/details.aspx?i=11479>>. Acesso em: 11 Junho 2025.
22. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede: Módulo 2 - Critérios e Requisitos - Submódulo 2.10 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**. ONS. Rio de Janeiro. 2025.
23. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Análise das contribuições recebidas na Consulta Pública n. 061/2020 e proposta de abertura de segunda fase da Consulta Pública com vistas ao tratamento regulatório para o estabelecimento de usinas híbridas e associadas**. ANEEL. [S.l.]. 2021. (Nota Técnica nº 048/2021-SRG-SRT-SCG-SGT/ANEEL).
24. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Análise das contribuições recebidas na segunda fase da Consulta Pública n. 061/2020 com vistas ao tratamento regulatório para o estabelecimento de usinas híbridas e associadas**. ANEEL. [S.l.]. 2021. (Nota Técnica nº 136/2021-SRG-SRT-SCG-SGT/ANEEL).
25. MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
26. CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de Análise de Redes V12.00.01: Manual do Usuário**. CEPEL. Rio de Janeiro. 2024.
27. KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 4ª. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2007.
28. STEVENSON JR., W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2ª (em português). ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

29. METZ-NOBLAT, B. D.; DUMAS, F.; POULAIN, C. **Calculation of short-circuit currents**. Schneider Electric. [S.l.]. 1998. (Cahier Technique no. 158).
30. CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANAFAS Programa de Análise de Faltas Simultâneas: Manual do Usuário**. CEPEL. Rio de Janeiro. 2022.
31. ROSSO, R. et al. Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends – A Review. **IEEE Open Journal of Industry Applications**, 2, 2021. 93–110.
32. AUSTRALIAN ENERGY MARKET OPERATOR. **Voluntary Specification for Grid-Forming Inverters – Version 1.0**. AEMO. Melbourne. 2023.
33. NORTH AMERICAN ELECTRIC RELIABILITY CORPORATION. **Grid Forming Functional Specifications for BPS-Connected Battery Energy Storage Systems**. NERC. Atlanta. 2023.
34. UNIFI CONSORTIUM. **UNIFI Specifications for Grid-Forming Inverter-Based Resources – Version 2**. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Golden. 2024. (NREL/TP-5D00-89269 (UNIFI-2024-2-1)).
35. COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL. **Requisitos Mínimos para IBR-GFM – Rev.0 – 30 Out. 2024**. CEN. Santiago. 2024.
36. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **White Paper – Electrical Energy Storage**. IEC. Genebra. 2020.
37. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Mapa Interativo do Setor Elétrico – WebMapEPE, Brasília. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>>. Acesso em: 05 novembro 2025.
38. ELETROBRAS CHESF – DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO (DEPE). **Parecer de Acesso – EOL CASA NOVA A – 27 MW Análise de Regime Permanente, Curto-circuito e Transitórios Eletromecânicos**. CHESF. Recife. 2020. Documento interno.
39. ELETROBRAS - CHESF. **Reunião de Acompanhamento Semanal, P&D Planta Híbrida Inteligente, Semana: 113**. CHESF. Casa Nova. 2025. Documento Interno.
40. ELETROBRAS - CHESF. **Usina Híbrida – HCNA; Pré-Operacional**. Companhia Hidroelétrica do São Francisco. Casa Nova. 2025. Documento interno.
41. ELETROBRAS - CHESF. **Eólica Casa Nova A - ECNA**. Companhia Hidroelétrica do São Francisco. Casa Nova. 2025. Documento interno.
42. ELETROBRAS - CHESF. **Instrução Normativa IN-OP.01.004 – Codificação de Equipamentos e Linhas de Transmissão e sua Representação em Diagrama Unifilar**. Companhia Hidroelétrica do São Francisco. Recife. 2025. Documento Interno.
43. BLUTRAFOS TRANSFORMADORES LTDA. **D_DE10914_rev_01 – Transformador Trifásico Seco Encapsulado – 1600 kVA – 690/34.500 V – Dyn1**. São Paulo. 2024. Documento Interno.
44. BLUTRAFOS TRANSFORMADORES LTDA. **FD_DE10912_rev_01 – Transformador Trifásico Seco Encapsulado – 1600 kVA – 600/34.500 V – Dyn1**. São Paulo. 2024. Documento Interno.

45. BLUTRAFOS TRANSFORMADORES LTDA. **FD_DE10915_rev_01 – Transformador Trifásico Seco Encapsulado – 1600 kVA – 34.500/380 V – Dyn1**. São Paulo. 2024. Documento Interno.
46. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos**. ONS. [S.l.]. 2022.
47. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO; JPW ENGENHARIA LTDA. **Desenvolvimento de Carga Teste RLC para Microrredes – Relatório 3: Especificação Básica dos Valores Nominais**. UFPE. Recife. 2024. Documento Interno.
48. HUGREEN ENERGIA S.A. **HU4003-RLT001-R00 – Relatório de Comissionamento a Frio – Sistema Fotovoltaico (SFV) + Armazenamento de Energia Moura BESS**. Recife. 2025. Documento interno.
49. SUNGROW POWER SUPPLY CO., LTD. **Manual do Usuário – Inversor SG125HV (Versão V1.12, 2018)**. Sungrow. Hefei. 2018.
50. GOLDWIND SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD. **QGW DK SJ1500SS-150EN-2011 – 1.5 MW Wind Turbine – Grid Connection Performance Report**. Beijing. 2011.
51. MIRANDA, R. L. et al. **Integração de Sistema de Armazenamento em Usina Híbrida Eólico-Solar – Estudo de Caso Casa Nova, Bahia**. SENAI CIMATEC / CHESF. Salvador. 2024.
52. ACUMULADORES MOURA S.A. **PCA0276-PR-TAC-001 – Relatório de Comissionamento do Sistema BESS Casa Nova – 1000 kW / 1404 kWh**. Belo Jardim. 2025. Documento interno.
53. KEHUA DIGITAL ENERGY TECH. **Energy Storage / Micro-grid - Product Catalogue**. KEHUA. China. 2023.
54. CONTEMPORARY AMPEREX TECHNOLOGY CO. LIMITED. **Product Specification – 280 Ah / 2h Outdoor Liquid Cooling Rack (1P416S)**. CATL. China. 2020.
55. KEHUA DIGITAL ENERGY TECH. **A4 – BCS1725K-B-HUD – P-Q Curve (Rated Grid Voltage Conditions)**. KEHUA. China. 2024.
56. MATHWORKS. MATLAB Online. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab-online.html>. Acesso em: 11 novembro 2025.
57. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Portal SINTEGRE. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/>. Acesso em: 2025.
58. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.3 – Premissas, Critérios e Metodologia para Estudos Elétricos: Critérios**. ONS. Rio de Janeiro. 2025.
59. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.3 – Premissas, Critérios e Metodologia para Estudos Elétricos: Metodologia**. ONS. Rio de Janeiro. 2025.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MODELAGEM DO BESS NO ANAREDE

Figura 27 - Conjunto de cartões do ANAREDE utilizados na modelagem do BESS

```

01 (MODELAGEM DO BESS
02
03 (DADOS DE BARRA ASSOCIADOS AO BESS
04 DBAR IMPR
05 (Num) OETGb ( nome ) Gl ( V ) ( A ) ( Pg ) ( Qg ) ( Qn ) ( Qm ) ( Bc ) ( Pl ) ( Ql ) ( Sh ) Are ( Vf ) M ( 1 ) ( 2 ) ( 3 ) ( 4 ) ( 5 ) ( 6 ) ( 7 ) ( 8 ) ( 9 ) ( 10
06 99124 LBESS_34.5 78
07 98125 1RBESS_0.69 1.000 -1. 1. 78
08 98124 ORBCGE_CNA_BESS 78
09 99999
10
11 (DADOS DE LINHA ASSOCIADOS AO BESS
12 (CONEXÃO À SE HÍBRIDA E TRAFO 34,5/0,69 kV
13 DLIN IMPR
14 (De ) d O d ( Pa ) NcEP ( R% ) ( X% ) ( Mvar ) ( Tap ) ( Tmn ) ( Tmx ) ( Phs ) ( Bc ) ( Cn ) ( Ce ) Ns ( Cq ) ( 1 ) ( 2 ) ( 3 ) ( 4 ) ( 5 ) ( 6 ) ( 7 ) ( 8 ) ( 9 ) ( 10
15
16 99121 99124 0.28000.014
17 99124 98124 46.25 409.37 1.000 30. 1.6 1.6 1.6
18 98124 98125 34.1940.194
19 99999
20
21 DARE
22 (Ar (Xchg) ( Identificacao da area ) (Xmin) (Xmax)
23 78 PLANTA HIBRIDA
24 99999
25
26 DGBT IMPR
27 (G ( kV)
28 RE 0.69
29 99999

```

Fonte: O autor, ANAREDE (2025)

APÊNDICE B – MODELAGEM DO BESS NO ANAFAS

Figura 28 - Conjunto de cartões do ANAFAS utilizados na modelagem do BESS

```

01 ( MODELAGEM DO BESS
02
03 ( (DADOS DE BARRA ASSOCIADOS AO BESS
04 DBAR
05 (NB CEMA BN VPRE ANG VBAS DISJUN DDMMAAADMMMAAAA IA SA F
06 (-----
07 99124 BESS_34.5 34.5
08 98125 BESS_0.69 0.69
09 98124 CGE_CNA_BESS 0.69
10 99999
11
12 (DADOS DE CITCUITO ASSOCIADOS AO BESS
13 (CONEXÃO À SE HÍBRIDA E TRAFO 34,5/0,69 kV
14 DCIR
15 (BF CE BT NCT R1 X1 R0 X0 CN S1 S0 TAP TB TCIA DEFE KM CD RNDE XNDE CP RNPA XNPA SA
16 (-----
17 99124 98124 1 T46.25 409.3746.25 409.37 YN D
18 99121 99124 1 L0.28000.014 0.28000.014 0.0400.040
19 98124 98125 L34.1940.194 34.1940.194 0.0400.040
20 99999
21
22 (MODELAGEM DO PCS DO BESS
23 DEOL
24 (NB CE K NG P_inic I_max V_min FP_CCNNNNN NunNop FP_pre V_max AAA SA DisjunCic M.V.A DDMMAAADMMMAAAA
25 (=====
26 98125 1 1 1.0 2510.00.2 0.1 1 1 1.2 1.0
27 99999

```

Fonte: O autor, ANAFAS (2025)

APÊNDICE C – DADOS E MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES DA SE HÍBRIDA

Tabela 28 - Dados de Placa. Transformadores da SE Híbrida

Parâmetro	Trafo BESS	Trafo FV	Trafo Carga RLC
Fabricante	Blutrafos	Blutrafos	Blutrafos
Potência Nominal (kVA)	1600	1600	1600
Tensão Nominal BT (V)	690	600	380
Tensão Nominal AT (kV)	34,5	34,5	34,5
Ligação	Dyn1	Dyn1	Dyn1
R (%)	0,74	0,73	0,73
X (%)	6,55	6,37	6,54
Freq. (Hz)	60	60	60

Fonte: O autor, adaptado de Folha de dados, Blutrafos [43] [44] [45].

Cálculo da impedância percentual nominal:

$$Z_{\%} = \sqrt{(R_{\%}^2 + X_{\%}^2)} \quad \text{C.1}$$

Tabela 29 - Impedância nominal resultante. Transformadores SE Híbrida

Trafo	R (%)	X (%)	Z (%)	Conformidade ONS ($\leq 14\%$)
BESS	0,74	6,55	6,59	Conforme
FV	0,73	6,37	6,41	Conforme
Carga RLC	0,73	6,54	6,58	Conforme

Fonte O Autor (2025)

Para implementação no ANAREDE e ANAFAS, os valores nominais de impedância foram convertidos para a base de 100 MVA do sistema, conforme equação. C.2:

$$Z_{pu,nova} = Z_{pu,antiga} \times \frac{Z_{base,nova}}{S_{base,antiga}} \quad \text{C.2}$$

Sendo:

$$Z_{\%,nova} = Z_{\%,antiga} \times \frac{100}{1,6}$$

Tabela 30 - Impedâncias na base de 100 MVA. Transformadores SE Híbrida

Trafo	R% (placa)	X% (placa)	R% (100 MVA)	X% (100 MVA)
BESS	0,74	6,55	46,25	409,375
FV	0,73	6,37	45,625	398,125
Carga RLC	0,73	6,54	45,625	408,75

Fonte O Autor (2025)

Os valores elevados de R% e X% na base do sistema são esperados para transformadores de baixa potência nominal quando convertidos para uma S_{base} elevada (100 MVA), não caracterizando desconformidade técnica ou normativa.

Assim, para a modelagem na simulação, tem-se:

Figura 29 - Cartão ANAREDE para modelagem dos transformadores da SE Híbrida

```
( TRANSFORMADORES DA SE HIBRIDA - ANAREDE
DLIN
(De )d o d(Pa )NcEPM( R% ) ( X% ) (Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc ) (Cn) (Ce)Ns(Cq) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (
99122 98122 45.625398.12 1.000 30. 1.6 1.6 1.6
99124 98124 46.25 409.37 1.000 30. 1.6 1.6 1.6
99128 98128 45.625408.75 1.000 30. 1.6 1.6 1.6
99999
```

Fonte: O autor, ANAREDE (2025)

Figura 30 - Cartão ANAFAS para modelagem dos transformadores da SE Híbrida

```
(TRANSFORMADORES DA SE HIBRIDA - ANAFAS
DCIR
(BF CE BT NCT R1 X1 R0 X0 CN S1 S0 TAP TB TCIA DEFE KM CD RNDE XNDE CP RNP
(-----
98122 99122 1 T45.625398.1245.625398.12 30. YN D
98128 99128 1 T45.625408.7545.625408.75 30. YN D
98124 99124 1 T46.25 409.3746.25 409.37 30. YN D
99999
```

Fonte: O autor, ANAFAS (2025)

APÊNDICE D – MODELAGEM DA CARGA RLC NO ANAREDE

Para a implementação no ANAREDE, foi utilizado o cartão DCAI, responsável pela representação detalhada de cargas individuais com potência ativa (P) e reativa (Q) em cada barra definida. No ANAREDE pode-se adotar duas abordagens:

- Modelagem individualizada, em que cada módulo é representado separadamente. Utilizada considerando a modulação da carga, mais precisas em casos de simulações específicos com a carga.
- Modelagem agregada, em que o conjunto é representado como uma única carga equivalente, para cada conjunto R, L ou C. Uma abordagem mais geral da carga, para avaliar somente seu comportamento passivo absoluto.

Ambas as alternativas foram estruturadas e encontram-se apresentadas nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 - Modelagem individualizada da carga RLC no ANAREDE

```
( CONSIDERANDO A MODULAÇÃO DAS CARGA RLC
( DADOS DA CARGA RLC - CARGAS INDIVIDUALIZADAS
DCAI
( 18 Cargas Resistivas 1.285 kW
(Num) O Gr E (U) UOp ( P ) ( Q ) (A) (B) (C) (D) (Vf1) (Vf)
98128 0 10 L 1 .005 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 11 L 1 .010 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 12 L 1 .020 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 13 L 1 .030 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 14 L 1 .040 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 15 L 1 .050 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 16 L 1 .060 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 17 L 1 .070 0.0 0 100 0 100 70.
98128 0 18 L 10 .100 0.0 0 100 0 100 70.
( 15 Cargas Indutivas 960 kVAr
98128 0 20 L 2 0.0 .005 0 100 0 100 70.
98128 0 21 L 1 0.0 .010 0 100 0 100 70.
98128 0 22 L 2 0.0 .020 0 100 0 100 70.
98128 0 23 L 2 0.0 .050 0 100 0 100 70.
98128 0 24 L 8 0.0 .100 0 100 0 100 70.
( 15 Cargas Capacitivas 960 kVAr
98128 0 30 L 2 0.0 -.005 0 100 0 100 70.
98128 0 31 L 1 0.0 -.010 0 100 0 100 70.
98128 0 32 L 2 0.0 -.020 0 100 0 100 70.
98128 0 33 L 2 0.0 -.050 0 100 0 100 70.
98128 0 34 L 8 0.0 -.100 0 100 0 100 70.
99999
```

Fonte: O autor, ANAREDE (2025)

Figura 32 - Modelagem agregada da carga RLC no ANAREDE

```

(OUTRA OPÇÃO
( DADOS DA CARGA RLC - CONSIDERANDO UM CONJUNTO UNICO PARA FINS DE SIMULAÇÃO
DCAI
( 18 Cargas Resistivas 1285 kW
(Num) O Gr E (U) UOp ( P ) ( Q ) (A) (B) (C) (D) (Vf1) (Vf)
98128 0 10 L 1 1.285 0.0 0 100 0 100 70.

( 15 Cargas Indutivas 960 kVAr
98128 0 20 L 1 0.0 .960 0 100 0 100 70.

( 15 Cargas Capacitivas 960 kVAr
98128 0 30 L 1 0.0 -.960 0 100 0 100 70.

99999

```

Fonte: O autor, ANAREDE (2025)

APÊNDICE E – MODELAGEM DA CARGA RLC NO ANAFAS

A representação da carga RLC no ANAFAS exige o uso do cartão DCIR, o qual solicita diretamente valores para carga no formato $R + jX$ para carga de impedância constante, visto na Figura 33. Entretanto, o relatório técnico da carga RLC fornece apenas as potências ativa e reativa dos conjuntos resistivo, indutivo e capacitivo, sem apresentar os parâmetros de impedância [30] [47].

Dessa forma, tornou-se necessário converter os valores de potência para impedância, decompor essa impedância em resistência e reatância e, posteriormente, expressá-las em porcentagem (%), conforme padrão requerido pelo ANAFAS.

Figura 33 - Configuração para o tipo de circuito no cartão DCIR do ANAFAS

- **TIPC:** tipo do circuito ou grupo:
 - G: gerador.
 - L: linha de transmissão.
 - T: transformador.
 - C: carga de impedância constante ($R+jX$).
 - H: reator ou capacitor "shunt".
 - S: capacitor série.
 - Z: transformador de aterramento (zig-zag)
 - E: compensador estático

Fonte: Manual do ANAFAS [30]

Dados:

$$\begin{aligned}
 P &= 1285 \text{ kW} \\
 Q &= 960 \text{ kVAr} \\
 V_{LL} &= 380 \text{ V} \\
 S_{base} &= 100 \text{ MVA}
 \end{aligned}$$

Cálculo da impedância equivalente:

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\
 S &\approx 1.603 \text{ MVA}
 \end{aligned}
 \tag{E.1}$$

Cálculo da corrente trifásica:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{S}{\sqrt{3} V_{LL}} \\
 I &\approx 2439.8 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{E.2}$$

Impedância equivalente por fase (carga em estrela):

$$Z_{eq} = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{I} \quad \text{E.3}$$

$$Z_{eq} \approx 0.0899$$

Decomposição da impedância: resistência e reatância:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) \quad \text{E.4}$$

$$\varphi \approx 36.9^\circ$$

Assim:

$$R_{eq} = Z_{eq} \cos \varphi \quad \text{E.5}$$

$$R_{eq} \approx 0.0719$$

$$X_{eq} = Z_{eq} \sin \varphi \quad \text{E.6}$$

$$X_{eq} \approx 0.0539$$

Impedância base:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad \text{E.7}$$

$$Z_{base} \approx 0.001444$$

Conversão para R% e X% (usado pelo ANAFAS):

$$R_{\%} = 100 \times \frac{R_{eq}}{Z_{base}} \quad \text{E.8}$$

$$R_{\%} \approx 4994.5$$

$$X_{\%} = 100 \frac{X_{eq}}{Z_{base}} \quad \text{E.9}$$

$$X_{\%} \approx 3731.3$$

Assim, foram considerados para modelagem completa da Carga RLC uma carga individualizada com $(R - jX)$ formando o Grupo RC e um shunt de linha com parâmetro $+jX$, completando o conjunto RLC. Os dados inseridos na modelagem, podem ser observados no cartão, Figura 34.

Figura 34 - Modelagem da carga RLC no ANAFAS

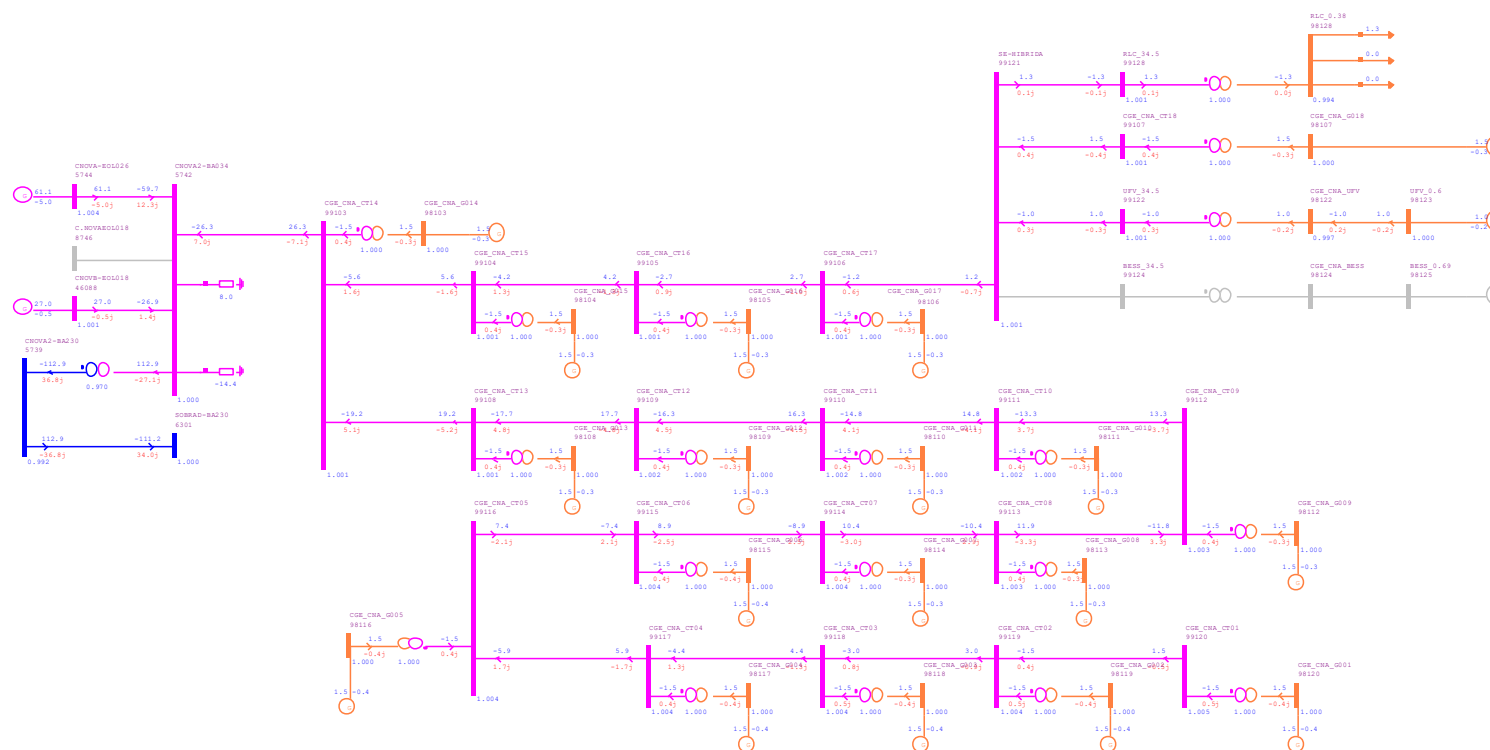
```
(MODELAGEM DA CARGA RLC - ANAREDE
DCIR
-----Dados de Circuitos-----
(BF CE BT NCT Rl Xl R0 X0 CN S1 S0 TAP TB TCIA DEFE KM CD RNDE XNDE CP RNP
(-----=====
0 98128 1 C4994.5-3731.4994.5-3731. YN
0 98128 1 H 3731.3 3731.3 YN
99999
```

Fonte: O autor, ANAFAS (2025)

ANEXOS

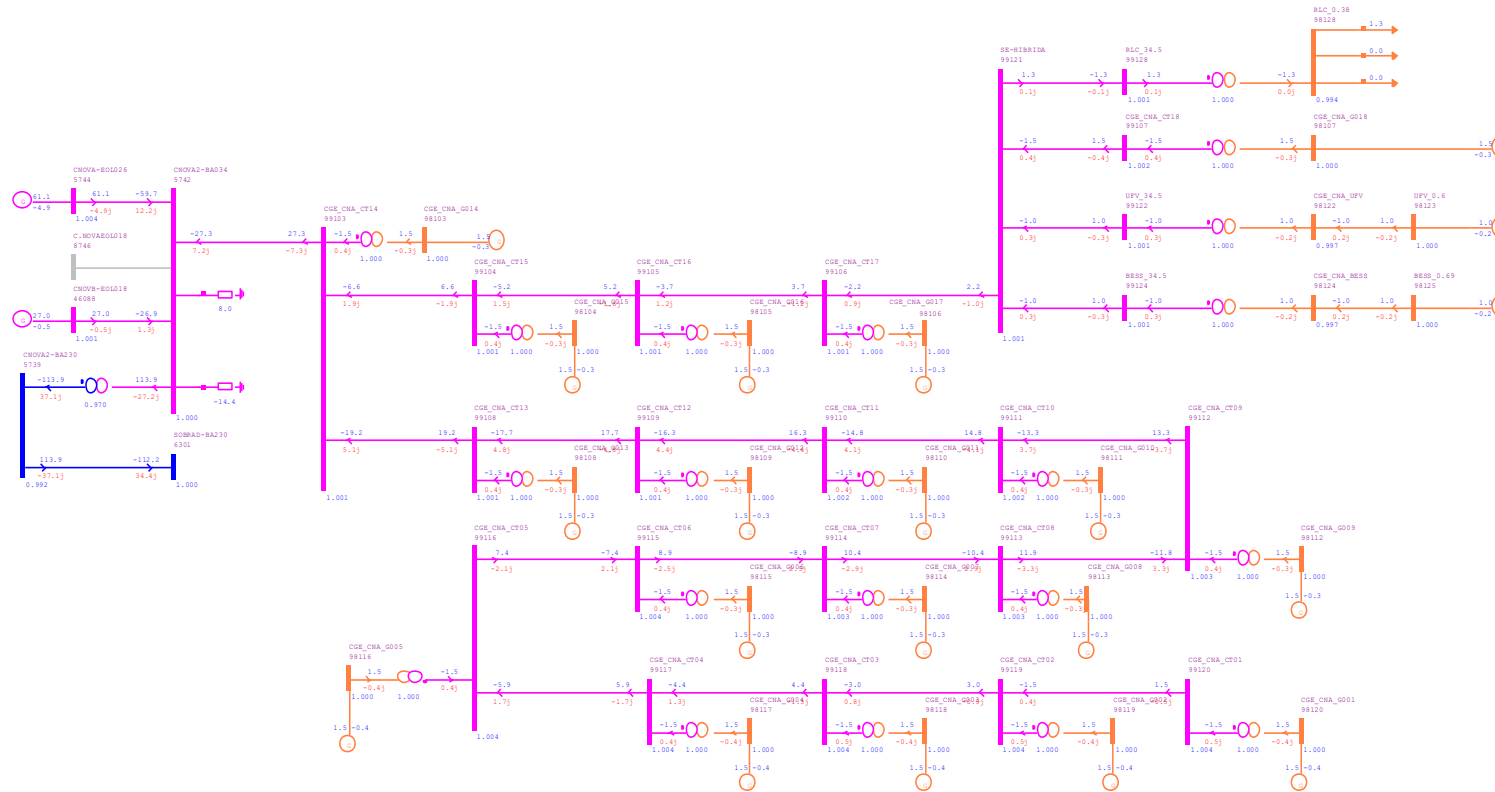
ANEXO A – CASOS AVALIADOS NO ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Figura 35 - Diagrama, Caso 1. Condição Operativa sem o BESS



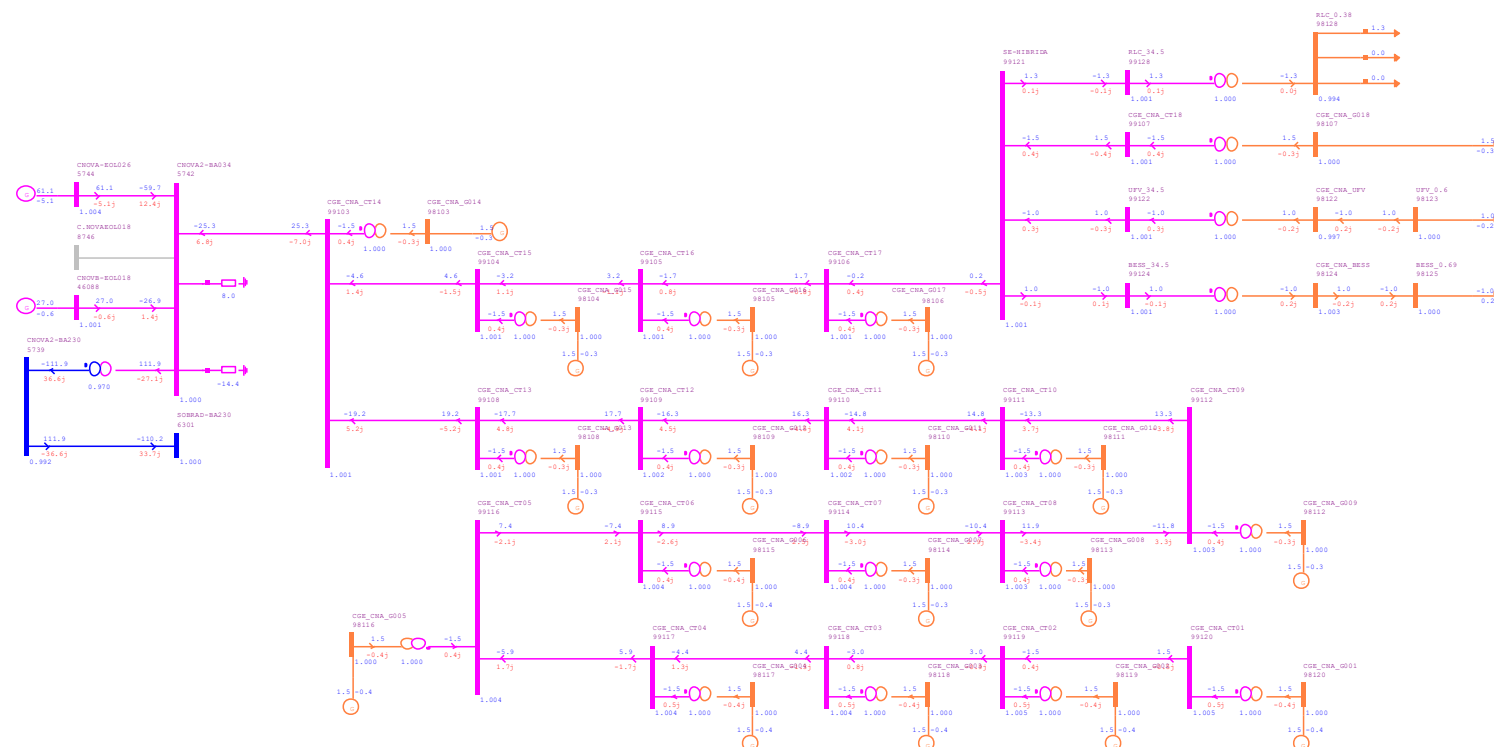
Fonte: ANAREDE 12.0.1 (2025)

Figura 36 – Diagrama Caso 2. BESS injetando +1 MW de potência ativa



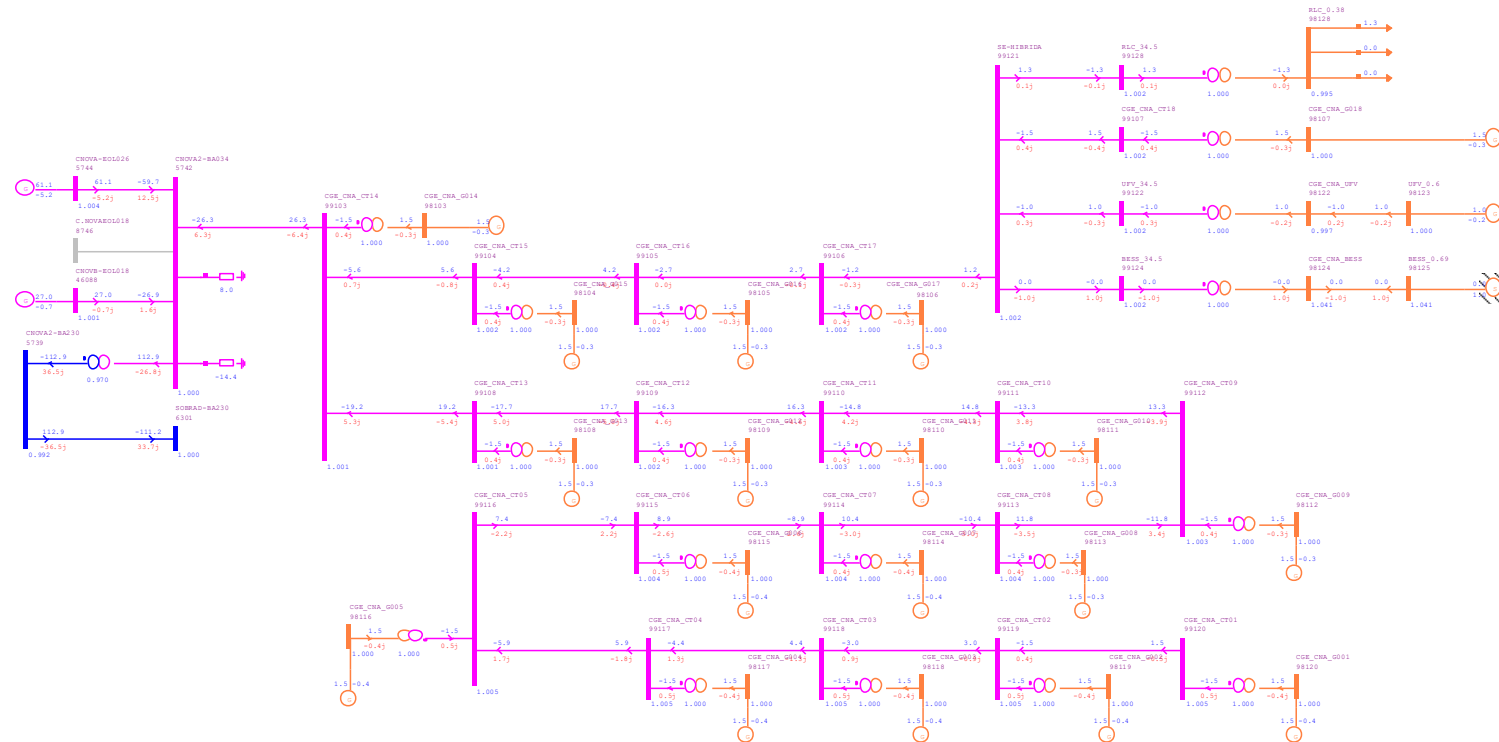
Fonte: ANAREDE 12.0.1 (2025)

Figura 37 – Diagrama, Caso 3. BESS absorvendo -1 MW (modo de carga)



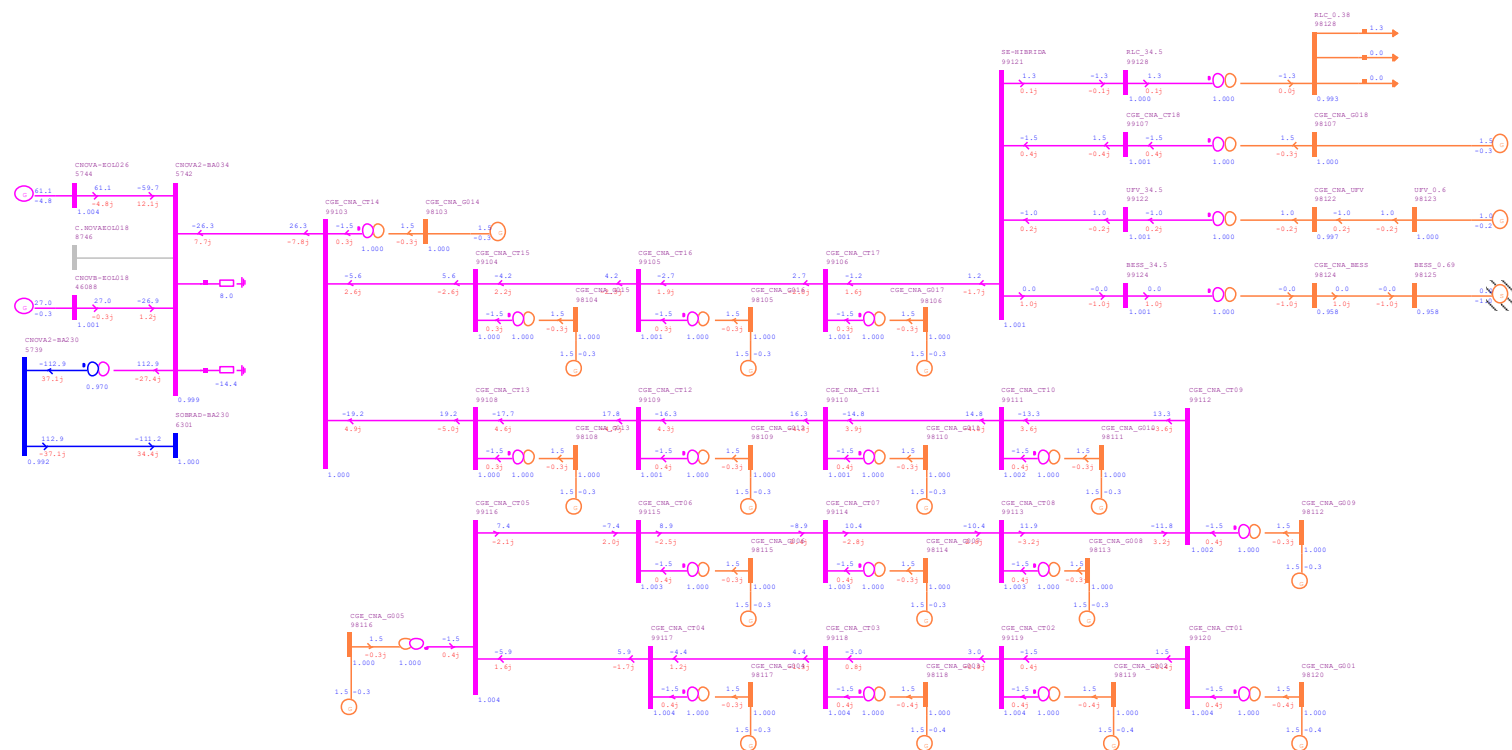
Fonte: ANAREDE 12.0.1 (2025)

Figura 38 – Diagrama, Caso 4. BESS fornecendo +1 MVar (suporte capacitivo)



Fonte: ANAREDE 12.0.1 (2025)

Figura 39 – Diagrama, Caso 5. BESS absorvendo -1 MVar (modo indutivo)



Fonte: ANAREDE 12.0.1 (2025)

Fonte: ANAFAS 7.6.3 (2025)

Figura 41 - Caso 1. Relatório de Níveis de Curto Circuito (ANAFAS)

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Faltas Simultâneas - 7.6.3-Mar24

ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2029 = VERSÃO 10/05/2024 = BR2912PH.ANA

CICLO DO PAR ANO 2025 / 2029 - REVISÃO 0
CASO DE REFERÊNCIA BR2912PH.ANA GERADO A PARTIR DO CASO DE REFERÊNCIA
BR2812PH.ANA DE 10/05/2024, APLICANDO-SE OS ARQUIVOS DE ALTERAÇÃO
NNE2912PH.ALT, SECO2912PH.ALT E SUL2912PH.ALT.

RELATÓRIO DE NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO

IDENTIFICAÇÃO		T R I F Á S I C O				M O N O F Á S I C O					
NUM.	NOME	VBAS	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6301	SOBRAD-BA230	230.0	21.54	-87.53	18.80	54.68	21.24	-87.04	19.20	55.30	
5742	CNOVA2-BA034	34.5	11.27	-84.95	11.32	28.03	4.61	-88.62	41.66	12.57	
5739	CNOVA2-BA230	230.0	3.26	-80.22	5.80	7.30	3.71	-81.70	6.77	8.51	
95742	CNBTFAEG086	34.5	10.74	-82.48	7.58	25.23	4.29	-84.60	10.58	10.59	
92200	CB UCD	34.5	11.25	-84.85	11.10	27.91	4.60	-88.46	37.08	12.48	
93300	CB UCT	34.5	11.27	-84.93	11.28	28.00	4.61	-88.59	40.65	12.56	
98106	CNA-AEG084	0.6	21.69	-85.96	14.17	55.24	23.10	-86.08	14.58	59.00	
99106	CNATFAEG084	34.5	9.78	-76.54	4.18	20.36	3.79	-78.03	4.72	8.12	
98107	CNA-AEG085	0.6	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	
99107	CNATFAEG085	34.5	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	
98103	CNA-AEG081	0.6	21.75	-86.20	15.04	55.72	23.15	-86.24	15.22	59.36	
98104	CNA-AEG082	0.6	21.72	-86.09	14.64	55.51	23.13	-86.17	14.93	59.20	
98105	CNA-AEG083	0.6	21.71	-86.03	14.41	55.38	23.11	-86.12	14.76	59.11	
98108	CNA-AEG080	0.6	21.74	-86.17	14.93	55.66	23.14	-86.22	15.14	59.32	
98109	CNA-AEG079	0.6	21.72	-86.13	14.77	55.56	23.13	-86.19	15.03	59.24	
98110	CNA-AEG078	0.6	21.71	-86.09	14.62	55.46	23.12	-86.16	14.91	59.17	
98111	CNA-AEG077	0.6	21.69	-86.04	14.45	55.36	23.10	-86.13	14.79	59.09	
98112	CNA-AEG076	0.6	21.67	-85.99	14.26	55.24	23.09	-86.09	14.65	59.00	
98113	CNA-AEG075	0.6	21.66	-85.94	14.08	55.13	23.08	-86.06	14.51	58.92	
98114	CNA-AEG074	0.6	21.64	-85.89	13.90	55.02	23.06	-86.02	14.38	58.83	
98115	CNA-AEG073	0.6	21.62	-85.83	13.73	54.91	23.05	-85.98	14.25	58.75	
98116	CNA-AEG072	0.6	21.61	-85.77	13.51	54.77	23.04	-85.94	14.08	58.64	
98117	CNA-AEG071	0.6	21.59	-85.68	13.24	54.61	23.02	-85.88	13.87	58.52	
98118	CNA-AEG070	0.6	21.57	-85.60	12.98	54.44	23.01	-85.81	13.66	58.39	
98119	CNA-AEG069	0.6	21.54	-85.47	12.63	54.21	22.99	-85.73	13.39	58.22	
98120	CNA-AEG068	0.6	21.52	-85.37	12.36	54.03	22.97	-85.66	13.16	58.07	
99103	CNATFAEG081	34.5	10.66	-82.10	7.21	24.83	4.25	-84.00	9.52	10.32	
99104	CNATFAEG082	34.5	10.27	-79.52	5.41	22.64	4.04	-81.19	6.45	9.22	
99105	CNATFAEG083	34.5	10.03	-78.06	4.73	21.49	3.92	-79.63	5.47	8.66	
99108	CNATFAEG080	34.5	10.54	-81.43	6.63	24.18	4.17	-83.11	8.28	9.94	
99109	CNATFAEG079	34.5	10.31	-80.42	5.93	23.16	4.04	-81.55	6.73	9.30	
99110	CNATFAEG078	34.5	10.10	-79.48	5.38	22.25	3.92	-80.12	5.74	8.75	
99111	CNATFAEG077	34.5	9.87	-78.48	4.91	21.31	3.79	-78.65	4.98	8.21	
99112	CNATFAEG076	34.5	9.65	-77.35	4.45	20.38	3.67	-77.26	4.42	7.74	
99113	CNATFAEG075	34.5	10.52	-84.94	4.09	21.08	3.56	-75.97	4.00	7.33	
99114	CNATFAEG074	34.5	10.34	-83.71	3.80	20.32	3.45	-74.75	3.67	6.95	
99115	CNATFAEG073	34.5	10.22	-82.95	3.55	19.72	3.35	-73.62	3.40	6.62	
99116	CNATFAEG072	34.5	9.99	-81.40	3.26	18.89	3.25	-72.41	3.15	6.29	
99117	CNATFAEG071	34.5	9.71	-79.42	2.97	17.94	3.15	-71.14	2.93	5.98	
99118	CNATFAEG070	34.5	9.46	-77.65	2.73	17.10	3.05	-69.94	2.74	5.69	
99119	CNATFAEG069	34.5	9.09	-75.23	2.46	16.01	2.93	-68.36	2.52	5.33	
99120	CNATFAEG068	34.5	8.77	-73.22	2.28	15.18	2.83	-67.15	2.37	5.06	
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: ANAFAS 7.6.3 (2025)

Figura 42 - Caso 2. Relatório de Níveis de Curto Circuito (ANAFAS)

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas - 7.6.3-Mar24

ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2029 = VERSÃO 10/05/2024 = BR2912PH.ANA

=====

CICLO DO PAR ANO 2025 / 2029 - REVISÃO 0
CASO DE REFERÊNCIA BR2912PH.ANA GERADO A PARTIR DO CASO DE REFERÊNCIA
BR2812PH.ANA DE 10/05/2024, APLICANDO-SE OS ARQUIVOS DE ALTERAÇÃO
NNE2912PH.ALT, SECO2912PH.ALT E SUL2912PH.ALT.

=====

RELATÓRIO DE NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO

IDENTIFICAÇÃO		T R I F Á S I C O					M O N O F Á S I C O				
NUM.	NOME	VBAS	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----											
6301	SOBRAD-BA230	230.0	21.54	-87.52	18.74	54.66	21.24	-87.04	19.16	55.29	
5742	CNOVA2-BA034	34.5	11.26	-84.83	11.05	27.91	4.61	-88.59	40.62	12.56	
5739	CNOVA2-BA230	230.0	3.26	-80.16	5.76	7.29	3.71	-81.66	6.73	8.50	
95742	CNBTFAEG086	34.5	10.73	-82.37	7.46	25.14	4.29	-84.57	10.52	10.58	
92200	CB_UCD	34.5	11.24	-84.73	10.84	27.79	4.60	-88.42	36.27	12.47	
93300	CB_UCT	34.5	11.26	-84.81	11.01	27.89	4.61	-88.56	39.67	12.54	
98106	CNA-AEG084	0.6	21.69	-85.96	14.14	55.23	23.10	-86.07	14.56	59.00	
99106	CNATFAEG084	34.5	9.77	-76.38	4.13	20.28	3.79	-77.99	4.70	8.11	
99121	SE-HIBRIDA	34.5	10.18	-82.56	3.29	19.22	3.59	-75.84	3.96	7.38	
98107	CNA-AEG085	0.6	21.55	-85.63	13.10	54.46	23.00	-85.84	13.75	58.41	
99107	CNATFAEG085	34.5	9.55	-79.08	2.88	17.44	3.49	-74.82	3.69	7.04	
99122	UFV 34.5	34.5	10.11	-81.88	3.13	18.87	3.59	-75.51	3.87	7.33	
98122	CGE_CNA_UFV	0.6	22.95	-82.96	8.10	54.47	23.29	-83.12	8.29	55.49	
98123	UFV 0.6	0.6	20.06	-78.38	4.86	43.23	20.32	-78.46	4.90	43.88	
99128	RLC 34.5	34.5	10.11	-81.87	3.13	18.87	3.59	-75.51	3.87	7.33	
98128	RLC 0.38	0.4	34.20	-79.60	5.45	75.53	35.88	-80.10	5.73	80.06	
98103	CNA-AEG081	0.6	21.75	-86.19	15.02	55.71	23.15	-86.24	15.21	59.36	
98104	CNA-AEG082	0.6	21.72	-86.09	14.62	55.50	23.13	-86.16	14.91	59.20	
98105	CNA-AEG083	0.6	21.71	-86.02	14.39	55.37	23.11	-86.12	14.74	59.10	
98108	CNA-AEG080	0.6	21.74	-86.16	14.91	55.65	23.14	-86.22	15.13	59.31	
98109	CNA-AEG079	0.6	21.72	-86.12	14.75	55.55	23.13	-86.19	15.01	59.24	
98110	CNA-AEG078	0.6	21.71	-86.08	14.60	55.46	23.12	-86.16	14.90	59.16	
98111	CNA-AEG077	0.6	21.69	-86.04	14.43	55.35	23.10	-86.13	14.77	59.08	
98112	CNA-AEG076	0.6	21.67	-85.98	14.24	55.24	23.09	-86.09	14.63	59.00	
98113	CNA-AEG075	0.6	21.66	-85.93	14.06	55.12	23.08	-86.05	14.50	58.91	
98114	CNA-AEG074	0.6	21.64	-85.88	13.89	55.01	23.06	-86.02	14.36	58.83	
98115	CNA-AEG073	0.6	21.62	-85.83	13.72	54.90	23.05	-85.98	14.23	58.74	
98116	CNA-AEG072	0.6	21.61	-85.76	13.49	54.76	23.04	-85.93	14.06	58.64	
98117	CNA-AEG071	0.6	21.59	-85.68	13.23	54.60	23.02	-85.87	13.85	58.51	
98118	CNA-AEG070	0.6	21.57	-85.59	12.97	54.44	23.01	-85.81	13.65	58.39	
98119	CNA-AEG069	0.6	21.54	-85.47	12.62	54.21	22.99	-85.72	13.37	58.21	
98120	CNA-AEG068	0.6	21.52	-85.37	12.35	54.02	22.97	-85.65	13.15	58.07	
99103	CNATFAEG081	34.5	10.65	-81.97	7.09	24.73	4.24	-83.96	9.46	10.31	
99104	CNATFAEG082	34.5	10.26	-79.38	5.33	22.55	4.04	-81.15	6.42	9.21	
99105	CNATFAEG083	34.5	10.02	-77.92	4.67	21.41	3.92	-79.60	5.45	8.65	
99108	CNATFAEG080	34.5	10.52	-81.30	6.53	24.09	4.17	-83.07	8.23	9.93	
99109	CNATFAEG079	34.5	10.30	-80.29	5.85	23.08	4.04	-81.52	6.71	9.29	
99110	CNATFAEG078	34.5	10.09	-79.35	5.32	22.16	3.92	-80.09	5.72	8.74	
99111	CNATFAEG077	34.5	9.86	-78.36	4.86	21.24	3.79	-78.62	4.97	8.20	
99112	CNATFAEG076	34.5	9.64	-77.23	4.41	20.31	3.67	-77.23	4.41	7.73	
99113	CNATFAEG075	34.5	10.51	-84.85	4.06	21.01	3.56	-75.94	3.99	7.32	
99114	CNATFAEG074	34.5	10.32	-83.62	3.77	20.26	3.45	-74.73	3.66	6.95	
99115	CNATFAEG073	34.5	10.23	-83.03	3.52	19.70	3.35	-73.60	3.40	6.62	
99116	CNATFAEG072	34.5	10.00	-81.48	3.24	18.87	3.25	-72.39	3.15	6.29	
99117	CNATFAEG071	34.5	9.73	-79.50	2.95	17.93	3.15	-71.11	2.92	5.97	
99118	CNATFAEG070	34.5	9.47	-77.74	2.71	17.09	3.05	-69.91	2.73	5.69	
99119	CNATFAEG069	34.5	9.10	-75.32	2.45	16.00	2.93	-68.34	2.52	5.32	
99120	CNATFAEG068	34.5	8.79	-73.31	2.27	15.17	2.83	-67.13	2.37	5.06	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----											

Fonte: ANAFAS 7.6.3 (2025)

Figura 43 - Caso 3. Relatório de Níveis de Curto Circuito (ANAFAS)

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas - 7.6.3-Mar24

ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2029 = VERSÃO 10/05/2024 = BR2912PH.ANA

=====

CICLO DO PAR ANO 2025 / 2029 - REVISÃO 0
CASO DE REFERÊNCIA BR2912PH.ANA GERADO A PARTIR DO CASO DE REFERÊNCIA
BR2812PH.ANA DE 10/05/2024, APLICANDO-SE OS ARQUIVOS DE ALTERAÇÃO
NNE2912PH.ALT, SECO2912PH.ALT E SUL2912PH.ALT.

=====

RELATÓRIO DE NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO

IDENTIFICAÇÃO		T R I F Á S I C O					M O N O F Á S I C O				
NUM.	NOME	VBAS	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD
6301	SOBRAD-BA230	230.0	21.54	-87.52	18.74	54.66	21.24	-87.04	19.16	55.29	
5742	CNOVA2-BA034	34.5	11.26	-84.83	11.05	27.91	4.61	-88.59	40.62	12.56	
5739	CNOVA2-BA230	230.0	3.26	-80.16	5.76	7.29	3.71	-81.66	6.73	8.50	
95742	CNBTFAEG086	34.5	10.73	-82.37	7.46	25.14	4.29	-84.57	10.52	10.58	
92200	CB_UCD	34.5	11.24	-84.73	10.84	27.79	4.60	-88.42	36.27	12.47	
93300	CB_UCT	34.5	11.26	-84.81	11.01	27.89	4.61	-88.56	39.67	12.54	
98106	CNA-AEG084	0.6	21.69	-85.96	14.14	55.23	23.10	-86.07	14.56	59.00	
99106	CNATFAEG084	34.5	9.77	-76.38	4.13	20.28	3.79	-77.99	4.70	8.11	
99121	SE-HIBRIDA	34.5	10.18	-82.56	3.29	19.22	3.59	-75.84	3.96	7.38	
98107	CNA-AEG085	0.6	21.55	-85.63	13.10	54.46	23.00	-85.84	13.75	58.41	
99107	CNATFAEG085	34.5	9.55	-79.08	2.88	17.44	3.49	-74.82	3.69	7.04	
99122	UFV 34.5	34.5	10.11	-81.88	3.13	18.87	3.59	-75.51	3.87	7.33	
98122	CGE_CNA_UFV	0.6	22.95	-82.96	8.10	54.47	23.29	-83.12	8.29	55.49	
98123	UFV 0.6	0.6	20.06	-78.38	4.86	43.23	20.32	-78.46	4.90	43.88	
99128	RLC 34.5	34.5	10.11	-81.87	3.13	18.87	3.59	-75.51	3.87	7.33	
98128	RLC 0.38	0.4	34.20	-79.60	5.45	75.53	35.88	-80.10	5.73	80.06	
99124	BESS 34.5	34.5	10.11	-81.88	3.13	18.87	3.59	-75.51	3.87	7.33	
98124	CGE_CNA_BESS	0.7	19.43	-83.06	8.22	46.23	19.72	-83.22	8.41	47.08	
98125	BESS 0.69	0.7	19.18	-78.60	4.96	41.53	19.46	-78.69	5.00	42.21	
98103	CNA-AEG081	0.6	21.75	-86.19	15.02	55.71	23.15	-86.24	15.21	59.36	
98104	CNA-AEG082	0.6	21.72	-86.09	14.62	55.50	23.13	-86.16	14.91	59.20	
98105	CNA-AEG083	0.6	21.71	-86.02	14.39	55.37	23.11	-86.12	14.74	59.10	
98108	CNA-AEG080	0.6	21.74	-86.16	14.91	55.65	23.14	-86.22	15.13	59.31	
98109	CNA-AEG079	0.6	21.72	-86.12	14.75	55.55	23.13	-86.19	15.01	59.24	
98110	CNA-AEG078	0.6	21.71	-86.08	14.60	55.46	23.12	-86.16	14.90	59.16	
98111	CNA-AEG077	0.6	21.69	-86.04	14.43	55.35	23.10	-86.13	14.77	59.08	
98112	CNA-AEG076	0.6	21.67	-85.98	14.24	55.24	23.09	-86.09	14.63	59.00	
98113	CNA-AEG075	0.6	21.66	-85.93	14.06	55.12	23.08	-86.05	14.50	58.91	
98114	CNA-AEG074	0.6	21.64	-85.88	13.89	55.01	23.06	-86.02	14.36	58.83	
98115	CNA-AEG073	0.6	21.62	-85.83	13.72	54.90	23.05	-85.98	14.23	58.74	
98116	CNA-AEG072	0.6	21.61	-85.76	13.49	54.76	23.04	-85.93	14.06	58.64	
98117	CNA-AEG071	0.6	21.59	-85.68	13.23	54.60	23.02	-85.87	13.85	58.51	
98118	CNA-AEG070	0.6	21.57	-85.59	12.97	54.44	23.01	-85.81	13.65	58.39	
98119	CNA-AEG069	0.6	21.54	-85.47	12.62	54.21	22.99	-85.72	13.37	58.21	
98120	CNA-AEG068	0.6	21.52	-85.37	12.35	54.02	22.97	-85.65	13.15	58.07	
99103	CNATFAEG081	34.5	10.65	-81.97	7.09	24.73	4.24	-83.96	9.46	10.31	
99104	CNATFAEG082	34.5	10.26	-79.38	5.33	22.55	4.04	-81.15	6.42	9.21	
99105	CNATFAEG083	34.5	10.02	-77.92	4.67	21.41	3.92	-79.60	5.45	8.65	
99108	CNATFAEG080	34.5	10.52	-81.30	6.53	24.09	4.17	-83.07	8.23	9.93	
99109	CNATFAEG079	34.5	10.30	-80.29	5.85	23.08	4.04	-81.52	6.71	9.29	
99110	CNATFAEG078	34.5	10.09	-79.35	5.32	22.16	3.92	-80.09	5.72	8.74	
99111	CNATFAEG077	34.5	9.86	-78.36	4.86	21.24	3.79	-78.62	4.97	8.20	
99112	CNATFAEG076	34.5	9.64	-77.23	4.41	20.31	3.67	-77.23	4.41	7.73	
99113	CNATFAEG075	34.5	10.51	-84.85	4.06	21.01	3.56	-75.94	3.99	7.32	
99114	CNATFAEG074	34.5	10.32	-83.62	3.77	20.26	3.45	-74.73	3.66	6.95	
99115	CNATFAEG073	34.5	10.24	-83.11	3.52	19.71	3.35	-73.60	3.40	6.62	
99116	CNATFAEG072	34.5	10.01	-81.56	3.24	18.89	3.25	-72.39	3.15	6.29	
99117	CNATFAEG071	34.5	9.74	-79.58	2.95	17.94	3.15	-71.11	2.92	5.97	
99118	CNATFAEG070	34.5	9.48	-77.81	2.71	17.10	3.05	-69.91	2.73	5.69	
99119	CNATFAEG069	34.5	9.11	-75.39	2.45	16.02	2.93	-68.34	2.52	5.32	
99120	CNATFAEG068	34.5	8.79	-73.38	2.27	15.19	2.83	-67.13	2.37	5.06	

=====

Fonte: ANAFAS 7.6.3 (2025)