



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Garanhuns

Bacharelado em Engenharia Elétrica

DANIELA DOS SANTOS SILVA

***CURTAILMENT E ARMAZENAMENTO DA ENERGIA: EFEITOS NO FLUXO DE  
POTÊNCIA EM REGIÃO DE ALTA GERAÇÃO RENOVÁVEL E CARGA ATÍPICA***

Garanhuns - PE

2025

DANIELA DOS SANTOS SILVA

***CURTAILMENT* E ARMAZENAMENTO DA ENERGIA: EFEITOS NO FLUXO DE  
POTÊNCIA EM REGIÃO DE ALTA GERAÇÃO RENOVÁVEL E CARGA ATÍPICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Coordenação do Curso Superior Bacharelado  
em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de  
Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como  
requisito para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Wilker Victor da Silva Azevêdo.

Garanhuns - PE

2025

S586a

Silva, Daniela dos Santos

Curtilment e armazenamento da energia: efeitos no fluxo de potência em região de alta geração renovável e carga atípica / Daniela dos Santos Silva ; orientador Wilker Victor da Silva Azevedo, 2025.  
56f. : il.

Orientador: Wilker Victor da Silva Azevedo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Energia elétrica - Brasil. 2. Energia elétrica - Armazenamento  
3. Energia - Fontes alternativas. 4. Sistemas de energia elétrica. 5. Energia renovável. I. Título. II. Azevedo, Wilker Victor da Silva (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 621.310981

Louise Machado Freire Dias – CRB4/2267

DANIELA DOS SANTOS SILVA

***CURTAILMENT* E ARMAZENAMENTO DA ENERGIA: EFEITOS NO FLUXO DE  
POTÊNCIA EM REGIÃO DE ALTA GERAÇÃO RENOVÁVEL E CARGA ATÍPICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Coordenação do Curso Superior Bacharelado  
em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de  
Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como  
requisito para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: 15/08/2025

---

Dr. Wilker Victor da Silva Azevêdo (IFPE, *Campus Garanhuns*)

Orientador

---

Dr. Márcio Severino da Silva (IFPE, *Campus Garanhuns*)

Avaliador Interno

---

Dra. Yonatha Marques de Albuquerque Melo (UNIFESSPA)

Avaliadora Externa

Garanhuns

2025

Dedico aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e persistência para superar desafios.

Aos meus pais, Damião e Rosalia, que apesar das adversidades, sempre apoiaram os seus filhos.

A minha irmã Cintia, que me acompanhou e me auxiliou em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos Dhiogo e Gisele, por toda a confiança deposita no meu potencial.

Ao meu noivo Ismael que sempre me apoiou e torceu por mim.

Em memória da minha amiga Tainá, que sempre acreditou em mim e acompanhou minha jornada. Sua partida precoce deixou um vazio imenso, mas sua presença continua viva em minhas lembranças. Dedico este trabalho à sua memória, com profundo carinho e saudade.

Aos meus amigos Lidiane Silva, Kássio Vinicius e Lucas Pereira.

Aos amigos que ganhei durante a graduação em especial as seguintes pessoas: Matheus, Lucas, Wiliana, José Danilo, Jason, Joel, Felipe, Lyvia, Jamily, Ester, Ana Bia, Jhon, Fernando, Agda e inúmeros outros.

A Nana por todo o cuidado comigo.

Agradeço a todos os terceirizados do Instituto Federal de Pernambuco – Campus Garanhuns, em especial: Jó, Letícia, seu Gio, Dorlange, Luciana, Jaqueline, Leide, Elaine, Diego, Arnóbio, seu Gilson e Josenildo, minha gratidão pelos momentos de escuta durante esses cinco anos de curso.

As bibliotecárias Riane e Thayse, por todos os momentos de conversa.

A chefe do financeiro Mônica Catalupo pelas boas conversas.

Aos meus amigos além da faculdade, que foram fundamentais, destaco Alessandra, Kleber, Stella, Vitória e Pietra.

Dentre os docentes, destaco meu orientador Wilker Azevêdo, por todos os ensinamentos transmitidos durante a graduação.

A todos que vivenciaram comigo a ACETEC e Bright Strategies, meu muito obrigado.

Por fim, agradeço ao CEPEL por disponibilizar a licença acadêmica de seus softwares de simulação aos alunos do IFPE - Campus Garanhuns, contribuindo para a adesão e expansão de conhecimentos a respeito da operação de Sistemas Elétricos de Potência.

*" Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos." (Provérbios 16:3)*

## RESUMO

A matriz elétrica brasileira é formada principalmente por energias provenientes de fontes renováveis como a solar e eólica. No entanto, a inserção dessas fontes introduz novos desafios aos agentes do setor elétrico. Isso porque, enquanto as fontes eólicas e solares cresciam de forma exponencial, as linhas de transmissão e carga do sistema não avançavam na mesma escala. Como resultado, ações de *curtailment* têm se tornando cada vez mais frequente para garantir o equilíbrio entre geração-carga. Esses desafios evidenciam a necessidade de introduzir novas tecnologias para auxiliar na superação dos limites enfrentados. Assim, os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) apresentam-se como uma solução eficaz, visto que, são sistemas que conseguem armazenar e injetar energia em momentos desejáveis. Nesse contexto, o trabalho buscou trazer um estudo de caso dos desdobramentos da inserção dessas tecnologias em rede elétrica inspirada no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), com foco na subestação de Ourolândia 230 kV localizada no estado da Bahia. No contexto metodológico, foram estudados os requisitos dos Procedimentos de Rede, modelagem do Sistema de Armazenamento e elaboradas estratégias de simulação utilizando o ANAREDE. Os principais resultados indicam que, para todos os cenários base de simulação observou-se que algumas barras do sistema apresentaram violação dos limites de tensão sendo necessário inserir elementos de controle de tensão. Sobre a inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia, observou-se que, não houve nenhuma violação dos limites operacionais. Além disso, percebe-se que sua aplicação no cenário de carga pesada contribuiu de forma significativa no auxílio do atendimento à carga local.

**Palavras-chave:** Armazenamento de Energia. *Curtailment*. Sistema Elétrico Brasileiro. Energia Renovável.

## **ABSTRACT**

The Brazilian electricity grid is primarily comprised of renewable energy sources such as solar and wind. However, the inclusion of these sources presents new challenges for electricity sector players. While wind and solar power grew exponentially, the system's transmission lines and load capacity did not grow at the same pace. As a result, curtailment measures have become increasingly common to ensure generation-load balance. These challenges highlight the need to introduce new technologies to help overcome these limitations. Thus, Energy Storage Systems (ESS) present an effective solution, as they can store and inject energy at desirable times. In this context, this paper sought to present a case study of the implications of incorporating these technologies into an electricity grid inspired by the Brazilian Electric System (SEB), focusing on the Orolândia 230 kV substation located in the state of Bahia. In the methodological context, the requirements of the Grid Procedures, storage system modeling, and simulation strategies were developed using ANAREDE. The main results indicate that, for all baseline simulation scenarios, some system buses violated voltage limits, requiring the insertion of voltage control elements. Regarding the insertion of energy storage systems, no operational limits were violated. Furthermore, their application in the heavy-load scenario contributed significantly in the supporting at the local load.

**Keywords:** Energy Storage. Curtailment. Brazilian Electric System. Renewable Energy.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Estimativa da matriz elétrica em 2034 .....                                              | 15 |
| Figura 2.2 - Evolução da Capacidade instalada de usinas eólicas, fotovoltaicas e da MMGD no SIN. .... | 16 |
| Figura 2.3 - Capacidade instalada mundial de armazenamento de energia. ....                           | 17 |
| Figura 2.4 - Tecnologias de construção de baterias.....                                               | 18 |
| Figura 3.1 - Exemplo de dados de entrada do ANAREDE. ....                                             | 29 |
| Figura 3.2 - Interface gráfica do ANAREDE. ....                                                       | 29 |
| Figura 3.3 - Ferramentas do ANAREDE. ....                                                             | 30 |
| Figura 3.4 - Adição de dados de barra CA. ....                                                        | 30 |
| Figura 3.5 - Função de Fluxo de Potência do ANAREDE. ....                                             | 31 |
| Figura 3.6 - Cálculo do Fluxo de Potência no ANAREDE. ....                                            | 31 |
| Figura 3.7 - Modelagem do SAE no ANAREDE .....                                                        | 33 |
| Figura 4.1 – Subestação Ouroelândia e adjacências. ....                                               | 35 |
| Figura 4.2 - Curva de Geração Média Horária. ....                                                     | 36 |
| Figura 4.3 - Carga leve antes da adição do SAE. ....                                                  | 41 |
| Figura 4.4 - Carga média antes da adição do SAE. ....                                                 | 42 |
| Figura 4.5 - Carga pesada antes da adição do SAE. ....                                                | 43 |
| Figura 4.6 - Carga leve depois da adição do SAE.....                                                  | 45 |
| Figura 4.7 - Carga média depois da adição do SAE. ....                                                | 47 |
| Figura 4.8 - Carga pesada depois da adição do SAE.....                                                | 49 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 - Classificação das barras de um Sistema de Fluxo de Potência. ....     | 20 |
| Tabela 3.1 - Tensão admissível entre fases a 60 Hz. ....                           | 27 |
| Tabela 4.1 - Dados de barras do subsistema. ....                                   | 38 |
| Tabela 4.2 - Capacidade das linhas de transmissão. ....                            | 39 |
| Tabela 4.3 - Capacidade dos transformadores. ....                                  | 39 |
| Tabela 4.4 - Tensões nas barras para diferentes patamares de carga. ....           | 40 |
| Tabela 4.5 - Capacidade das linhas de transmissão no cenário de carga leve. ....   | 45 |
| Tabela 4.6 - Capacidade das linhas de transmissão no cenário de carga média. ....  | 46 |
| Tabela 4.7 - Capacidade das linhas de transmissão no cenário de carga pesada. .... | 48 |

## SUMÁRIO

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                           | 12 |
| 1.1 Objetivos                                                                  | 13 |
| 1.2 Estrutura do trabalho                                                      | 13 |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                                | 14 |
| 2.1 Evolução das Energias Renováveis no Brasil                                 | 14 |
| 2.2 <i>Curtailment</i> no Brasil                                               | 15 |
| 2.3 Sistemas de Armazenamento no Mundo                                         | 17 |
| 2.4 Sistemas de Armazenamento no Brasil                                        | 18 |
| 2.5 Fluxo de potência                                                          | 19 |
| <b>3. METODOLOGIA</b>                                                          | 26 |
| 3.1 Procedimentos de Rede                                                      | 26 |
| 3.2 Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologias para estudos elétricos | 27 |
| 3.3. Procedimento para Dimensionar a Potência do SAE                           | 32 |
| 3.4. Modelagem do SAE no ANAREDE                                               | 33 |
| <b>4. ESTUDO DE CASO</b>                                                       | 35 |
| 4.1 Particularidade da Bahia                                                   | 36 |
| 4.2. Definição de potência do carregamento e injeção                           | 37 |
| 4.2. Simulação e análise de resultados                                         | 37 |
| 4.3. Condições Operativas Normais                                              | 40 |
| 4.3.1. Fluxo de Potência                                                       | 40 |
| 4.4. Inserção do Sistema de Armazenamento de Energia no sistema                | 44 |
| 4.4.1. Fluxo de potência                                                       | 44 |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                                 | 51 |
| <b>6. REFERÊNCIAS</b>                                                          | 53 |

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2023*) as emissões de Gases de Efeito Estufa - GEE decorrentes de atividades humanas no período de 2011-2020 causaram um aumento de cerca de 1,1°C na temperatura na superfície global quando comparado a janela de tempo entre 1850-1900. Esse cenário evidenciou a urgência de medidas adequadas para mitigar os impactos climáticos causados pelo setor de energia.

Sobre o tema, o Diretor Geral da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) informa que, para reduzir os efeitos das mudanças climáticas, faz-se necessário realizar uma transição energética baseada em energias renováveis (IRENA, 2017). Logo, evidencia-se que a transição energética da matriz elétrica mundial apresenta-se como elemento chave para atenuar as emissões de GEE.

Dentre as fontes de energia renováveis mais promissoras destaca-se as energias provindas de fontes eólicas e solares. No Brasil, motivado pelo grande potencial de geração e pelos incentivos regulatórios, verificou-se uma expressiva participação de energia renovável na matriz elétrica brasileira. Em contrapartida, para a mesma janela de tempo, observou-se que a transmissão e o crescimento da carga não avançaram na mesma escala. Como consequência, tem-se tornado cada vez mais frequente ações de *curtailment* (redução forçada na geração de energia elétrica no sistema de potência devido a restrições), especialmente nos momentos de sobre oferta dessa geração (ONS, 2025a).

Diante desse cenário, é imprescindível que novas tecnologias sejam introduzidas no setor elétrico com vistas a diminuir os atuais gargalos vivenciados. Nesse contexto, os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica apresentam-se como uma possível solução. De acordo com os estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), as tecnologias de armazenamento possuem potencial para transformar o setor elétrico dada a sua grande diversidade de serviços.

## 1.1 Objetivos

Na expectativa de que Sistemas de Armazenamentos de Energia (SAEs) se consolidem no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) nos próximos anos devido, principalmente ao crescimento de energias renováveis, este trabalho tem como objetivo geral realizar a análise da inserção do processo de armazenamento e despacho de energia considerando a aplicação desse tipo de tecnologia em um trecho e rede elétrica inspirada no Sistema Interligado Nacional na região geoeletrica da Bahia. Como objetivos específicos:

- Discorrer sobre as limitações atuais do SIN em relação à transmissão de energia proveniente das fontes eólicas e solares;
- Aplicar metodologia para definição da potência passível de armazenamento e despacho de um SAE baseada em energia renovável;
- Realizar estudos de fluxo de potência em diferentes patamares de carga (leve, média e pesada), avaliando condições operativas normais e após a inserção de um SAE na subestação Ourorândia.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Nos demais capítulos deste trabalho, serão abordados:

- Capítulo 2: São abordados a evolução das energias renováveis, as ações de *curtailment* no Brasil, a evolução dos Sistemas de Armazenamento de Energia no mundo e no Brasil, além de abordar princípios sobre a condução de estudos sobre o fluxo de potência.
- Capítulo 3: Apresentação da metodologia utilizada, detalhando o referido submódulo dos Procedimentos de Rede, apresentação da ferramenta utilizada para realizar o estudo (com detalhes acerca da sua utilização), e indicação da metodologia empregada para definir a potência do Sistema de Armazenamento de Energia.
- Capítulo 4: Descrição e definição para cada patamar de carga do SIN e análises dos desdobramentos no desempenho do sistema elétrico escolhido após a inserção do SAE.
- Capítulo 5: Síntese dos resultados obtidos e indicação de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção do trabalho busca contextualizar a evolução de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, além de apresentar o atual gargalo enfrentado pelos agentes do setor. Além disso, a seção também irá abordar conceitos relacionados a Sistemas de Armazenamento de Energia, trazendo uma visão sobre o cenário atual em que se encontra o Brasil em relação a consolidação do uso dessa tecnologia de armazenamento.

### 2.1 Evolução das Energias Renováveis no Brasil

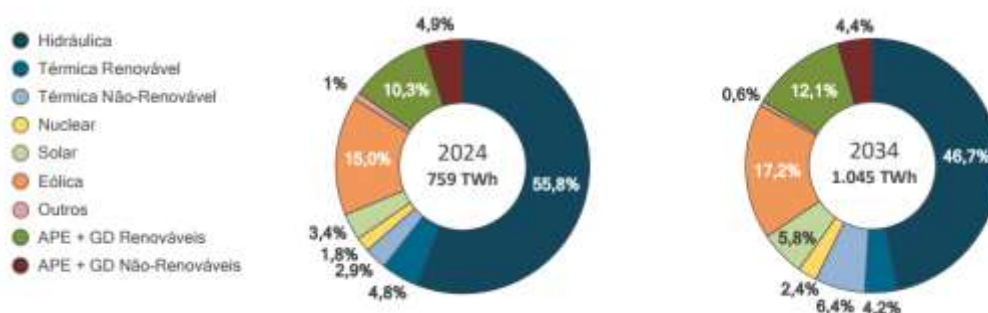
A geração de energia elétrica no mundo é baseada, principalmente, em combustíveis fósseis como carvão e gás natural. Em 2022, essas fontes representaram 58,1% da matriz elétrica mundial (EPE, 2025). Em contrapartida, segundo o Sumário executivo World Energy Outlook 2024, em 2023, um terço da demanda de energia mundial foi atendida por fontes provenientes de combustíveis fósseis (IEA, 2024).

Frente a esse cenário, o Brasil destaca-se pela elevada participação de fontes renováveis em sua matriz elétrica. O Plano Decenal de Energia (PDE) 2034, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), concluiu que, para um horizonte de 10 anos, haverá um crescimento significativo de fontes renováveis na matriz elétrica, principalmente daquelas provenientes de fontes eólica e solar, em detrimento da participação de hidrelétricas.

A evolução das energias renováveis no Brasil está diretamente ligada à transição energética vivenciada globalmente. A crescente necessidade de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) é o principal fator que impulsiona a mudança na matriz elétrica nacional e internacional (Figura 2.1).

Embora a inserção de geração de baixo carbono seja benéfica para toda a sociedade, ela também introduz novos desafios em todas as camadas do setor. O principal deles é a intermitência uma vez que a produção de energia advinda dessas fontes dependem exclusivamente da velocidade dos ventos ou da radiação solar.

Figura 2.1 - Estimativa da matriz elétrica em 2034



Fonte: PDE (2024).

A imprevisibilidade de algumas fontes dificulta o equilíbrio entre a oferta e demanda de energia, premissa fundamental da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), exigindo muitas vezes a intervenção dos agentes, como o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) para garantir segurança nas operações do sistema.

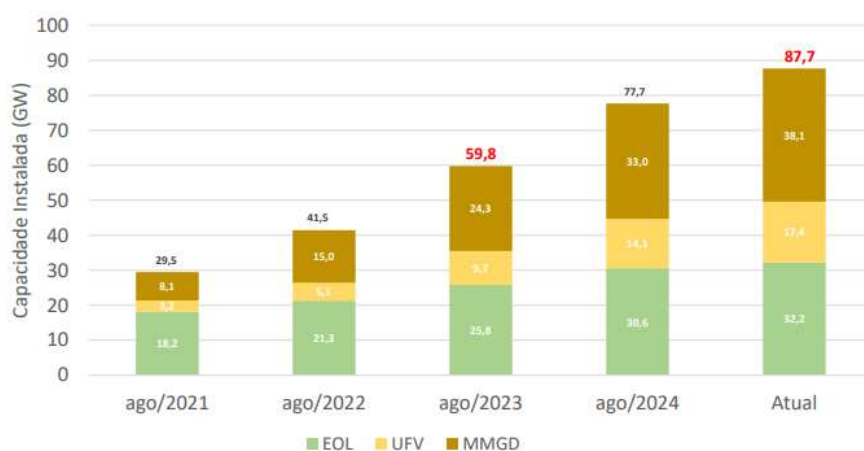
## 2.2 Curtailment no Brasil

O *curtailment* refere-se a redução, limitação ou corte de energia elétrica em cenários onde a geração supera a demanda ou a capacidade do sistema de transmissão disponível. Sobre neste assunto, o relatório de diagnóstico e perspectiva da evolução dos cortes de geração no Brasil publicado pelo ONS em 26 de junho de 2025, informou que um dos fatores que impulsionaram a ampliação dessa prática no país foi o crescimento expressivo de fontes renováveis, em um ritmo superior ao crescimento da carga do SIN (ONS, 2025a).

De acordo com o mesmo relatório, a capacidade instalada de usinas eólicas, fotovoltaicas e MMGD no SIN, no período de agosto de 2021 a abril de 2025 alcançou um montante de 87,7 GW (Figura 2.2).

Em contrapartida, segundo o relatório do Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN (PAR/PEL), ciclo 2024, projeta-se uma carga da ordem de 120 GW para o ano de 2029, que corresponde a um crescimento de apenas 12% quando comparada à máxima carga verificada em 2024. Essa incompatibilidade do ritmo de crescimento entre geração-carga torna o sistema mais susceptível a ações de *curtailment*.

Figura 2.2 - Evolução da Capacidade instalada de usinas eólicas, fotovoltaicas e da MMGD no SIN.



Fonte: ONS (2025).

As restrições refletem as condições e limitações do sistema em diferentes contextos (ONS, 2025a).

- I. Indisponibilidade Externa: Restrições decorrentes de limitações operacionais externas às usinas.
- II. Confiabilidade: Restrições operativas para atender aos requisitos de segurança do sistema, como limites de carregamento das linhas de transmissão.
- III. Razão Energética: Cortes motivados por sobreoferta de energia, quando a geração excede a demanda em determinados momentos.

Entre 2022 e 2024 observou-se um aumento expressivo no *curtailment* associado à confiabilidade e à indisponibilidade externa, evidenciando a necessidade de intervenções operacionais para garantir a segurança do sistema elétrico. Esses cortes foram aplicados conforme os critérios estabelecidos nos Procedimentos de Rede, priorizando geradores cuja operação impacta mais diretamente os limites operativos do sistema. Por outro lado, os cortes por razões energéticas refletem a impossibilidade de alocar toda a geração disponível na curva de carga do SIN. Esse cenário ocorre principalmente devido à sobreoferta de energia em horários específicos. Para esses casos, as restrições foram realizadas de maneira equilibrada e distribuída entre as fontes de geração despachadas pelo ONS (ONS, 2025a).

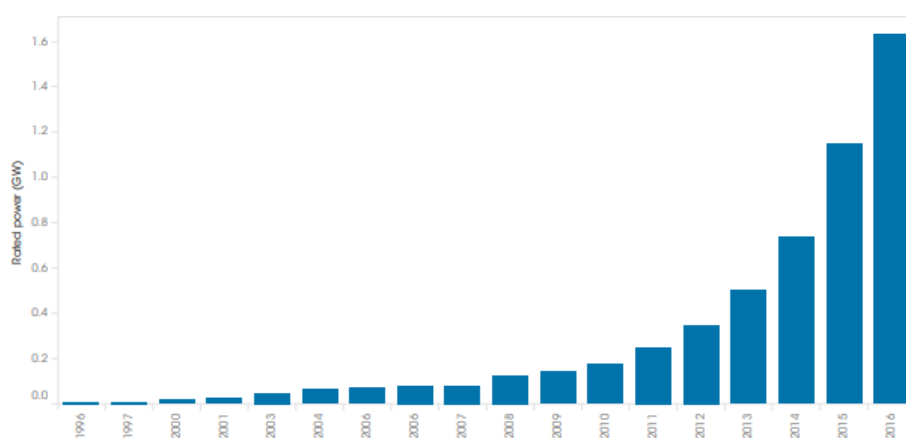
Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de introduzir novas tecnologias no setor com o objetivo de superar os desafios supracitados. Nesse

contexto, os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) apresentam-se como uma solução eficaz, visto que são capazes de armazenar e injetar energia em momentos oportunos.

### 2.3 Sistemas de Armazenamento no Mundo

A Figura 2.3 apresenta o crescimento verificado nos últimos anos da aplicação de SAEs. No ano de 2016, houve um registro de 1,6 GW de capacidade instalada mundial de armazenamento de energia.

Figura 2.3 - Capacidade instalada mundial de armazenamento de energia.

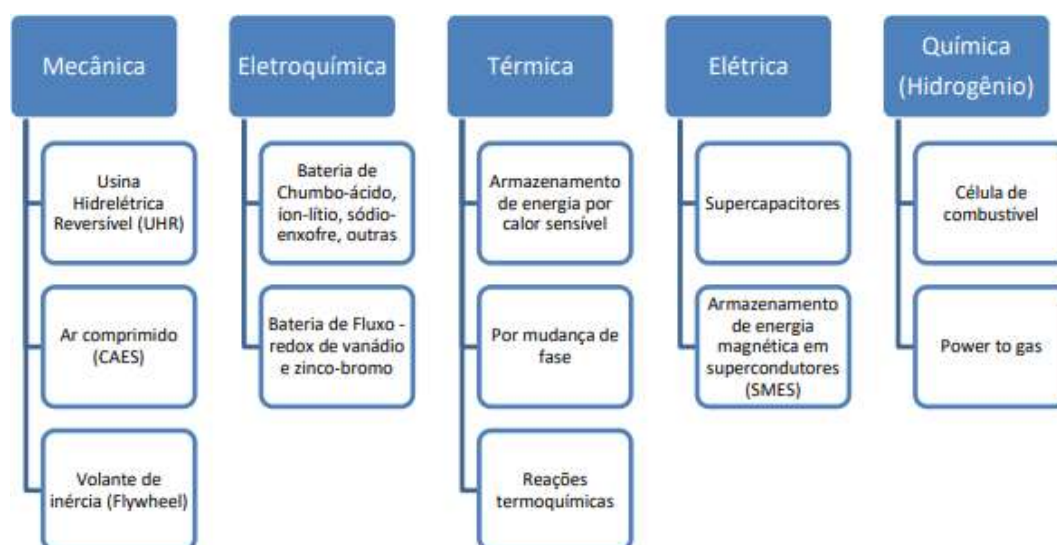


Fonte: IRENA (2017).

Segundo a última previsão da empresa de pesquisa BloombergNEF (BNEF), até o ano de 2030, estima-se que a soma das instalações de armazenamento de energia de todo o planeta alcance um acumulado de 411 gigawatts (BNEF, 2022). Dentre os países pioneiros no uso dessas tecnologias, destacam-se os Estados Unidos e a China, que detêm mais da metade das instalações globais de armazenamento.

As tecnologias de construção desses dispositivos podem ser divididas em cinco classes, são elas: química, eletroquímica, elétrica, mecânica e térmica (EASE, 2025). Detalhes dessas classificações podem ser vistas na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Tecnologias de construção de baterias.



Fonte: EPE (2019).

Dentre as possibilidades de armazenamento apresentadas acima, destaca-se que, devido a sua grande versatilidade de aplicações, o armazenamento por meio de baterias eletroquímicas apresenta grande potencial de ser uma das principais tecnologias utilizadas mundialmente, ressaltando aquelas constituídas de íons de lítio devido a quedas de preços verificada nos últimos anos (EPE, 2019).

## 2.4 Sistemas de Armazenamento no Brasil

Sobre o tema Armazenamento de Energia no Brasil, embora tenha ganhado destaque nos últimos anos, a temática já vinha sendo discutida pelos Agentes do setor a um pouco mais de tempo. A título de exemplo, destaca-se o estudo realizado pela EPE, em novembro de 2019, a qual discutiu sobre as possíveis aplicações do SAE no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), além de contextualizar as questões atreladas a sua consolidação no país, como questões de regulação e de mercado (EPE, 2019).

Em 23 de março de 2023, o primeiro Sistema de Armazenamento de Energia entrou em operação no sistema de transmissão brasileiro, sob responsabilidade da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – ISA CTEEP, localizado na subestação de Registro 138 kV, no estado de São Paulo. De acordo com a ANEEL, o empreendimento conta com uma capacidade de 30 MW, com duas horas de descarga, cuja finalidade foi suprir a demanda apresentada pela carga do litoral Sul de São Paulo no verão de 2022/2023 (ANEEL, 2023).

Em 19 de outubro de 2023, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) instaurou a Consulta Pública 039/2023, que tem como objetivo, colher subsídios da sociedade para a construção de regulamentação para o armazenamento de energia no Brasil. Composta por três fases, atualmente, a consulta encontra-se analisando as contribuições recebidas pela segunda fase (ANEEL, 2023).

Recentemente, em 16 de junho de 2025, o ONS promoveu um *Workshop* para tratar sobre os requisitos técnicos para aplicação da referida tecnologia no SIN (ONS, 2025b). O evento buscou colher contribuições técnicas dos principais fabricantes mundiais que estão liderando o mercado de produção de Sistemas de Armazenamento de Energia.

Apesar dos avanços significativos, verifica-se que ainda há poucos estudos destinados a analisar os impactos que o SAE pode ocasionar ao sistema sob a perspectiva elétrica.

## **2.5 Fluxo de potência**

Segundo Bichels (2018, p. 24), o Sistema Elétrico de Potência (SEP) é “o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica”. Diante de tamanha abrangência, é imprescindível garantir a segurança e o funcionamento do sistema como um todo. Buscando atingir esse objetivo, estudos elétricos norteados pelos Procedimentos de Rede do ONS são realizados com o propósito de analisar o estado operativo do sistema sob diversas perspectivas.

Dentre as formas de análise, destaca-se os estudos realizados pelo fluxo de potência, pois são essenciais para análise de um sistema elétrico, visto que através deste tipo de simulação, é possível extrair o estado operativo da rede elétrica para determinadas condições.

O problema do fluxo de potência consiste em encontrar um ponto de operação em estado estacionário de um sistema. Em outras palavras, o objetivo é obter todas as tensões dos barramentos e potências complexas que estão fluindo em todo o sistema, além de algumas outras grandezas de interesse (GÓMEZ-EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2009).

De acordo com Monticelli e Garcia (2011), a formulação fundamental do fluxo de potência considera quatro variáveis associadas a cada barra do sistema, são elas

- $V_K$  – Magnitude de tensão nodal (barra k);
- $\theta_K$  – Ângulo da tensão nodal;
- $G_K$  – Geração líquida de potência ativa; e
- $Q_K$  – Injeção líquida de potência reativa.

Para cada barra do sistema, apenas duas grandezas são conhecidas, as demais são encontradas a partir da solução do fluxo de potência. Dessa forma, as barras do sistema podem ser classificadas em três tipos, conforme apresentado na tabela abaixo.

Tabela 2.1 - Classificação das barras de um Sistema de Fluxo de Potência.

| Barra      | Variáveis conhecidas | Variáveis desconhecidas | Características                     |
|------------|----------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| $P_V$      | $P_K, V_K$           | $Q_K, \theta_K$         | Barra de tensão controlada          |
| $P_Q$      | $P_K, Q_K$           | $\theta_K, V_K$         | Barra de carga                      |
| $P_\theta$ | $\theta_K, V_K$      | $P_K, Q_K$              | Barra de referência ou <i>Slack</i> |

Fonte: Adaptado pela autora.

- Barra de referência ou *slack* ( $P_\theta$ ): em um sistema, existe apenas um barramento de referência, neste o valor de tensão e ângulo são conhecidos. Seus dados de entrada apresentam ângulo igual a zero graus e magnitude de tensão próxima a um p.u (por unidade). Através do cálculo de fluxo de potência, é possível determinar a potência ativa e reativa da barra (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2017, p. 345).
- Barra de tensão controlada ( $P_V$ ): é fixado o valor de tensão na barra e a potência ativa gerada é conhecida. A partir dessas variáveis, busca-se encontrar a potência reativa e o ângulo de fase da barra. Geralmente equipamentos como geradores, capacitores de derivação comutados ou comutadores estáticos estão presentes nessas barras. Vale ressaltar que os limites de potência reativa dos equipamentos devem ser informados, pois se um dos limites for superado, a saída de potência reativa é mantida em seu limite e o barramento se torna um barramento PQ (GLOVER; SARMA;

OVERBYE, 2017, p. 346).

- Barra de carga (PQ): nesta barra, a potência ativa e reativa são fixados em seus terminais e o fluxo de potência determina o valor da tensão e ângulo (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2017, p. 346).

Os estudos de fluxo de potência são realizados considerando a rede estática, ou seja, a rede elétrica é representada por um sistema de equações e inequações algébricas, pois considera-se que as variações de tempo são suficientemente lentas e com isso, os efeitos transitórios são desconsiderados (MONTICELLI; GARCIA, 2011).

Para a formulação das equações do cálculo de Fluxo de Potência, é necessário que as linhas de transmissão sejam representadas pelo modelo  $\pi$  e que os transformadores sejam representados por circuitos equivalentes (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2017, p. 346). Com esses dados, uma matriz de admitância pode ser construída.

Para um sistema de  $n$  barras, os elementos que compõem a matriz de admitância são:

- Elementos diagonais ( $Y_{kk}$ ): soma das admitâncias conectadas à barra  $k$ ;
- Elementos fora da diagonal ( $Y_{kn}$ ): soma das admitâncias conectadas entre os barramentos  $k$  e  $n$ , em que  $k \neq n$ . É importante lembrar que a respectiva soma é inserida na matriz de admitância com valor negativo.

As equações do fluxo de potência são análogas à primeira lei de Kirchhoff das Correntes (LKC), pois partem do princípio de que as potências ativas e reativa que são injetadas na barra equivalem à soma do fluxo que deixa essa mesma barra (MONTICELLI; GARCIA, 2011).

A partir da matriz de admitância, as equações nodais para um sistema podem ser expressas da seguinte forma:

$$I_k = Y_{barra} V \quad (2.1)$$

Sendo que  $I$  é o vetor N das correntes que são injetadas em cada barra do sistema e  $V$  é o vetor N das tensões de barramento. Para o barramento  $k$ , a  $k$ -ésima injeção de que pode ser calculada como:

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (2.2)$$

A potência complexa do barramento k é descrita como:

$$P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (2.3)$$

Substituindo (2.2) em (2.3):

$$P_k + jQ_k = V_k \left[ \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right]^* \quad (2.4)$$

Com a seguinte notação

$$V_n = V_n e^{j\delta_n} \quad (2.5)$$

$$Y_n = Y_n e^{j\theta_{kn}} \quad (2.6)$$

A potência complexa pode ser descrita como:

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n e^{j(\delta_k - \delta_n - \delta_{kn})} \quad (2.7)$$

Separando a parte real da parte imaginária, tem-se que:

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \delta_{kn}) \quad (2.8)$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \delta_{kn}) \quad (2.9)$$

Para encontrar as variáveis de cada barra, aplicam-se métodos iterativos às equações do fluxo de potência. Dentre os métodos que solucionam o problema, destaca-se o método de Newton-Raphson, que se baseia na expansão em série de Taylor de uma função de duas ou mais variáveis (BICHELS, 2018, p. 225).

Glover, Sarma e Overbye (2017) define quatro passos para a solução do fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson, os quais serão detalhados a seguir.

Para o problema de fluxo de potência, considera-se os vetores  $x$ ,  $y$  e  $f$  como sendo:

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2 \\ \vdots \\ P_N \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix}; \quad f(x) = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2(x) \\ \vdots \\ P_N(x) \\ Q_2(x) \\ \vdots \\ Q_N(x) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Todos os termos  $V$ ,  $P$  e  $Q$  estão em p.u (por unidade) e está em radianos. As variáveis que compõem a barra de referência são omitidas, pois já são valores conhecidos. A partir disso, as equações de Fluxo de Potência podem ser escritas como:

$$y_k = P_k = P_k(x) = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \delta_{kn}) \quad (2.11)$$

$$y_{k+N} = Q_k = Q_k(x) = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \delta_{kn}) \quad (2.12)$$

A matriz Jacobiana terá a forma:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \text{J1} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{J2} \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{J3} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{J4} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{matrix} \end{bmatrix}$$

As derivadas parciais de cada bloco que compõe a matriz Jacobiana bem como as derivadas das equações 2.11 e 2.12 estão apresentadas a seguir.

---


$$\begin{aligned}
 n \neq k \\
 J1_{kn} &= \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = V_k Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \\
 J2_{kn} &= \frac{\partial P_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \\
 J3_{kn} &= \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -V_k Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \\
 J4_{kn} &= \frac{\partial Q_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})
 \end{aligned}$$


---


$$\begin{aligned}
 n = k \\
 J1_{kk} &= \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = -V_k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \\
 J2_{kk} &= \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \\
 J3_{kk} &= \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = V_k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \\
 J4_{kk} &= \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k Y_{kk} \sin \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})
 \end{aligned}$$


---


$$k, n = 2, 3, \dots, N$$


---

Fonte: GLOVER; SARMA; OVERBYE (2017).

As quatro etapas do método de Newton-Raphson estão descritas a seguir.

$$x(i) = \begin{bmatrix} \delta(i) \\ V(i) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

1ª Etapa: calcular a matriz de diferenças:

$$\Delta y(i) = \begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P - P[x(i)] \\ Q - Q[x(i)] \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2ª Etapa: Utilizar as equações para calcular a matriz Jacobiana.

3ª Etapa: Utilizar o método de eliminação de Gauss e a substituição reversa para resolver a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} J_1(i) & J_2(i) \\ J_3(i) & J_4(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(i) \\ V(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

4ª Etapa: Por fim, calculasse  $x$  através da seguinte expressão:

$$x(i+1) = \begin{bmatrix} \delta(i+1) \\ V(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta(i) \\ V(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta(i) \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Considera-se  $x(0)$  como valor inicial, as interações são realizadas até que se haja convergência ou até que o número de interações exceda o máximo especificado. Os critérios de convergência são baseados em  $\Delta y(i)$ , denominados discrepâncias de potência em vez de  $\Delta x(i)$  se refere às discrepâncias de ângulo de fase e magnitude de tensão (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2017, p. 356).

Sob a perspectiva do planejamento, avaliar os impactos da utilização de sistemas de armazenamento para inserção em horários específicos de operação do sistema de potência pode contribuir para uma compreensão das condições, mudanças em relação ao fluxo de potência, além de potenciais restrições. Critérios para estudos, elementos metodológicos de carregamento e despacho da energia a partir de SAES e detalhes sobre procedimentos para estudos de fluxo de potência (limites, ferramentas e procedimentos de rede do ONS) serão detalhados no próximo capítulo.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados a metodologia desenvolvida para o dimensionamento do SAE, considerando as características da região estudada. Ademais, essa seção abordará os principais procedimentos, critérios e requisitos que norteia o estudo sob análise. Além de descrever o *software* em que o SAE será submetido, bem como os programas utilizados para a realização do estudo.

#### 3.1 Procedimentos de Rede

Os Procedimentos de Rede são documentos propostos pela ANEEL em conjunto com o ONS cuja finalidade é estabelecer regras para a realização de atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica no SIN (ONS, 2025c). Após a Resolução Normativa ANEEL nº 903 de 8 de dezembro de 2022, os Procedimentos de Rede foram reestruturados em nove módulos que por sua vez se organizam em documentos que versam sobre critérios, requisitos e responsabilidades, são eles:

- Módulo 1 – Relacionamento com os Agentes
- Módulo 2 - Critérios e requisitos
- Módulo 3 – Planejamento da Operação
- Módulo 4 – Programação da Operação
- Módulo 5 – Operação do Sistema
- Módulo 6 – Avaliação da Operação
- Módulo 7 – Integração das Instalações
- Módulo 8 - Administração dos Contratos e Contabilização Financeira
- Módulo 9 - Indicações

Neste trabalho será utilizado os procedimentos contidos no módulo 2 (Critérios e Requisitos). Maiores detalhes serão descritos a seguir.

### 3.2 Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologias para estudos elétricos

As premissas e critérios cotidos no referido submódulo são aplicados aos seguintes estudos elétricos: fluxo de potência; curto-circuito; estabilidade eletromecânica, transitórios eletromagnéticos, reserva de potência operativa, controle carga-frequência, recomposição do sistema e segurança de tensão.

Este submódulo abrange os critérios gerais e específicos a serem adotados nos estudos elétricos referentes à Rede de Simulação. As orientações contidas nesse documento funcionam como elementos basilares na construção de processos, como exemplo, o Plano de Operação de Médio Prazo do SIN (PAR/PEL), planejamento e programação da operação elétrica, estudos pré-operacionais e de proteção e entre outros processo.

Para estudos referente sobre Fluxo de Potência, o Submódulo 2.3 expõe os seguintes pontos:

- Os limites de carregamento das linhas de transmissão, transformadores e autotransformadores existentes são os estabelecidos nos Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST), a não ser que haja fatores limitantes ou restrições em equipamentos terminais, quando são adotados os limites constantes nos Cadastros de Limites Operacionais de Linhas de Transmissão e Transformadores (CD-CT) do Submódulo 5.11 – Cadastro de Informações Operacionais.
- A ferramenta computacional utilizada nesses estudos – Modelo para análise de redes em regime permanente é o ANAREDE.

Tabela 3.1 - Tensão admissível entre fases a 60 Hz.

| Tensão nominal de operação <sup>(1)</sup> | Condição operativa normal |                     | Condição operativa sob contingências |                     |
|-------------------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|
|                                           | (kV)                      | (pu) <sup>(2)</sup> | (kV)                                 | (pu) <sup>(2)</sup> |
| < 230                                     | –                         | 0,95 a 1,05         | –                                    | 0,90 a 1,05         |
| 230                                       | 218 a 242                 | 0,95 a 1,05         | 207 a 242                            | 0,90 a 1,05         |
| 345                                       | 328 a 362                 | 0,95 a 1,05         | 311 a 362                            | 0,90 a 1,05         |
| 440                                       | 418 a 460                 | 0,95 a 1,046        | 396 a 460                            | 0,90 a 1,046        |
| 500                                       | 500 a 550                 | 1,00 a 1,10         | 475 a 550                            | 0,95 a 1,10         |
| 525                                       | 500 a 550                 | 0,95 a 1,048        | 475 a 550                            | 0,90 a 1,048        |
| 765                                       | 690 a 800                 | 0,90 a 1,046        | 690 a 800                            | 0,90 a 1,046        |

Fonte: ONS (2025)

O ANAREDE é um software capaz de realizar análises de sistemas elétricos de potência em regime permanente, amplamente utilizado para simulações e estudos de planejamento do setor em curto, médio e longo prazo do SIN. Seus resultados atuam como elemento decisório no que tange aos reforços e ampliações do SIN, atualmente é a ferramenta mais utilizada pelo ONS e empresas que prestam serviços ao sistema elétrico.

De acordo com o CEPEL (2025), o software ANAREDE é composto pelos seguintes programas computacionais:

- Programa de Fluxo de Potência;
- Programa de Equivalente de Redes;
- Programa de Análise de Contingências;
- Programa de Análise de Sensibilidade de Tensão;
- Programa de Análise de Sensibilidade de Fluxo;
- Programa de Fluxo de Potência Continuado;
- Programa de Análise de Corredores de Recomposição;
- Programa de Cálculo Automático de Margem de Transmissão; e
- Programa de Avaliação de Segurança Estática.

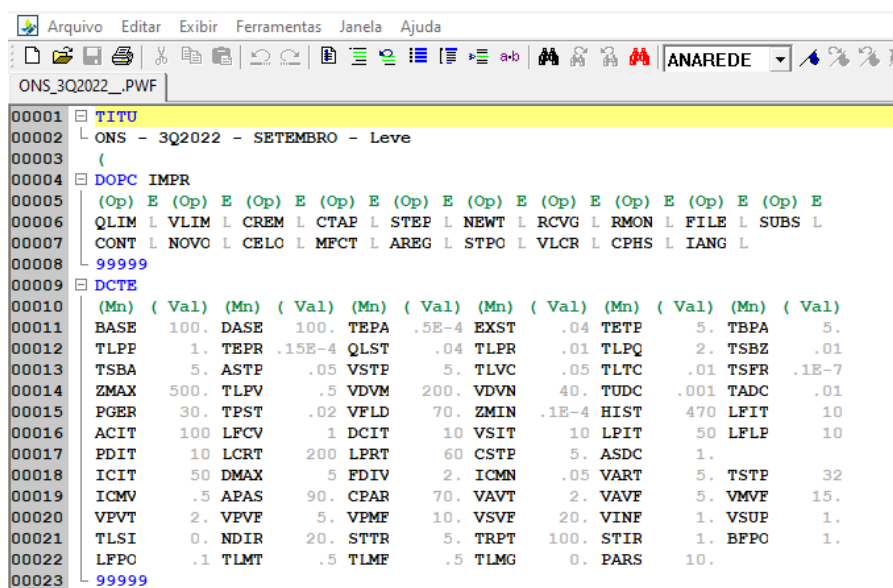
Neste trabalho serão utilizados os programas de Fluxo de Potência. O ANAREDE pode ser iniciado através de um arquivo .pwf ou .sav, esse tipo de arquivo pode ser realizado por meio de um código de execução ou interface gráfica. Maiores detalhes serão explorados a seguir.

### *3.2.1 Código de execução e representação dos elementos do sistema*

Segundo o manual do usuário versão V11.05.04 do ANAREDE, os dados de entrada estão em arquivo com extensão .pwf, definidos no Código de Execução. É importante informar que na leitura dos dados, todos os registros que contiverem caracteres “(” na primeira coluna serão tratados como comentários, com exceção do título do caso.

A construção do Código de Execução é realizada através do programa auxiliar, o EditCEPEL, na figura 3.1 é possível visualizar a interface de construção do código.

Figura 3.1 - Exemplo de dados de entrada do ANAREDE.



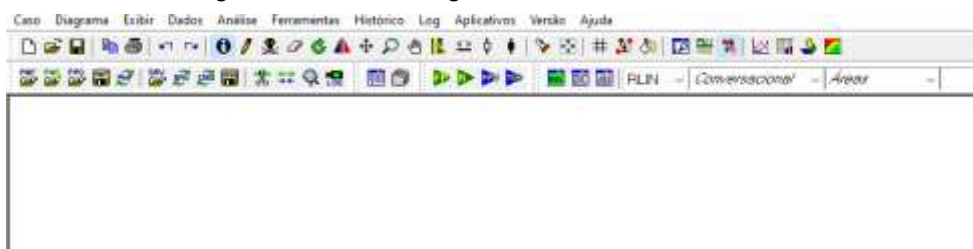
FONTE: ANAREDE

Para visualizar o sistema de forma gráfica no ANAREDE é preciso criar o diagrama elétrico com extensão .lst.

### 3.2.2 Interface gráfica

É possível criar o sistema a partir da interface gráfica do ANAREDE. A figura 3.2 ilustra a tela inicial do software.

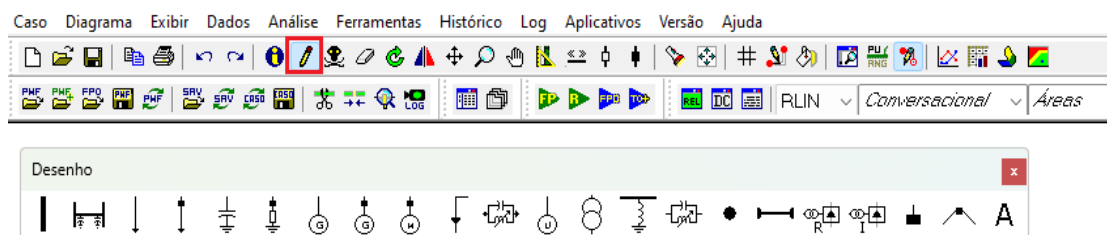
Figura 3.2 - Interface gráfica do ANAREDE.



FONTE: ANAREDE.

Para iniciar a construção de um sistema, utiliza-se o ícone destacado na Figura 3.3. Ao clicar no item, é exibido um conjunto de todos os componentes que constituem um sistema elétrico.

Figura 3.3 - Ferramentas do ANAREDE.



FONTE: ANAREDE

Ao posicionar este item na tela, surgirá uma janela para preenchimento dos dados pertencentes àquele componente. Segue um exemplo de janela de uma barra CA.

Figura 3.4 - Adição de dados de barra CA.

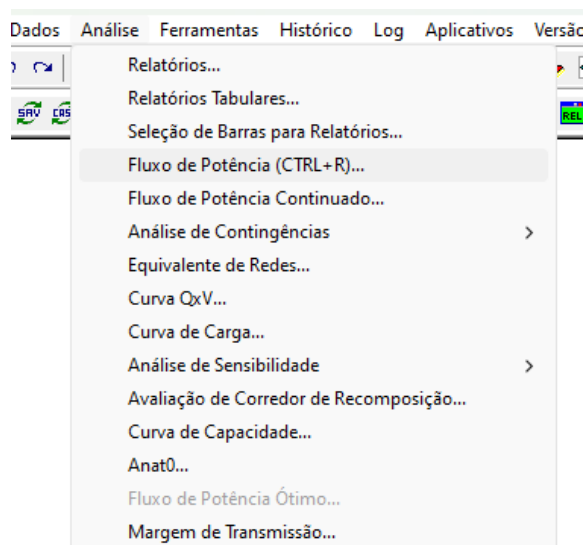
FONTE: ANAREDE

### 3.2.3 Programa de Fluxo de potência

O Programa de Fluxo de Potência tem como principal objetivo realizar o cálculo do estado operativo da rede elétrica para determinadas condições de carga, geração, topologia e restrições operacionais (CEPEL, 2023). Em outras palavras, esse programa permite a visualização do SIN para condições específicas proporcionando uma análise detalhada do comportamento do sistema.

O ANAREDE dispõe de dois métodos para a realização de estudos de fluxo de potência, são eles: Método Desacoplado Rápido e Método de Newton. Para executar o fluxo de potência, preciona-se a opção “Análise” e seleciona o estudo mencionado ou preciona-se simultaneamente o botão “Ctrl” e “R” do teclado do computador.

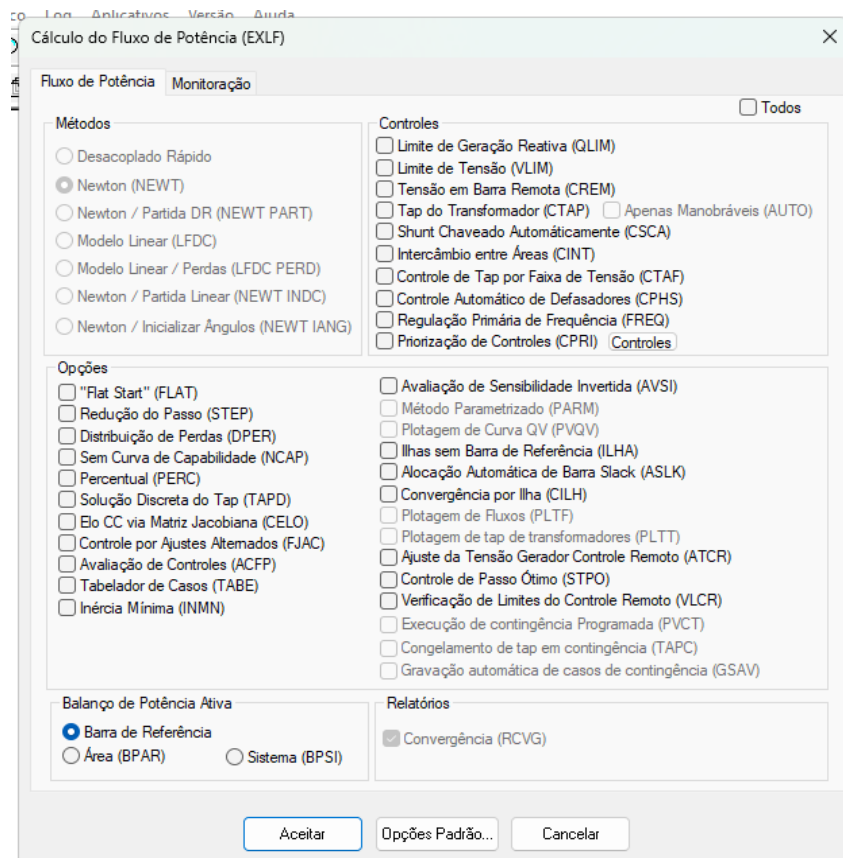
Figura 3.5 - Função de Fluxo de Potência do ANAREDE.



Fonte: ANAREDE

Ao selecionar a opção de fluxo de potência, é exibido uma tela para a seleção das opções e controles desejados na execução. Como pode ser visto na Figura 3.6 por padrão, a solução utilizada é o Método de Newton (NETW).

Figura 3.6 - Cálculo do Fluxo de Potência no ANAREDE.



Fonte: ANAREDE.

### 3.3. Procedimento para Dimensionar a Potência do SAE

Por não existir, até a data da publicação deste trabalho, uma metodologia definida para o dimensionamento de Sistemas de Armazenando de Energia. Considerou-se a energia como parâmetro de referência para definição da potência. A partir deste ponto, os seguintes procedimentos foram adotados.

#### 3.3.1 Procedimento para obter a curva de geração média

Com vistas a averiguar os valores horários da energia, utilizou-se a curva de geração média horária. Para obter essa curva, as seguintes etapas foram necessárias.

**1º Etapa:** Com a definição da região que se deseja implementar o SAE, seleciona-se a subestação receptora da maior geração. Essa constatação pode ser realizada de forma visual, através do SINDAT ou através dos estudos de fluxo de potência.

**2º Etapa:** Utilizando o programa EDITCEPEL ou a interface gráfica do ANAREDE, verifica-se quais complexos, sejam eles eólicos ou solares, estão injetando potência na barra escolhida para implementação do SAE. Essa verificação é importante, pois no site do ONS, as usinas devem ser mencionadas para a obtenção da curva de geração média horária.

**3º Etapa:** O gráfico da curva de geração média horária pode ser encontrado no site do ONS, indo em Resultado da operação > Histórico da operação (ONS, 2025d).

**4º Etapa:** Com os dados em mãos, preenchem-se as informações obtidas nos passos 1 e 2 nos filtros disponíveis no site.

**5º Passo:** Após a inserção dos dados, o site gera o gráfico de geração média horária para o respectivo ponto de conexão. A partir da curva, o operador tem a possibilidade de escolher os melhores horários para carregar e injetar a energia do Sistema de Armazenamento de Energia.

É importante destacar que o ONS define os horários para os patamares de carga leve, média e pesada do SIN. Dessa forma, torna-se essencial observar os horários para cada patamar, a fim de evitar que a operação do SAE comprometa o funcionamento do sistema.

### 3.3.2 Procedimento para obter a curva de geração média

Com os horários de carregamento definidos, a realização do cálculo da geração média horária, pode ser obtida pelo método dos trapézios (NOBLAT, 2023). Esse método realizará a integração numérica da área sob a curva de potência gerada ao longo do tempo. A equação que representa esse cálculo é dada por:

$$E_G = \int P_{Gerada}(t)dt = \frac{h}{2} [f(x_0) + 2(f(x_1) + \dots + f(x_{n-1})) + f(x_n)] \quad (3.1)$$

Onde,

$E_G$ : capacidade de Armazenamento das baterias;

$h$ : intervalo de tempo;

$f$ : potência gerada em cada intervalo de tempo

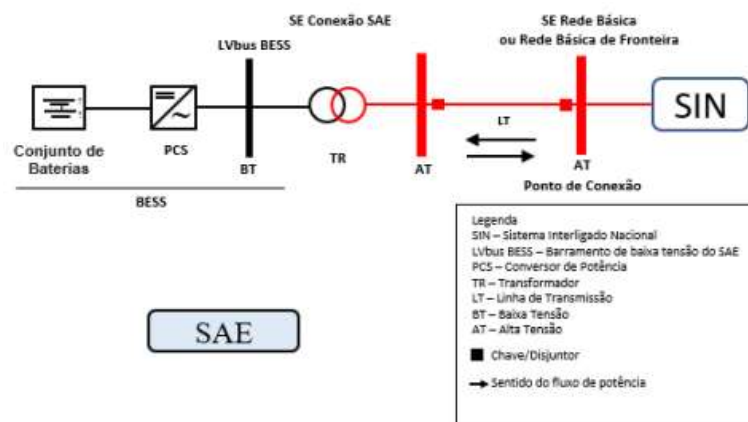
### 3.3.3 Potência Consolidada do SAE

A partir da energia total obtida na etapa anterior, deve ser considerada uma porcentagem (a critério do operador) para estimar a energia total do Sistema de Armazenamento de Energia. Para encontrar a potência do SAE, basta dividir a energia encontrada pela quantidade de horas do período de carregamento.

## 3.4. Modelagem do SAE no ANAREDE

O ANAREDE não dispõe de um componente para representação do Sistema de Armazenando de energia, sendo necessário sua modelagem. Dito isso, o diagrama apresentado na figura abaixo foi utilizado na construção da interface.

Figura 3.7 - Modelagem do SAE no ANAREDE



Fonte: NOBLAT (2023).

De acordo com a modelagem exposta acima, observa-se a necessidade da utilização de um transformador. A relação de transformação adotada deve ter como menor nível de tensão 690 V, uma vez que esse valor foi utilizado como referência a partir do nível de tensão empregado pela empresa ISA CTEEP, atualmente o único empreendimento de larga escala autorizado a operar no Brasil.

Sobre os parâmetros dos Sistemas de Armazenamento, destaca-se a profundidade de descarga, que se relaciona com o valor mínimo que deve ser mantido no SAE a cada ciclo de descarga. Para a realização do estudo optou-se por fixar na tecnologia de armazenamento, um total de 20% da energia total encontrada.

#### 4 ESTUDO DE CASO

O trecho sob estudo, refere-se a região oeste da Bahia, que engloba as subestações de Ourolândia 500 kV e 230 kV, com escoamento dos complexos eólicos de Umburanas, Campo Formoso e Campo Largo. Há ainda a representação da subestação de Barreiras 230 kV que recebe potência de Barreiras 500 kV e Bom Jesus da Lapa 230 kV. Para a realização do estudo de caso, foi considerado o arquivo base do Quadrimestral 3Q2022 do ONS. Ademais, esse arquivo foi atualizado com a inserção de novas linhas de transmissão que entraram em operação após o ano de 2022.

Conforme mencionado na metodologia, linhas de transmissão e transformadores precisaram ser modelados no ANAREDE para conexão do SAE. A escolha dos parâmetros levou em consideração os valores de outros ativos semelhantes já utilizados no arquivo base com as devidas compatibilizações para a simulação (comprimento de linha, potência de transformador).

A subestação escolhida para implementar o Sistema de Armazenamento de Energia foi Ourolândia, devido a retratar uma barra que recebe grandes montantes de geração advindas dos parques eólicos de Umburanas 230 kV, Campo Formoso 230 kV e Campo Largo 230 kV, além de interligações importantes e previsão de expansões na rede de transmissão (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Subestação Ourolândia e adjacências.



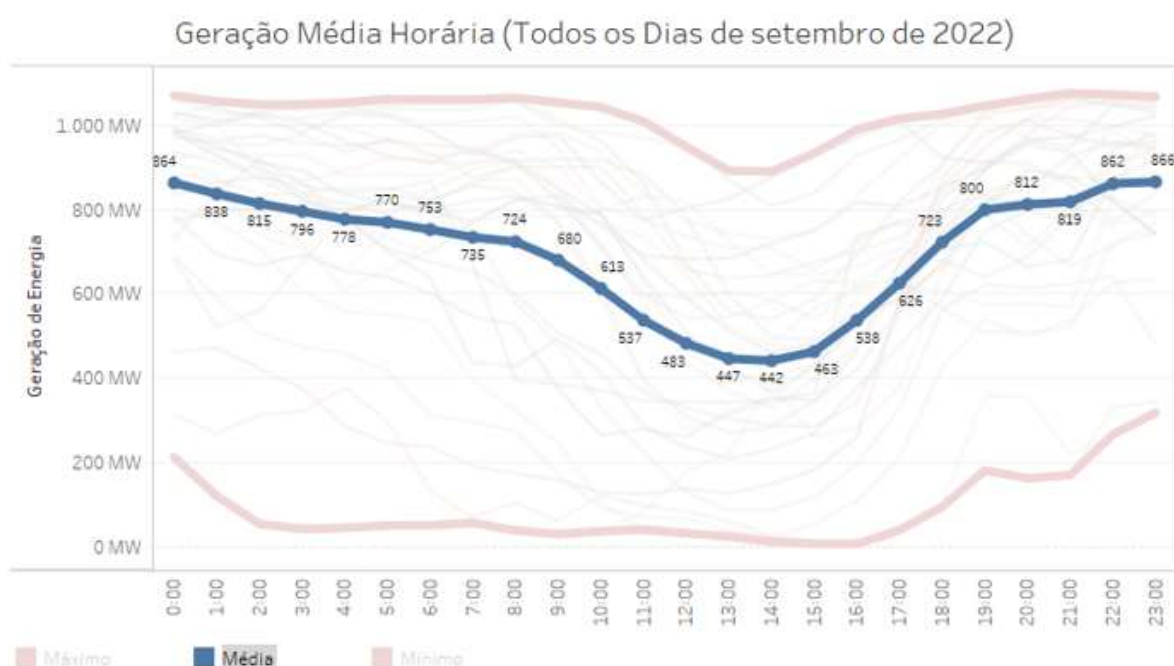
FONTE: Adaptado (<https://sig.ons.org.br/app/sinmaps/>)

#### 4.1 Particularidade Geoelétricas da Região

A elevada produção de energia na região sob estudo e o consumo em horários atípicos de carga pesado do SIN deve-se, especialmente, a dois fatores: a região baiana apresentar um dos melhores índices de geração eólica do país e a elevada produção de grãos, que demanda elevada irrigação em alguns momentos do dia. Considerando essas particularidades, a definição dos horários de carregamento do Sistema de Armazenamento de Energia levou em consideração a curva de geração média horária da barra de conexão e a particularidade regional da demanda, associada à irrigação.

Na figura 4.2 é apresentada a curva de geração média horária obtida através das etapas descritas na metodologia. A partir dela, foi possível aferir que as maiores gerações ocorrem entre 19:00h e 07:00h.

Figura 4.2 - Curva de Geração Média Horária.



FONTE: (ONS,2025d)

É importante levar em consideração a forte presença de irrigação na Bahia ao definir os horários de carregamento. De acordo com o § 2º do art. 184 da Resolução Normativa nº 1000 da ANEEL, o benefício tarifário inicia-se às 21:30, finalizando às 06:00 da manhã. Esse é o intervalo priorizado pelos produtores da região realizar atividades de irrigação.

## 4.2. Definição da Potência do Carregamento e Injeção

Considerando essas particularidades da região, bem como o fato da maioria dos eventos de *curtailment* ocorrerem no cenário de carga média e os maiores registros de geração coincidirem com os horários de alto consumo de energia devido à irrigação, optou-se por carregar SAE em dois momentos distintos, totalizando seis horas de carregamento, distribuídas nos seguintes intervalos:

- Intervalo das 03:00h às 06:00h da manhã, totalizando 3 horas de carregamento no cenário de carga leve do SIN.
- Intervalo das 12:00 às 15:00, totalizando mais 3 horas de carregamento no cenário de carga média do SIN.

Com base no relatório de diagnóstico e perspectivas da evolução dos cortes de geração no Brasil, publicado pelo ONS (ONS, 2025a), optou-se por utilizar uma porcentagem equivalente a 20% da energia total obtida através do método dos trapézios.

Para a barra escolhida, constatou-se que a geração média mensal para seis horas era de 4302,5 MWh. Considerando 20% da energia total, chegasse a um valor equivalente à 860,5 MWh. Em termos de potência, o SAE será de 143 MW. Desse montante, destinou-se 43 MW para carregar no cenário de carga média e 100 MW para carregar em cenário de carga leve do SIN.

Devido a maior demanda de geração ocorrer no cenário de carga pesada, optou-se por injetar a energia no referido patamar. Considerando uma profundidade de descarga de 20%, a potência útil do SAE deverá ser de 115 MW.

## 4.3. Simulação e Análise de Resultados

Os estudos de fluxo de potência contemplaram a análise da operação nos três patamares de carga (leve, média e pesada) antes e depois da inserção do Sistema de Armazenamento de Energia, além da análise do comportamento do sistema.

As principais variáveis observadas ao longo dos estudos realizados foram os módulos das tensões em cada barramento das subestações, os carregamentos dos transformadores, a variação das gerações, as perdas totais e o fluxo de potência nas linhas de transmissão. Na Tabela 4.1 são listadas as principais características das barras sob estudo.

Tabela 4.1 - Dados de barras do subsistema.

| Nº   | Tipo | Tensão Base (kV) | Nome da Barra | Limite de Tensão (pu) |
|------|------|------------------|---------------|-----------------------|
| 6360 | 0-PQ | 500              | BARREI-BA500  | 1.0 – 1.1             |
| 6315 | 0-PQ | 230              | BARRE2-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6062 | 0-PQ | 230              | TABBJV-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6351 | 0-PQ | 230              | BJLAPA-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6334 | 0-PQ | 230              | BROTAS-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6341 | 0-PQ | 230              | IRECE--BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6071 | 0-PQ | 230              | OUROLN-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6107 | 0-PQ | 230              | CFORMO-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6228 | 0-PQ | 34,5             | CFORM1-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 6229 | 1-PV | 34,5             | CFORM1EOL045  | 0.95 – 1.05           |
| 6240 | 0-PQ | 34,5             | CFORM2-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 6637 | 1-PV | 34,5             | CFORM2EOL045  | 0.95 – 1.05           |
| 8081 | 0-PQ | 230              | UMBURA-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 8082 | 0-PQ | 34,5             | UBN-B1-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 6068 | 1-PV | 34,5             | UBN-B1EOL047  | 0.95 – 1.05           |
| 8083 | 0-PQ | 34,5             | UBN-B2-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 8085 | 1-PV | 34,5             | UBN-B2EOL047  | 0.95 – 1.05           |
| 8084 | 0-PQ | 34,5             | UBN-B3-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 8086 | 1-PV | 34,5             | UBN-B3EOL050  | 0.95 – 1.05           |
| 6771 | 0-PQ | 230              | CLARGO-BA230  | 0.95 – 1.05           |
| 6757 | 0-PQ | 34,5             | CLARG1-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 6073 | 1-PV | 34,5             | CLARG1EOL066  | 0.95 – 1.05           |
| 6758 | 0-PQ | 34,5             | CLARG2-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 6756 | 0-PV | 34,5             | CLARG2EOL055  | 0.95 – 1.05           |
| 7966 | 0-PQ | 34,5             | CLARG3-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 7968 | 0-PV | 34,5             | CLARG3EOL043  | 0.95 – 1.05           |
| 7967 | 0-PQ | 34,5             | CLARG4-BA034  | 0.95 – 1.05           |
| 7969 | 1-PV | 34,5             | CLARG4EOL043  | 0.95 – 1.05           |
| 6070 | 0-PQ | 500              | OUROLN-BA500  | 1.0 – 1.1             |
| 6290 | 0-PQ | 500              | M.CHAP-BA500  | 1.0 – 1.1             |
| 6060 | 0-PQ | 500              | GENDO2-BA500  | 1.0 – 1.1             |
| 6500 | 0-PQ | 500              | JUAZEI-BA500  | 1.0 – 1.1             |

Fonte: Arquivo base ONS.

Dentre as 32 barras do subsistema, 9 são barras do tipo PV (barramento de tensão controlada) correspondentes as usinas eólicas localizadas na região de estudo. As outras barras do sistema são do tipo PQ (barramento de carga).

Na Tabela 4.2 são expostas as capacidades em operação normal, sob condições de emergência e a capacidade dos equipamentos para todas as linhas do subsistema analisado. Além disso, é importante observar o comportamento dos transformadores, exposto na Tabela 4.3. Ressalta-se que tais análises são cruciais para assegurar o pleno funcionamento do Sistema Elétrico de Potência.

Tabela 4.2 - Capacidade das linhas de transmissão.

| LT                            | Circuito | Cap. Normal<br>(MVA) | Cap. Emerg.<br>(MVA) | Cap. Equip.<br>(MVA) |
|-------------------------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| BARRE2-BA230 / TABBJV-BA500   | Único    | 251                  | 317                  | 317                  |
| TABBJV-BA500 / BJLAPA-BA230   | Único    | 251                  | 317                  | 317                  |
| BJLAPA-BA230/ BROTAS-BA230    | Único    | 251                  | 317                  | 317                  |
| BROTAS-BA230 / IRECE-BA230    | Único    | 251                  | 317                  | 317                  |
| IRECE-BA230 / OUROLN-BA230    | Único    | 251                  | 317                  | 317                  |
| OUROLN-BA230 / CFORMO-BA230   | Único    | 251                  | 317                  | 317                  |
| CFORMO1-BA034 / CFORMO1EOL045 | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| CFORMO2-BA034 / CFORMO2EOL045 | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| OUROLN-BA230 / UMBURA-BA230   | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| UBN2-BN-BA034 / UBN-B2EOL047  | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| UBN-B2-BA034 / UB2-B2EOL047   | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| UBN-B3-BA034 / UB3-B2EOL050   | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| OUROLN-BA230 / CLARGO-BA230   | 1        | 652                  | 750                  | 750                  |
|                               | 2        | 652                  | 750                  | 750                  |
| CLARG1EOL066 / CLARG1-BA034   | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| CLARG2EOL055 / CLARG2-BA034   | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| CLARG3EOL043 / CLARG3-BA034   | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| CLARG4EOL043 / CLARG4-BA034   | Único    | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| M.CHAP-BA500 / OUROLN-BA500   | Único    | 2716                 | 3395                 | 3395                 |
| GENDO2-BA500 / OUROLN-BA500   | Único    | 2962                 | 3642                 | 3642                 |
| JUAZEI-BA500 / OUROLN-BA500   | Único    | 1800                 | 2156                 | 2156                 |

Fonte: Arquivo base ONS.

Tabela 4.3 - Capacidade dos transformadores.

| LT                          | Cap. Normal<br>(MVA) | Cap. Emerg.<br>(MVA) | Cap. Equip.<br>(MVA) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| BARRE2-BA230 / BRD-T1-BA000 | 300                  | 360                  | 419                  |
| BARRE2-BA230 / BRD-T1-BA000 | 300                  | 360                  | 419                  |
| BARRE2-BA230 / BRD-T2-BA000 | 300                  | 360                  | 360                  |
| BARRE2-BA230 / BRD-T2-BA000 | 300                  | 360                  | 360                  |
| CFORMO-BA230 / CFORM1-BA034 | 120                  | 120                  | 120                  |
| CFORMO-BA230 / CFORM2-BA034 | 120                  | 120                  | 120                  |
| UMBURA-BA230 / UNB-B1-BA034 | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| UMBURA-BA230 / UNB-B2-BA034 | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| UMBURA-BA230 / UNB-B3-BA034 | 9999                 | 9999                 | 9999                 |
| CLARGO-BA230 / CLARG1-BA034 | 175                  | 210                  | 175                  |
| CLARGO-BA230 / CLARG2-BA034 | 175                  | 210                  | 175                  |
| CLARG3-BA000 / CLARG3-BA034 | 200                  | 240                  | 200                  |
| CLARGO-BA230 / CLARG3-BA00  | 200                  | 240                  | 240                  |
| CLARG4-BA000 / CLARG4-BA034 | 200                  | 240                  | 200                  |
| CLARGO-BA230 / CLARG4-BA000 | 200                  | 240                  | 240                  |
| OUROLN-BA230 / OUR-T1-BA000 | 900                  | 1080                 | 1259                 |
| OUROLN-BA230 / OUR-T1-BA000 | 900                  | 1080                 | 1259                 |
| OUROLN-BA230 / OUR-T2-BA000 | 900                  | 1080                 | 1259                 |
| OUROLN-BA230 / OUR-T2-BA000 | 900                  | 1080                 | 1259                 |

Fonte: Arquivo base ONS.

### 4.3. Condições Operativas Normais

#### 4.3.1. Fluxo de Potência

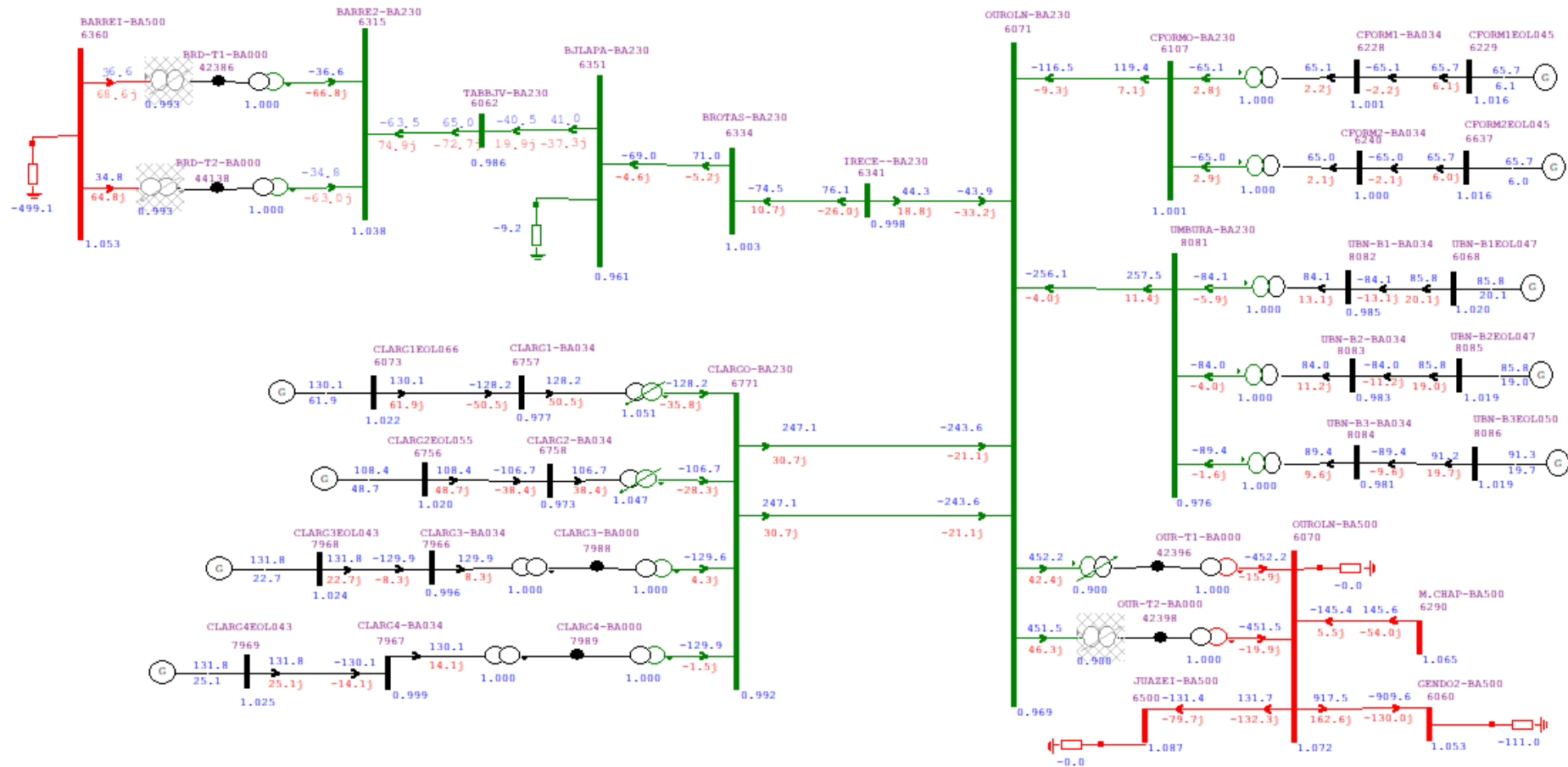
Inicialmente, estudos de fluxo de potência para os três cenários de carga: leve, médio e pesada foram avaliados com o objetivo de identificar o estado operativo do sistema. As simulações realizadas encontram-se nas figuras 4.3 a 4.5. Na Tabela 4.4 é possível visualizar, para os três cenários, os módulos das tensões das barras da região sob estudo.

Tabela 4.4 - Tensões nas barras para diferentes patamares de carga.

| Número | Tipo | Tensão Base (kV) | Nome Barra   | Tensão pu  |             |              |
|--------|------|------------------|--------------|------------|-------------|--------------|
|        |      |                  |              | Carga leve | Carga média | Carga pesada |
| 6360   | 0-PQ | 500              | BARREI-BA500 | 1.053      | 1.057       | 1.061        |
| 6315   | 0-PQ | 230              | BARRE2-BA230 | 1.038      | 1.010       | 1.042        |
| 6062   | 0-PQ | 230              | TABBJV-BA230 | 0.986      | 0.979       | 0.987        |
| 6351   | 0-PQ | 230              | BJLAPA-BA230 | 0.961      | 0.956       | 0.956        |
| 6334   | 0-PQ | 230              | BROTAS-BA230 | 1.003      | 1.020       | 1.015        |
| 6341   | 0-PQ | 230              | IRECE--BA230 | 0.998      | 1.003       | 0.999        |
| 6071   | 0-PQ | 230              | OUROLN-BA230 | 0.969      | 0.994       | 1.000        |
| 6107   | 0-PQ | 230              | CFORMO-BA230 | 1.001      | 1.003       | 0.999        |
| 6228   | 0-PQ | 34,5             | CFORM1-BA034 | 1.001      | 1.001       | 0.996        |
| 6229   | 1-PV | 34,5             | CFORM1EOL045 | 1.016      | 1.001       | 1.006        |
| 6240   | 0-PQ | 34,5             | CFORM2-BA034 | 1.000      | 1.001       | 1.002        |
| 6637   | 1-PV | 34,5             | CFORM2EOL045 | 1.016      | 0.998       | 1.008        |
| 8081   | 0-PQ | 230              | UMBURA-BA230 | 0.976      | 0.993       | 0.988        |
| 8082   | 0-PQ | 34,5             | UBN-B1-BA034 | 0.985      | 0.990       | 0.990        |
| 6068   | 1-PV | 34,5             | UBN-B1EOL047 | 1.020      | 1.002       | 1.014        |
| 8083   | 0-PQ | 34,5             | UBN-B2-BA034 | 0.983      | 0.989       | 0.989        |
| 8085   | 1-PV | 34,5             | UBN-B2EOL047 | 1.019      | 1.001       | 1.014        |
| 8084   | 0-PQ | 34,5             | UBN-B3-BA034 | 0.981      | 0.989       | 0.998        |
| 8086   | 1-PV | 34,5             | UBN-B3EOL050 | 1.019      | 1.001       | 1.014        |
| 6771   | 0-PQ | 230              | CLARGO-BA230 | 0.992      | 0.997       | 0.997        |
| 6757   | 0-PQ | 34,5             | CLARG1-BA034 | 0.977      | 0.995       | 0.991        |
| 6073   | 1-PV | 34,5             | CLARG1EOL066 | 1.022      | 1.001       | 1.016        |
| 6758   | 0-PQ | 34,5             | CLARG2-BA034 | 0.973      | 0.995       | 0.991        |
| 6756   | 0-PV | 34,5             | CLARG2EOL055 | 1.020      | 1.001       | 1.015        |
| 7966   | 0-PQ | 34,5             | CLARG3-BA034 | 0.996      | 0.994       | 0.996        |
| 7968   | 0-PV | 34,5             | CLARG3EOL043 | 1.024      | 1.003       | 1.015        |
| 7967   | 0-PQ | 34,5             | CLARG4-BA034 | 0.999      | 0.994       | 0.998        |
| 7969   | 1-PV | 34,5             | CLARG4EOL043 | 1.025      | 1.003       | 1.015        |
| 6070   | 0-PQ | 500              | OUROLN-BA500 | 1.072      | 1.064       | 1.054        |
| 6290   | 0-PQ | 500              | M.CHAP-BA500 | 1.065      | 1.057       | 1.052        |
| 6060   | 0-PQ | 500              | GENDO2-BA500 | 1.053      | 1.056       | 1.045        |
| 6500   | 0-PQ | 500              | JUAZEI-BA500 | 1.087      | 1.076       | 1.055        |

Fonte: Arquivo base do ONS

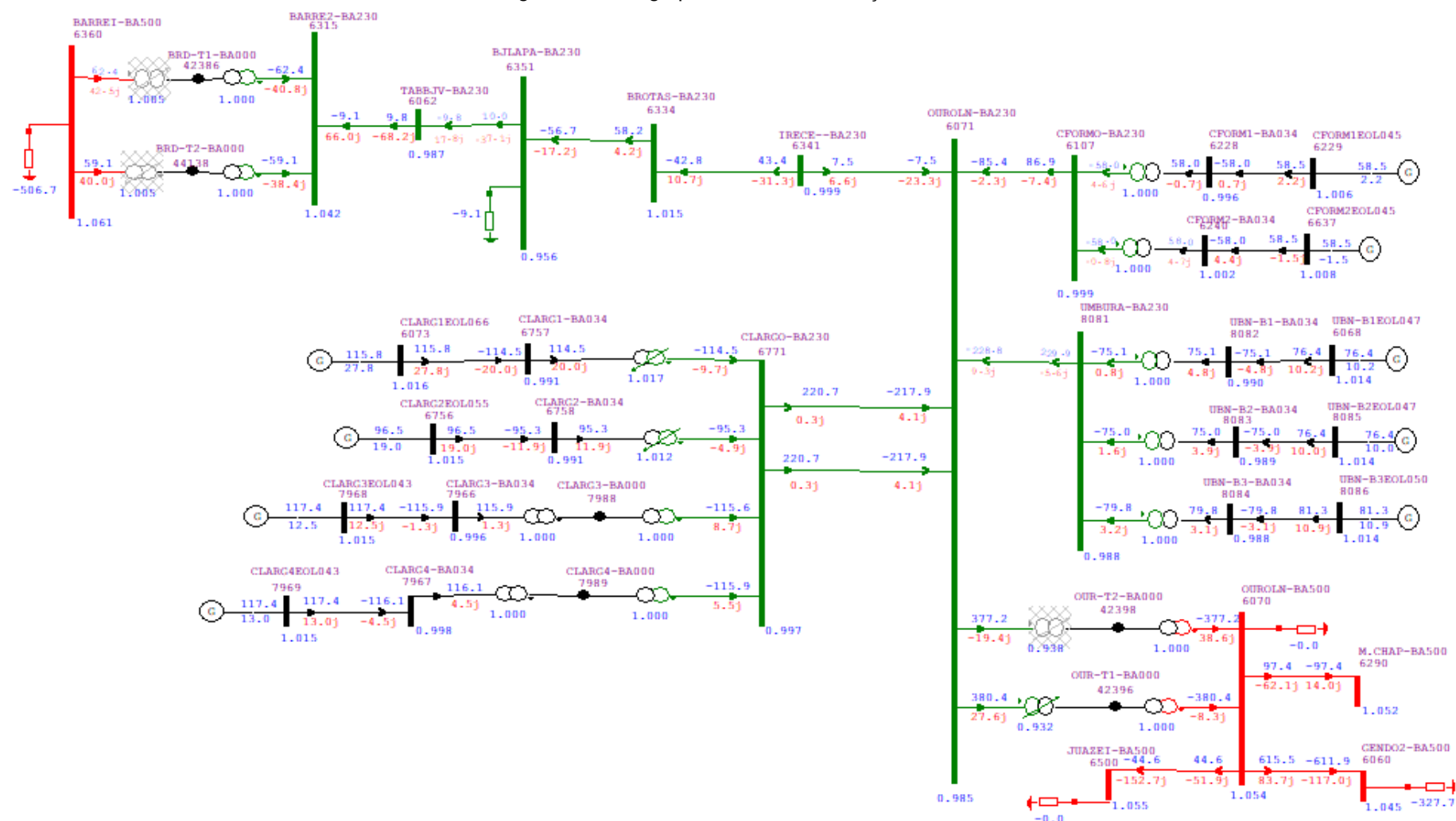
Figura 4.3 - Carga leve antes da adição do SAE.



Fonte: ANAREDE.

Fonte: ANAREDE.

Figura 4.5 - Carga pesada antes da adição do SAE.



Fonte: ANAREDE

A análise das Figuras 4.3 a 4.5 evidenciou a importância de avaliar o desempenho das barras do sistema elétrico em diferentes condições operativas. Nesse contexto, optou-se pela inserção de recursos adicionais de controle de tensão, respeitando a hierarquização prevista pelo ONS. Essa estratégia teve como objetivo verificar os desdobramentos técnicos decorrentes da utilização desses mecanismos e ampliar a compreensão do comportamento do sistema em distintos patamares de carga. Após a implementação, observou-se que as tensões permaneceram dentro dos limites operacionais estabelecidos pelos Procedimentos de Rede.

Investigando os relatórios de saída, é possível inferir que para todos os cenários de carga, nota-se um elevado fluxo de potência no circuito de 230 kV proveniente das Subestações de Campo Largo (6771), Campo Formoso (6107) e Umburanas (8081) em direção ao barramento de Ourolândia 230 kV, o que, por sua vez, escoar diretamente para a subestação Ourolândia 500 kV.

#### **4.4. Inserção do Sistema de Armazenamento de Energia no Sistema**

##### **4.4.1. Resultados no Fluxo de Potência**

Conforme apresentado na seção 3, o Sistema de Armazenamento de Energia operou em modo de carregamento nos cenários de carga leve e média, enquanto no cenário de carga pesada atuou como fonte de geração.

##### *4.4.1.1 SAE Carregando no Cenário de Carga Leve*

Para o cenário sob estudo, o SAE foi inserido no subsistema como uma carga de 100 MW. A partir dos relatórios analisados, verificou-se que os módulos de tensão dos barramentos se mantiveram invariáveis. Além disso, não foram registradas violações das margens dos transformadores. Ademais, foram observadas mudanças significativas no fluxo de potência em algumas linhas de transmissão. Um compilado dos resultados pode ser visto na tabela abaixo.

Tabela 4.5 - Capacidade das linhas de transmissão no cenário de carga leve.

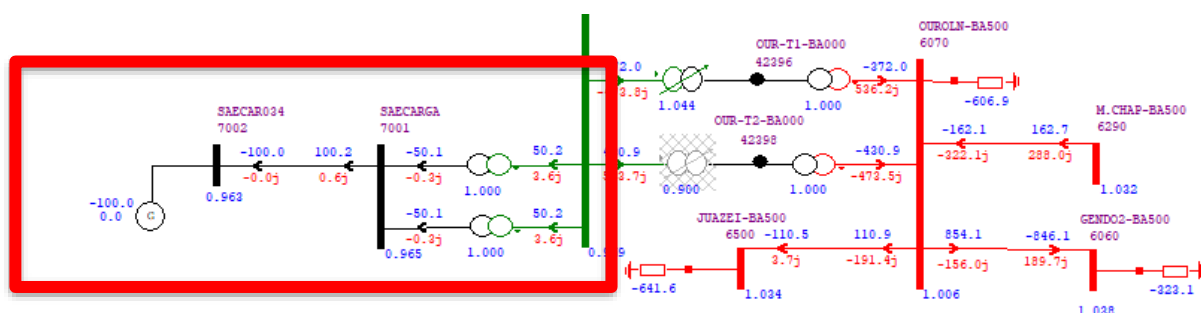
| Linha                       | Fluxo de Potência |              |          |
|-----------------------------|-------------------|--------------|----------|
|                             | Antes (MVA)       | Depois (MVA) | Variação |
| IRECE-BA230 / OUROLN-BA230  | 36                | 42,7         | 18,61%   |
| CFORMO-BA230 / OUROLN-BA230 | 112,7             | 117,3        | 4,08%    |
| OUROLN-BA230 / OUROLN-BA500 | 413,2             | 372          | -9,98%   |
| OUROLN-BA230 / OUROLN-BA500 | 478,9             | 430,9        | -10,03%  |
| M.CHAP-BA500 / OUROLN-BA500 | 145,7             | 162          | 11,15%   |
| OUROLN-BA500 / GENDO2-BA500 | 898,8             | 854,2        | -4,96%-  |
| OUROLN-BA500 / JUAZEI-BA500 | 139               | 110,9        | -20,20%  |

Fonte: Arquivos de saída - simulação no ANAREDE.

A partir da tabela, observa-se uma diminuição do fluxo de potência proveniente da barra de Ourolândia 230 kV (6071) em direção à barra de Ourolândia 500 kV (6070), indicando um alívio na transformação. Em contrapartida, verifica-se um aumento da potência entregue através das linhas de transmissão de Irecê 230 kV (6341) e Campo Formoso 230 kV (6107), sem que se ultrapasse a capacidade dessas linhas.

A redução verificada é esperada, visto que, a barra coletora do subsistema é composta, em sua maioria, por barras de gerações que já se encontravam próximas do seu despacho máximo, não havendo margem para aumentar sua produção a ponto de suprir a carga que o SAE está demandando. Dessa forma, a solução encontrada pelo software foi reduzir o montante entregue à barra de carga do subsistema, permitindo o despacho pleno do SAE com impactos minimizados ao Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Figura 4.6 - Carga leve depois da adição do SAE.



Fonte: ANAREDE

Mediante as simulações realizadas, notou-se que a subestação Morro do Chapéu II aumentou o fluxo de potência para a barra de Ourolândia 500 kV (6070). Ademais, verifica-se uma atenuação do fluxo de potência que escoava para as subestações de Gentio do Ouro 2 500 kV (6060) e Juazeiro da Bahia III 500 kV (6500), sendo essa última a mais afetada. Ainda assim, a região do subsistema em estudo demonstrou capacidade para suprir a demanda. Apesar das modificações ocorridas, constata-se que o carregamento do SAE neste cenário de carga não viola os limites operativos dos elementos do sistema.

#### 4.4.1.2 SAE Carregando no Cenário de Carga Média

Para o cenário de carga média, o SAE foi inserido como uma carga de 43 MW. Tendo em vista que o SAE demandará menor potência quando comparada ao cenário anterior, operacionalmente apenas um transformador poderia ser utilizado. No entanto, pensando que as ações de desligamentos e energização podem reduzir a vida útil do equipamento, optou-se por utilizar os dois transformadores no referido cenário de carga.

Após a inserção, verificou-se que os módulos de tensão dos barramentos sofreram variações pequenas, se mantendo em níveis aceitáveis de operação. Além disso, não houve violações das margens dos transformadores.

Ademais, observou-se mudanças significativas no fluxo de potência nas mesmas linhas de transmissão do cenário de carga leve. A tabela abaixo exhibe o resultado das análises realizadas.

Tabela 4.6 - Capacidade das linhas de transmissão no cenário de carga média.

| Linha                       | Fluxo de Potência |              |             |
|-----------------------------|-------------------|--------------|-------------|
|                             | Antes (MVA)       | Depois (MVA) | Porcentagem |
| IRECE-BA230 / OUROLN-BA230  | 3,1               | 0,1          | 96,7%       |
| CFORMO-BA230 / OUROLN-BA230 | 64,8              | 66,8         | 3,08%       |
| OUROLN-BA230 / OUROLN-BA500 | 300,4             | 280,3        | -6,70%      |
| OUROLN-BA230 / OUROLN-BA500 | 265,2             | 247,4        | -6,71%      |
| M.CHAP-BA500 / OUROLN-BA500 | 258,4             | 251,4        | -2,71%      |
| OUROLN-BA500 / GENDO2-BA500 | 364,6             | 345,3        | -5,29%      |
| OUROLN-BA500 / JUAZEI-BA500 | 57,2              | 69           | 20,63%      |

Fonte: Arquivos de saída - simulação no ANAREDE

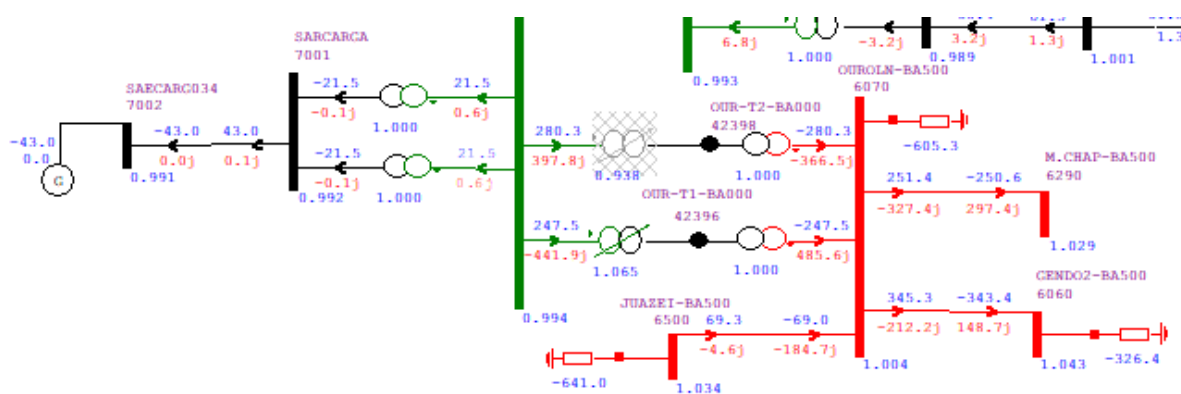
É importante observar que, para este cenário de carga, há uma mudança no sentido do fluxo da linha de transmissão entre Ourolândia 500 kV (6070) e Juazeiro

da Bahia III 500 kV (6500). No cenário de carga leve, observava-se o escoamento da barra 6070 para a 6500. No entanto, para o patamar de carga média, nota-se que Juazeiro da Bahia III passa a fornecer potência a Ourolândia. Essa mudança ocorre devido à forte presença de usinas solares próximas a referida subestação, cuja maior produção ocorre no cenário de carga média.

Quanto às linha de transmissão Ourolândia 500 kV (6070) - Morro do Chapéu II 500 kV (6290) e Irecê 230 kV, verifica-se que também ocorrem mudanças da direção do fluxo, no entanto, diferentemente da condição relatada no parágrafo anterior, aqui, Morro do Chapéu II e Irecê passam a solicitar potência de Ourolândia, evidenciando que estas subestações passam a depender do suprimento vindo dessa subestação para conseguir atender as cargas locais conectadas a elas.

No entanto, verifica-se que a inserção do SAE, não compromete o atendimento às cargas conectadas a Morro do Chapéu II e Irecê. O SAE operando como uma carga no referido cenário, atua de forma indireta armazenando uma parcela da potência advinda das usinas fotovoltaicas conectadas a Juazeiro da Bahia III. Observa-se, em contrapartida, que a potência transportada para Irecê 230 kV praticamente deixou de existir, no entanto, ainda assim, a referida subestação foi atendida por outras subestações próximas.

Figura 4.6 - Carga média depois da adição do SAE.



Fonte: ANAREDE.

#### 4.4.1.3 SAE Carregando no Cenário de Carga Pesada

Para o referido patamar de carga, o SAE terá uma potência de 115 MW e se comportará como uma geração, visto que, é neste cenário que ocorre a maior demanda por energia elétrica no SEP.

Para a referida condição, considera-se que a descarga do SAE ocorrerá no período noturno, durante 3 horas, compreendendo os horários de 18:00 às 21:00. Em termos de energia, a cada hora, o SAE injetará 229,47 MWh no subsistema analisado.

A partir da Figura 4.2, verifica-se que o montante de energia entregue pelos complexos eólicos é de 3.154 MWh. Após a inserção do SAE, a injeção para a mesma janela de tempo passa a ser de 3.842,4 MWh, contribuindo de forma significativa para o atendimento à carga.

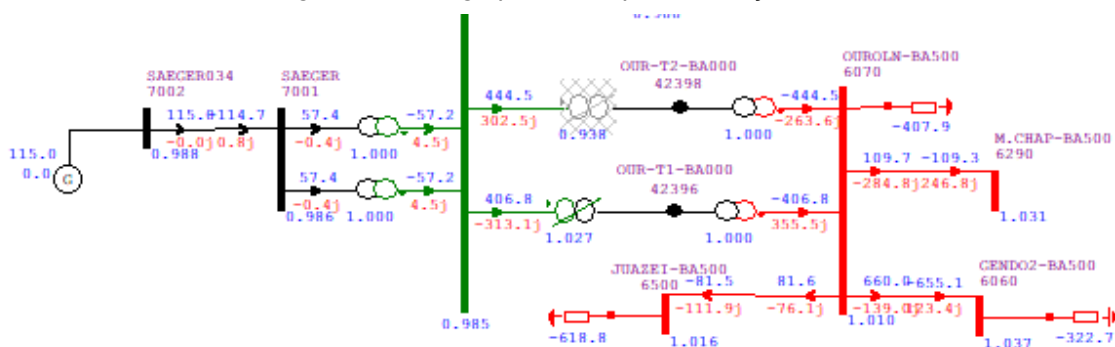
Após a inserção, verificou-se que os módulos de tensão dos barramentos sofreram variações pequenas, se mantendo em níveis aceitáveis de operação. Além disso, não houve violações das margens dos transformadores. A análise do fluxo de potência mostrou mudanças importantes no subsistema. A tabela a seguir apresenta uma síntese das mudanças verificadas.

Tabela 4.7 - Capacidade das linhas de transmissão no cenário de carga pesada.

| Linha                       | Fluxo de Potência |              |             |
|-----------------------------|-------------------|--------------|-------------|
|                             | Antes (MVA)       | Depois (MVA) | Porcentagem |
| IRECE-BA230 / OUROLN-BA230  | 2,7               | 5,4          | 200%        |
| CFORMO-BA230 / OUROLN-BA230 | 83                | 77,7         | -6,82%      |
| OUROLN-BA230 / OUROLN-BA500 | 390,1             | 444,3        | 13,89%      |
| OUROLN-BA230 / OUROLN-BA500 | 360,3             | 407,1        | 12,98%      |
| M.CHAP-BA500 / OUROLN-BA500 | 91,4              | 109,8        | 20,13%      |
| OUROLN-BA500 / GENDO2-BA500 | 608,9             | 660          | 8,39%       |
| OUROLN-BA500 / JUAREI-BA500 | 50,1              | 81,6         | 62,87%      |

Fonte: Arquivo base do ONS.

Figura 4.8 - Carga pesada depois da adição do SAE.



Fonte: ANAREDE.

A análise inicial evidencia que houve aumento significativo do fluxo de potência nas linhas de transmissão entre Ouarolândia 230 kV (6071) e Ouarolândia 500 kV (6070). Para as barras conectadas à Ouarolândia 500 kV, observa-se um incremento na potência entregue às subestações Morro do Chapéu II, Gentio do Ouro 2 e Juazeiro III após a integração do SAE, demonstrando a contribuição dessa tecnologia para o atendimento da carga. Essa redistribuição indica que a geração anteriormente direcionada a essas subestações podem ser redirecionadas para outras localidades, otimizando o despacho do sistema.

Para o complexo eólico de Campo Formoso, houve uma diminuição da potência entregue à subestação de Ouarolândia 230 kV devido ao incremento de potência injetado pelo SAE. Tal alteração é compatível com o comportamento do SAE como gerador, permitindo uma redistribuição do fluxo de potência sem comprometer a operação do sistema.

Na linha de transmissão que conecta Irecê 230 kV à Ouarolândia 230 kV, os relatórios indicam uma inversão no sentido do fluxo de potência após a inserção do SAE. Isso demonstra que o SAE não apenas supriu a potência anteriormente recebida pela barra de Irecê, mas passou a injetar energia neste ponto. Esse fenômeno reforça a necessidade de ajustes cuidadosos nas proteções do sistema, impactando diretamente a coordenação de relés, estratégias de despacho e o controle operacional do subsistema.

Além disso, não houve variações significativas de tensão nas barras, embora reorganizações no despacho (diversificação de fontes no horário) possam provocar pequenas flutuações. Observou-se aumento do fluxo no transformador Ourolândia 230/500 kV, o que, em cenários futuros, poderá requerer investimentos adicionais no SAE ou realocações de carga. A potência entregue através da linha Campo Formoso 230 kV apresentou redução devido à ação do SAE, enquanto o fluxo entre Irecê 230 kV e Ourolândia 230 kV sofreu inversão de sentido, evidenciando a influência do SAE na redistribuição da energia no subsistema.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em decorrência do aumento significativo dos cortes de geração de energia de fontes renováveis, causado pela limitação da capacidade de transmissão e pelos impactos negativos gerados no mercado de energia, este trabalho propõe um estudo sobre a aplicação de Sistema de Armazenamento de Energia (SAE), com base em uma configuração do sistema elétrico brasileiro, a fim de identificar os impactos na região da Bahia.

Para a realização do estudo, foi necessário, antes de tudo, modelar o SAE no ANAREDE, visto que, até a data da publicação deste trabalho, não há um elemento no *software* destinado a essa finalidade. Além disso, para sua efetiva conexão no SIN, houve a necessidade de modelar também novas linhas de transmissão e transformadores. Ressalta-se que os parâmetros utilizados foram equivalentes aos que já se encontravam em operação. Para a definição dos horários de carregamento do SAE, foram consideradas particularidades da região, bem como os horários de restrição de geração.

Os resultados obtidos demonstraram que, em todos os cenários de carga analisados (leve, média e pesada), a implementação do SAE não violou os limites operacionais, promovendo redistribuição de fluxo, alívio nos transformadores e maior equilíbrio no atendimento da carga.

Nos cenários de carga leve e média, o SAE atuou como carga, redistribuindo o fluxo e reduzindo as exigências sobre o transformador de Ourolândia 230/500 kV, além de aumentar a potência entregue pelas linhas de Irecê e Campo Formoso. Já no cenário de carga pesada, a operação do SAE como geração favoreceu o escoamento da potência para Morro do Chapéu II, Juazeiro e Gentio do Ouro 2, além de provocar inversão de fluxo na linha Irecê–Ourolândia, demonstrando sua capacidade de suprir e injetar potência localmente. Esse comportamento aponta para a necessidade de cuidados adicionais em relação à proteção e novas perspectivas de controle na operação.

Verifica-se, portanto, que o SAE se mostrou eficaz na mitigação dos efeitos do curtailment, ao absorver excedentes de geração nos períodos de baixa demanda e redistribuir a potência de forma mais uniforme, promovendo maior equilíbrio entre geração e carga no sistema. Contudo, a depender da potência definida para o SAE, o perfil atípico de carga da região pode exigir o aumento da capacidade do transformador em cenários de carga pesada, mesmo com o alívio promovido em algumas linhas.

Sob a perspectiva do Operador e das discussões regulatórias, observa-se ainda a possibilidade de disputas no período de carga pesada do sistema, relacionadas ao despacho econômico e à priorização de recursos. Caso houvesse maior sintonia entre o perfil de carga regional e o do sistema de potência, seria possível avaliar o emprego de técnicas adicionais de controle, como reatores, bancos de capacitores e compensadores, bem como reorganizações na operação de linhas de transmissão.

Portanto, este estudo evidencia que a inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia representa uma solução promissora para os desafios atuais de escoamento da geração renovável no Brasil, podendo reduzir cortes de geração, melhorar a confiabilidade operativa e abrir caminho para novas estratégias de controle e planejamento do SIN.

Algumas hipóteses para estudos futuros:

- a realização de um novo estudo levando em consideração outros serviços específicos que o SAE pode oferecer (postergação de investimentos no sistema de transmissão, prestação de serviços ancilares etc.).
- análise dos gastos referentes à conexão de SAE no barramento considerado no estudo, assim como impactos no Despacho Econômico.
- comparação técnico-econômica entre diferentes tecnologias de armazenamento.
- análise dos desdobramentos do SAE como prestador de múltiplos serviços no sistema elétrico.

## 6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Consultas Públicas**, 2023. Disponível em: [https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p\\_auth=Z0Xh7ugK&p\\_p\\_id=participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublica\\_portlet&p\\_p\\_lifecycle=1&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_pos=1&p\\_p\\_col\\_count=2&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_ideParticipacaoPublica=3828&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_javax.portlet.action=visualizarParticipacaoPublica](https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p_auth=Z0Xh7ugK&p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublica_portlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_ideParticipacaoPublica=3828&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_javax.portlet.action=visualizarParticipacaoPublica). Acesso em: 15 mai. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **VOTO-VISTA**, 2023. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/area202110892\\_3.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/area202110892_3.pdf). Acesso em: 02 jan. 2025.

BICHELS, Arlei. **Sistemas elétricos de potência**: métodos de análise e solução. Curitiba: Editora UTFPR, 2018. p. 24.

BLOOMBERGNEF – BNEF. **Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030**, 2022. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/commodities/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/>. Acesso em: 06 mar. 2025.

DIAZ, C. de Oliveira. Armazenamento de energia para maior aproveitamento da margem de reserva de linhas de transmissão. *In*: Conferência Brasileira Sobre Qualidade Da Energia Elétrica (CBQEE 2025), 2025. **Anais**. Disponível em: <https://publicacoes.softaliza.com.br/cbqee2025/article/view/11650/8010>. Acesso em: 5 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Matriz Energética e Elétrica**, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 28 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Sistemas de Armazenamento em Baterias**, 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098\\_2019\\_Baterias%20no%20planejamento.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf). Acesso em: 22 dez. 2024.

EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY – EASE. **Technologies**, 2025. Disponível em: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

GÓMEZ-EXPÓSITO, Antonio; CONEJO, Antonio J.; CANIZARES, Claudio. **Electric energy systems**: analysis and operation. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. Disponível em: <https://mrce.in/ebooks/Electric%20Energy%20Systems%20Analysis%20&%20Operation%202nd%20Ed.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2024.

GLOVER, J. D.; OVERBYE, Thomas J.; SARMA, M. S. **Power System Analysis & Design**. 6. ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook**, 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e4d12822-3720-4fa6-8b9c-f2984c4dc638/Executivesummary-WorldEnergyOutlook2024.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Electricity storage and renewables: Costs and Markets to 2030**, Abu Dhabi: IRENA, 2017. Disponível em: [https://www.climateaction.org/images/uploads/documents/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017.pdf](https://www.climateaction.org/images/uploads/documents/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf). Acesso em: 02 jun. 2025.

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2011.

NOBLAT, W. V. J. B. et al. **Aplicação de sistemas de armazenamento em usinas fotovoltaicas híbridas conectadas ao Sistema Interligado Nacional para mitigar restrições de transmissão**. In: Encontro Regional Ibero-Americano Do Cigré – ERIAC, 19., 2023, Foz do Iguaçu. Foz do Iguaçu: CIGRÉ-Brasil, 2023. ISBN 978-65-00-63038-1.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Diagnóstico e perspectiva da evolução dos cortes de geração no Brasil**. Brasília: ONS, 2025a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RT%20DGLONS%200189-2025%20-%20GT%20Curtailement%20rev1.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Workshop: **Requisitos técnicos de conexão de sistemas de armazenamento de energia via baterias no SIN**. YouTube, 2025b. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=G-hS2WeaDG0> Acesso em: 03 jul. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede – vigentes**. Brasília: ONS, 2025c. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Resultados da operação**: histórico da operação. Brasília: ONS, 2025d. Disponível em: <https://www.ons.org.br/>. Acesso em: 4 mar. 2025.

PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA – PDE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-45/topico-79/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2025.

PLANO NACIONAL DE ENERGIA - PNE. **PNE 2050**, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2025.

TARRAGÔ, Vinícius Leal; NOVO, Lauro R. G. S. L.; CASTRO, José Filho Costa; RAMOS, Felipe O.; SILVA, Wagner R. M.; ALVES, Guilherme R.; BEZERRA, Luiz G. S.; SILVA JÚNIOR, Walter A.; NASCIMENTO, Rafaela S. Impacto de sistemas de armazenamento como reserva de capacidade para controle de carregamento de linhas de transmissão. *In: XIX Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ (ERIAC 2023)*, 2023, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2023. p. 2199. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Vinicius-Tarrago/publication/371138102\\_Impacto\\_de\\_Sistemas\\_de\\_Armazenamento\\_Como\\_Reserva\\_de\\_Capacidade\\_Para\\_Control\\_de\\_Carregamento\\_de\\_Linhas\\_de\\_Transmissao/links/64758fb459d5ad5f9c85bea2/Impacto-de-Sistemas-de-Armazenamento-Como-Reserva-de-Capacidade-Para-Control-de-Carregamento-de-Linhas-de-Transmissao.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vinicius-Tarrago/publication/371138102_Impacto_de_Sistemas_de_Armazenamento_Como_Reserva_de_Capacidade_Para_Control_de_Carregamento_de_Linhas_de_Transmissao/links/64758fb459d5ad5f9c85bea2/Impacto-de-Sistemas-de-Armazenamento-Como-Reserva-de-Capacidade-Para-Control-de-Carregamento-de-Linhas-de-Transmissao.pdf). Acesso em 05 jul. 2025