

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA - ENERGIA

Iuri Cristian Tanin Oliveira

**BENEFÍCIOS DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO: UMA REVISÃO E UMA APLICAÇÃO A UM SISTEMA DE
PEQUENO PORTE**

Juiz de Fora
2025

Iuri Cristian Tanin Oliveira

**BENEFÍCIOS DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO: UMA REVISÃO E UMA APLICAÇÃO A UM SISTEMA DE
PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao programa de Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Juiz de Fora como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista. Modalidade: Energia

Orientador: Prof. D.Sc Leonardo Willer de Oliveira

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Oliveira, Iuri Cristian T.
BENEFÍCIOS DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO : UMA REVISÃO E UMA
APLICAÇÃO A UM SISTEMA DE PEQUENO PORTE / Iuri Cristian T
Oliveira. -- 2025.
71 p. : il.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2025.

1. Armazenamento de energia. 2. Transição energética. 3
Sistemas de transmissão. 4. Fontes renováveis. I. de Oliveira,
Leonardo Willer, orient. II. Título.

Iuri Cristian Tanin Oliveira

**BENEFÍCIOS DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO: UMA REVISÃO E UMA APLICAÇÃO A UM SISTEMA DE
PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao programa de Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Juiz de Fora como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista. Modalidade: Energia

Aprovada em 17 de março de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. D.Sc Leonardo Willer de Oliveira - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D.Sc Edimar Jose de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho aos meus pais e avós
exemplos de pessoas honestas e
batalhadoras que me inspiraram e
ajudaram na realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, e por me proteger de todo o mal existente, pois sem Ele nada disso seria possível.

Agradeço principalmente a minha mãe Jequeline e ao meu pai Cleomar, por todo o amor, carinho e ensinamento de bons valores, por serem minha maior inspiração, diante todos os obstáculos que já enfrentaram. Nunca deixaram de acreditar nos meus sonhos, e sou eternamente grato a todo sacrifício que fizeram, para que eu pudesse concluir essa grande etapa da minha vida. Obrigado por todas as conversas e conselhos nos momentos de dúvidas ao longo dessa longa caminhada. E pela paciência e entendimento, em todas as vezes que precisaram de mim e eu não pude estar presente.

Agradeço aos meus avós, por terem ajudado em minha criação, cuidado de mim enquanto meus pais estavam trabalhando, por todo amor e carinho incondicional que me deram, além de todos os ensinamentos. Em especial ao meu avô José Carlos, que topou todas as minhas aventuras, e me levou em praticamente todos os compromissos que tive ao longo da vida.

Agradeço à minha namorada Letícia, que está junto comigo desde o primeiro ano da graduação, obrigado pelo seu amor e carinho, por sempre me apoiar, incentivar e pela paciência e compreensão ao longo de todos esses anos.

Agradeço ao meu orientador e professor Leonardo Willer de Oliveira, por ter me aceitado como seu orientando, pela confiança, paciência, disponibilidade e por todo conhecimento compartilhado com extremo profissionalismo durante a graduação e no desenvolvimento deste trabalho, sendo fundamental para o meu desenvolvimento profissional.

Agradeço a todos os amigos feitos durante a graduação, não só pela troca de conhecimento, mas também pelo excelente convívio, que tornaram essa caminhada mais agradável.

Agradeço ao professor Edimar Jose de Oliveira, por aceitar fazer parte da banca avaliadora, e a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, compartilhando conhecimentos técnicos e de vida.

Por último, não menos importantes, agradeço a todos os professores que tive antes da graduação, sendo essenciais na minha formação base. Além das pessoas que conviveram comigo e contribuíram de alguma maneira na minha trajetória.

RESUMO

Este estudo visa demonstrar os benefícios e a necessidade da utilização de sistemas de armazenamento de energia, na operação de sistemas de transmissão de energia elétrica, diante das novas características, impostas pelo avanço da transição energética, devido a crescente penetração de fontes de energia renováveis com intuito de diminuir a emissão de gases causadores do efeito estufa. São abordadas diferentes tecnologias de armazenamento de energia, que podem ser utilizadas em redes elétricas oferecendo diferentes suportes. Além de demonstrar os principais serviços que um sistema de armazenamento de energia com baterias pode fornecer para o sistema elétrico de potência. Os estudos de casos propostos, juntamente com a análise dos resultados das simulações realizadas, demonstram os benefícios da utilização de um sistema de armazenamento de energia com baterias, na operação de um sistema elétrico, com a presença de geração eólica com suas características estocásticas, diminuindo os custos de operação e gerenciando os fluxos de potência nas linhas de transmissão.

Palavras-chave: Sistema de armazenamento de energia com baterias. Transição energética. Sistemas de transmissão de energia elétrica. Fontes de energia renováveis.

ABSTRACT

This study aims to demonstrate the benefits and the need for using energy storage systems in the operation of electrical power transmission systems, given the new characteristics imposed by the advancement of the energy transition, due to the increasing penetration of renewable energy sources with the intention of reducing the emission of greenhouse gases. Different energy storage technologies that can be used in electrical grids offering different supports are addressed. In addition to demonstrating the main services that an energy storage system with batteries can provide to the electrical power system. The proposed case studies, together with the analysis of the results of the simulations performed, demonstrate the benefits of using an energy storage system with batteries in the operation of an electrical system, with the presence of wind generation with its stochastic characteristics, reducing operating costs and managing power flows in the transmission lines.

Keywords: Energy storage system with batteries. Energy transition. Electrical power transmission systems. Renewable energy sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Tipos de armazenamento de energia	17
Figura 2	– Curva de controle de regulação de frequência primária	25
Figura 3	– Frequência do sistema e a saída de um sistema de armazenamento de energia de baterias	25
Figura 4	– Níveis de controle de frequência	26
Figura 5	– Perfil de frequência diante uma perturbação no sistema	27
Figura 6	– Circuito equivalente de ordem inteira	31
Figura 7	– Curva característica da espectroscopia de impedância eletroquímica de uma bateria de íons de lítio	33
Figura 8	– Circuito equivalente de ordem fracionária	33
Figura 9	– Sistema elétrico de potência do Nordeste da Itália	35
Figura 10	– Sistema elétrico genérico de 2 barras	40
Figura 11	– Sistema elétrico genérico para modelagem do fluxo de potência ótimo.....	42
Figura 12	– Sistema elétrico de pequeno porte	50
Figura 13	– Gráfico da geração eólica ao longo de 24 horas	53
Figura 14	– Gráfico da operação do sistema elétrico de pequeno porte sem baterias	56
Figura 15	– Gráfico da operação do sistema elétrico de pequeno porte com baterias	58
Figura 16	– Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW por linha sem baterias	60
Figura 17	– Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW por linha com baterias	62
Figura 18	– Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha sem baterias	64
Figura 19	– Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha com baterias	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Dados utilizados nos estudos	36
Tabela 2	– Curva de geração eólica normalizada utilizando o fator de capacidade.....	43
Tabela 3	– Dados das barras do sistema de pequeno porte	50
Tabela 4	– Dados das linhas do sistema de pequeno porte	51
Tabela 5	– Dados das barras geradoras do sistema de pequeno porte	51
Tabela 6	– Dados da usina eólica do sistema de pequeno porte	51
Tabela 7	– Curva de geração da usina eólica ao longo de 24 horas	52
Tabela 8	– Dados do sistema de baterias do sistema elétrico de pequeno porte.....	53
Tabela 9	– Operação do sistema elétrico de pequeno porte sem baterias	55
Tabela 10	– Operação do sistema elétrico de pequeno porte com baterias	57
Tabela 11	– Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW por linha sem baterias	59
Tabela 12	– Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW por linha com baterias	60
Tabela 13	– Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha sem baterias	63
Tabela 14	– Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha com baterias	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente contínua
CPE	Elemento de fase constante
Hz	Hertz
KW	Quilowatt
Li-ion	Íons de lítio
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
NaS	Sódio-enxofre
ONS	Operador Nacional do Sistema
RC	Resistor e capacitor
ROCOF	Taxa de variação de frequência
SOC	Estado de carga

LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca registrada
™	Marca comercial não registrada
\geq	Maior ou igual
Σ	Somatório
\leq	Menor ou igual
Δt	Tamanho do intervalo entre o tempo final e o tempo inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÕES	14
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	METODOLOGIA	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADAS EM REDES DE TRANSMISSÃO	16
2.1	TIPOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	16
2.2	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MECÂNICA	17
2.2.1	Armazenamento hidrelétrico bombeado	17
2.2.2	Armazenamento de energia com volantes de inércia (Flywheel)	18
2.2.3	Armazenamento por ar comprimido	19
2.3	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	19
2.3.1	Armazenamento com supercapacitores	20
2.3.2	Armazenamento com supercondutores	20
2.4	ARMAZENAMENTO QUÍMICO	21
2.4.1	Armazenamento com baterias	21
2.4.2	Armazenamento com hidrogênio	22
2.5	ARMAZENAMENTO TÉRMICO	22
3	SERVIÇOS FORNECIDOS POR BATERIAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	24
3.1	REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA	24
3.1.1	Reservas para o controle de frequência	26
3.1.2	Inércia Virtual	27
3.2	RESERVA DE ENERGIA	28
3.3	CORTE DE PICO	28
3.4	BLACK START	29
3.5	REGULAÇÃO DE TENSÃO	29
3.6	INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS	30
3.7	MODELOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS	30
3.7.1	Modelo de circuito equivalente de ordem inteira	31

3.7.2	Modelo de circuito equivalente de ordem fracionária	32
3.8	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	35
3.8.1	Metodologia do exemplo de estudo	36
3.8.2	Conclusões do exemplo de estudo	37
4	MODELAGEM IMPLEMENTADA	38
4.1	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	38
4.1.1	Programação Linear	38
4.1.2	Formulação matemática	38
4.1.3	Formulação computacional	39
4.2	ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS	40
4.2.1	Fluxo de potência linearizado	40
4.2.2	Fluxo de potência ótimo	41
4.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO	42
4.3.1	Usina de geração eólica	42
4.3.2	Sistema de baterias	44
4.3.3	Balanco de potência do sistema	46
4.3.4	Função objetivo e variáveis do problema	46
4.3.4	Restrições de igualdade	47
4.3.5	Restrições de desigualdade	47
4.3.6	Restrições de canalização	48
4.3.7	Vetor de custos	49
4.4	SISTEMA ELÉTRICO DE PEQUENO PORTE UTILIZADO PARA SIMULAÇÕES	50
4.5	ESTUDO PROPOSTO PARA O SISTEMA ELÉTRICO DE PEQUENO PORTE	53
5	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	55
5.1	REDUÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL	55
5.2	REDUÇÃO DO CORTE DE CARGA	58
5.3	REDUÇÃO DO CORTE DE GERAÇÃO EÓLICA	62
6	CONCLUSÃO	67
6.1	TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico e socioeconômico mundial, há uma crescente demanda por energia elétrica. Para o suprimento dessa demanda, a maioria da energia elétrica gerada, é proveniente de fontes de energia que utilizam combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo, além de serem recursos não renováveis, suas queimas geram emissões de gases causadores do efeito estufa, que contribuem para aumentar o aquecimento global e as mudanças climáticas.

As fontes de energia renováveis eólica e solar, são as principais soluções para a diversificação da matriz energética, visando o não esgotamento dos recursos naturais, e ao mesmo tempo a diminuição das emissões de gases do efeito estufa. Porém, essas fontes possuem características estocásticas, pois a sua geração de energia elétrica depende de fatores climáticos, que são imprevisíveis, sendo assim não é possível controlar a quantidade de energia elétrica gerada, como em uma usina despachável convencional, térmica ou hidrelétrica.

As características intermitentes de geração, causadas pela grande inserção de fontes de energia renováveis nos sistemas elétricos, criam novos desafios para realizar a operação segura da rede, uma vez que, existem variações abruptas inesperadas de entrada e saída de geração, dificultando manter o balanço entre carga e geração igual, modo no qual o sistema foi projetado para operar.

Os sistemas de armazenamento de energia, surgem com o intuito de oferecer serviços aos sistemas elétricos, para mitigar os efeitos causados pelo aumento da penetração de fontes de energia renováveis, auxiliando no suporte de frequência, regulação de tensão e no gerenciamento da energia escoada pelas linhas de transmissão.

A transição energética, e a busca pela redução das emissões de carbono, levaram as indústrias automobilísticas, a realizarem grandes investimentos para aprimorarem as tecnologias das baterias utilizadas em carros elétricos. Dentre as tecnologias disponíveis para realizar o armazenamento de energia, as baterias passaram pelo maior avanço tecnológico, melhorando a eficiência, e diminuindo o custo de produção e implementação, tornando-as economicamente viáveis para a implementação em sistemas elétricos de potência.

Portanto, as baterias surgem como principal tecnologia de armazenamento de energia, com intuito de fornecer serviços aos sistemas elétricos, afim de mitigar os

impactos causados pela crescente inserção de fontes de energias renováveis na matriz elétrica.

1.1 MOTIVAÇÕES

Com o avanço da transição energética, novos desafios para a operação do sistema elétrico são impostos, devido às mudanças em suas características causadas pela grande penetração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Sendo assim, faz-se necessário a realização de estudos para manter a confiabilidade do sistema, e a qualidade de energia. Os sistemas de armazenamento de energia tornam-se indispensáveis, para manter uma operação segura do sistema elétrico.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho, consiste em apresentar os benefícios do armazenamento de energia em sistemas de transmissão com penetração de energia renovável, a ponto de melhorar a flexibilidade da rede, diminuindo o custo de operação, evitando o corte de carga e de geração renovável, sem a necessidade de recapacitar ou construir novas linhas de transmissão.

1.3 METODOLOGIA

Uma revisão literária é realizada para apresentar as principais tecnologias de armazenamento de energia existentes, com potencial para a implementação em redes elétricas, além de descrever os principais serviços prestados por baterias em sistemas elétricos de potência. Com a utilização da modelagem linear de um sistema de armazenamento de energia com bateria, e de um sistema de transmissão, implementou-se um algoritmo no software MATLAB, para a execução um fluxo de potência ótimo, identificando os benefícios da utilização do sistema de baterias, em uma rede elétrica, que possui geração proveniente de uma fonte de energia renovável.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é dividida em 6 capítulos. O capítulo 1, faz uma contextualização da importância e necessidade da utilização de sistemas de armazenamento de energia em redes que possuem fontes de energia renováveis, para a segurança operacional.

O capítulo 2, apresenta e descreve através de uma revisão literária, as principais tecnologias de armazenamento de energia, que podem ser utilizadas em redes elétricas.

No capítulo 3, é demonstrado os serviços fornecidos por baterias, para sistemas elétricos de potência, também através de uma revisão literária.

No capítulo 4, é apresentada a metodologia para realizar a modelagem da utilização de um sistema de baterias em uma rede de transmissão. Posteriormente é apresentado sistema utilizado para estudo, onde é possível realizar a modelagem computacional, para a executar as simulações.

O capítulo 5, apresenta os resultados das simulações realizadas, sendo possível identificar os benefícios do sistema de armazenamento com baterias, na operação do sistema elétrico com uma usina eólica inserida.

Por fim, o capítulo 6, descreve as conclusões dos estudos, suas limitações, e as propostas para futuros trabalhos.

2 TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADAS EM REDES DE TRANSMISSÃO

O mundo está passando por um momento de transição energética, onde o principal objetivo é a redução das emissões de carbono, principal gás contribuinte para o aumento do efeito estufa. Sendo assim, é necessário realizar a substituição de fontes de energia provenientes de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural que emitem grandes quantidades de carbono, por fontes de energia renováveis, como eólica e solar, que emitem uma menor quantidade de gás carbônico para a atmosfera. Entretanto, essas novas fontes de energia possuem uma característica intermitente, ou seja, a geração não é constante ao longo do tempo, e depende de fatores climáticos para determinar a quantidade de energia elétrica produzida.

O sistema elétrico brasileiro, foi projetado para funcionar de forma que, a quantidade de energia gerada, seja igual a quantidade de energia consumida. Devido a intermitência das fontes renováveis, acontecem momentos com excesso de geração e baixa demanda, e momentos de alta demanda e mínima geração, ocasionando problemas como o congestionamento das linhas de transmissão, que ocorrem quando o sistema não consegue escoar de forma segura o fluxo de energia sem extrapolar seus limites. A grande penetração das fontes eólica e fotovoltaica, podem causar também alteração na frequência da rede, por possuírem características de baixa inércia, isso significa que, quando há uma diferença grande entre geração e consumo, elas não conseguem manter a frequência do sistema estável como as hidrelétricas, que possuem grandes massas rotativas.

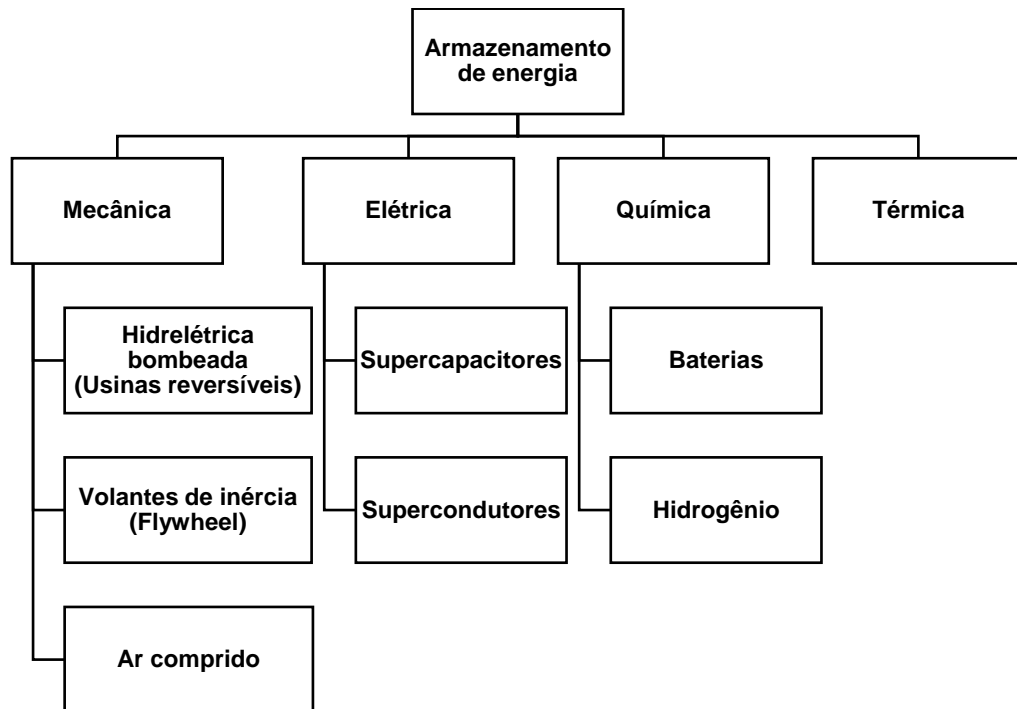
Sendo assim, é de extrema necessidade, a utilização de tecnologias para efetuar o armazenamento de energia, a fim de mitigar os problemas inerentes a alta penetração de energia proveniente de fontes que possuem características intermitentes, seja para evitar o congestionamento de uma linha de transmissão, ou auxiliar na regulação de tensão e frequência do sistema.

2.1 TIPOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Certamente armazenar energia elétrica não é uma tarefa simples, sendo necessário em alguns casos realizar uma conversão de energia, para que ela seja

armazenada em um tempo considerável, principalmente quando se trata de armazenamento envolvendo uma rede elétrica. Sendo assim, existem diferentes tipos de armazenamento de energia, cada qual com suas características que são classificadas de acordo com o tipo de energia armazenada.

Figura 1 – Tipos de armazenamento de energia



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MECÂNICA

O armazenamento energia mecânica, consiste na conversão da energia elétrica em energia mecânica cinética ou potencial, para que seja possível realizar o seu armazenamento.

2.2.1 Armazenamento hidrelétrico bombeado

Popularmente conhecido como usinas reversíveis, consiste no bombeamento de um reservatório de água inferior, em momentos em que há um excesso de energia na rede, para um reservatório superior, possibilitando turbinar a água para gerar energia elétrica em momentos de alta demanda e baixa geração (Zanatta; Pereira; Ferreira, 2023).

O bombeamento hidrelétrico, possui o maior nível de maturidade em relação às outras tecnologias de armazenamento de energia mecânica, mesmo que possua um alto custo de investimento, e depende de características geográficas para sua instalação, é amplamente utilizado devido a sua funcionalidade e longa vida útil.

Um exemplo, é a utilização no sudoeste da China, uma região montanhosa, que favorece a instalação de hidrelétricas reversíveis, além disso, nesta região, há uma grande incidência solar, possibilitando também a exploração de energia fotovoltaica. Apesar de ser uma região que não apresenta um alto consumo de energia elétrica, comparada com outras regiões, o potencial de exploração de uma energia limpa é extremamente explorado, a favor de uma transição energética, para diminuir a emissão dos gases do efeito estufa, gerados pelas fontes de energia que utilizam combustíveis fósseis. Os sistemas são combinados para realizar o alívio da rede elétrica em momentos de pico de geração fotovoltaica e baixa demanda, evitando o congestionamento e o corte de geração de energia fotovoltaica (Zhou *et al.*, 2023).

2.2.2 Armazenamento de energia com volantes de inércia (Flywheel)

Sistema formado por uma massa girante, que converte a energia elétrica em energia cinética, realizando seu armazenamento. São máquinas de extrema eficiência, pois seu rotor é projetado para possuir o mínimo de atrito possível, ele é suspenso por mancais que possuem características magnéticas, para que possa flutuar dentro do encapsulamento a vácuo, diminuindo a resistência mecânica e a resistência do ar (Calero *et al.*, 2023).

Os flywheels ficam enterrados, uma vez que a massa girante é tirada da inércia, devido a sua baixa resistência, gasta-se muito pouca energia para mantê-los na velocidade nominal. Eles são conectados diretamente em uma máquina de indução, em aplicações que exigem uma alta potência, ou a uma máquina síncrona de ímãs permanentes, em aplicações que precisam de altas velocidades. Essas máquinas, funcionam como motor para girar o volante de inércia e armazenar a energia cinética, e como gerador para transformar a energia cinética novamente em elétrica quando for solicitada (Calero *et al.*, 2023).

Como o armazenamento em volantes de inércia, possui uma resposta a perturbações do sistema extremamente rápida, consegue dar um suporte para evitar

flutuações de frequência na rede, outras vantagens são a longa vida útil entre 15 a 20 anos, associada a baixa manutenção e a capacidade de realizar mais de 150000 ciclos de carga, sem perda de eficiência, diferentemente das baterias, que ao realizar vários ciclos de carga, diminuem sua eficiência para realizar o armazenamento de energia (Calero *et al.*, 2023).

2.2.3 Armazenamento por ar comprimido

O sistema de armazenamento de ar comprimido, utiliza energia elétrica em momentos de baixa demanda, e pico de produção, onde ela possui um menor preço, para alimentar os compressores e pressurizar o ar (Dubey *et al.*, 2024).

Em pequenos sistemas, o ar pressurizado é estocado em tanques cilíndricos que ficam sobre o solo, já em sistemas de grande porte, o ar pressurizado é estocado em formações geológicas subterrâneas. Quando há o carregamento do sistema, o ar pressurizado aumenta a pressão dentro do reservatório, aumentando sua energia potencial. Para a geração de energia elétrica, o ar comprimido estocado, é expandido em turbinas de alta e baixa pressão, que possuem acoplados ao seu eixo um gerador síncrono, possibilitando a geração de energia elétrica (Calero *et al.*, 2023).

Para melhorar a eficiência do sistema, o calor gerado pela compressão do ar, pode ser extraído e armazenado, para ser utilizado nas turbinas quando se realiza o processo de expansão. Existe o sistema de armazenamento por ar comprimido diabático, onde o ar é pré aquecido, em seguida misturado com o gás para ser queimado antes do processo de expansão, gerando resíduos poluentes; e existe também o sistema adiabático, que não utiliza gás, mas sim o pré aquecimento do ar, utilizando o calor extraído do estágio de compressão, diminuindo os impactos ambientais (Calero *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024)

2.3 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Consiste no armazenamento da energia elétrica de uma rede, para que ela possa ser utilizada em um momento específico, diferente do momento em que foi gerada, sem a necessidade de realizar sua conversão.

2.3.1 Armazenamento com supercapacitores

Os supercapacitores são constituídos por dois eletrodos de cátodo e ânodo imersos em um eletrólito, onde é possível armazenar energia elétrica no campo elétrico formado entre o eletrodo e o eletrólito, possuem também uma membrana de íons, evitando o curto circuitos entre as camadas superior e inferior, além de coletores de corrente conectados aos eletrodos, permitindo assim transmitir a energia para um circuito externo. Outra característica é a sua energia específica superior em relação aos capacitores convencionais, e uma potência específica maior em relação às baterias (Berrueta *et al.*, 2019).

Devido a intermitências das fontes de energia fotovoltaica e eólica, torna-se interessante a utilização de supercapacitores. No sistema fotovoltaico, os supercapacitores exercem uma função de complementaridade em relação às baterias, com o aumento da vida útil, maior velocidade de em ciclos de carga e descarga e alta densidade de potência, podendo também ser implementados sistemas híbridos com baterias e supercapacitores. Devido às características da geração eólica, esses sistemas híbridos se tornam eficientes para manter níveis de potência e frequência dentro das faixas aceitáveis, dando suporte em flutuações de tensão em curto e longo prazo, otimizando o sistema e mantendo a qualidade de energia (Zhang; Gu; Chen, 2023).

Sendo assim, o supercapacitor se torna uma forma de armazenamento de energia bastante favorável, em aplicações que requerem um ciclo de carga e descarga rápido, e em situações que é necessária uma grande quantidade de energia em um curto espaço de tempo (Wang *et al.*, 2023).

2.3.2 Armazenamento com supercondutores

Armazenamento de energia no campo eletromagnético formado por uma bobina supercondutora na passagem de corrente elétrica, a bobina é mantida em temperaturas criogênicas, através de um sistema de resfriamento, com o intuito de diminuir sua resistência elétrica e assim diminuindo suas perdas (Dubey *et al.*, 2024).

Em relação a estabilidade do sistema elétrico, o armazenamento de energia com supercondutores pode ser utilizado para suavizar as variações de carga, controle de frequência e controle de geração, tudo isso devido a sua alta velocidade de carga

e descarga; sendo possível melhorar a qualidade de energia, devido ao grande aumento de energia eólica e fotovoltaica no sistema que, trazem novos desafios como a intermitência de geração (Tan *et al.*, 2021).

Apesar de ser muito eficiente, ainda é uma tecnologia nova, portanto seus custos de produção são relativamente elevados. Porém muitas pesquisas estão sendo voltadas para sistemas de armazenamento de energia, devido ao aumento da integração de fontes renováveis no sistema, o que leva a uma tendência na redução dos custos relativos à produção de supercondutores maiores, tornando-os economicamente viável (Mukherjee; Rao, 2019).

2.4 ARMAZENAMENTO QUÍMICO

É o processo de armazenar a energia através das interações moleculares das substâncias presentes no sistema de armazenamento, podendo converter energia elétrica em energia química, assim como energia química em elétrica posteriormente.

2.4.1 Armazenamento com baterias

As baterias são compostas por uma ou mais células, onde cada célula possui um eletrólito para permitir a passagem dos elétrons, possuem um ânodo, onde são depositadas as cargas negativas, e um cátodo, onde são depositadas as cargas positivas, além de uma membrana para separar fisicamente o polo positivo e o negativo da bateria, a fim de evitar o curto circuito.

Existem diferentes tipos de tecnologias de armazenamento de energia em baterias, com potencial para sistemas de energia elétrica, a bateria de chumbo-ácido é uma delas, é a tecnologia mais antiga, possui um baixo custo e alta eficiência, porém possui um baixo ciclo de vida, e pequena densidade energética. Existem outras tecnologias que podem ser utilizadas, como a de sódio-enxofre (NaS), baterias de fluxo, cada uma com a sua especificidade. Atualmente, os pesquisadores estão com os olhos voltados para as baterias de íons de lítio (Li-ion), suas principais características são a alta densidade de energia, eficiência elevada, e uma longa vida útil, porém o seu custo é muito elevado, mas devidos aos avanços tecnológicos, seu valor vem diminuindo ao longo dos anos, tornando-a ainda mais atrativa (Javadi *et al.*, 2022).

As baterias conseguem facilitar a integração de energia renovável no sistema elétrico, lidando com os problemas de intermitência realizando cargas e descargas, evitando o congestionamento de linhas de transmissão, além de suavizar a taxa de mudança de potência devido a baixa inércia das fontes eólica e fotovoltaicas (Javadi *et al.*, 2022).

2.4.2 Armazenamento com hidrogênio

O hidrogênio é um dos elementos mais promissores para se tornar o combustível do futuro, devido a sua alta capacidade energética, e por possuir uma combustão limpa, produzindo apenas água. Sendo assim, técnicas de armazenamento de energia foram desenvolvidas, utilizando uma fonte energética para obter hidrogênio, que pode ser armazenado e transportado, para posteriormente ser utilizado como fonte de energia.

O hidrogênio é caracterizado de acordo com a tecnologia utilizada para a sua obtenção. O hidrogênio verde é proveniente de fontes de energia renovável. Com a transição energética, temos um aumento significativo na implementação de usinas eólicas e fotovoltaicas, devido às suas características intermitentes, é possível utilizar a eletricidade gerada em momentos de alta produção e baixa demanda, para realizar a eletrólise da água, produzindo hidrogênio, onde será possível armazená-lo, e até mesmo transportá-lo, evitando o corte de geração de energia elétrica, devido às limitações físicas do sistema elétrico. Posteriormente, esse hidrogênio pode ser utilizado para alimentar uma célula a combustível, e assim gerar eletricidade em momentos de baixa produção e alta demanda de energia elétrica (Li *et al.*, 2022; Qudaih *et al.*, 2024).

2.5 ARMAZENAMENTO TÉRMICO

O armazenamento de energia térmica, consiste na transferência de energia, através do aquecimento ou resfriamento de um sistema, que possibilita o armazenamento do calor e a sua utilização posteriormente.

Devido ao aumento de fontes de energia renováveis como eólica e fotovoltaica, o armazenamento de energia térmica, torna-se uma boa solução para lidar com as características intermitentes da geração de energia elétrica renovável, armazenando

calor em momentos de alta produção e baixa demanda, podendo utilizar o calor em momentos de alta demanda e baixa produção (Schilt; Schuetz, 2024).

Uma forma de armazenamento, são as técnicas de utilização da energia solar concentrada, ou energia solar térmica, que consiste no direcionamento e captação dos raios solares para um sistema, que geralmente contém um fluido, permitindo o armazenamento do calor, que posteriormente pode ser usado para gerar eletricidade em sistemas termodinâmicos, utilizando a diferença de temperatura em geradores termoelétricos. Com isso é possível armazenar a energia durante o dia, e utilizá-la durante a noite (Karim *et al.*, 2024).

3 SERVIÇOS FORNECIDOS POR BATERIAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

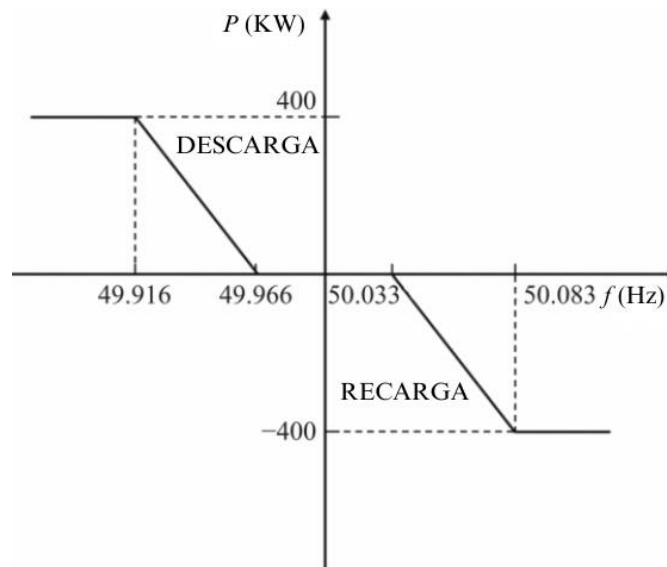
No contexto de transição energética, a implementação de veículos elétricos é essencial, principalmente para as indústrias automobilísticas, o que levou a um grande desenvolvimento de tecnologias de baterias, tornando-as mais eficientes, melhorando sua vida útil, e principalmente diminuindo o custo de produção e implementação. Com isso, a tecnologia de armazenamento de energia em baterias está sendo amplamente empregada em sistemas elétricos, fornecendo serviços necessários para uma operação segura das redes, que possuem novas características, devido à grande penetração de fontes de energia renováveis com características intermitentes (Li; Wang, 2021; Santos *et al.*, 2022).

3.1 REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA

A frequência elétrica da rede é um dos parâmetros que deve ser controlado dentro de uma faixa de valores aceitáveis, para manter a estabilidade do sistema e sua operação segura. Grandes perturbações como entrada ou perda inesperada de geração, ou qualquer outro fenômeno que altere o balanço entre geração e demanda, pode causar alterações na frequência. Para mitigar os efeitos de variação de frequência, o armazenamento de energia em baterias se torna uma excelente solução, devido ao fato de conseguirem injetar ou absorver potência ativa ou reativa de forma rápida, variando a quantidade em menos de um segundo, conseguindo acompanhar o comportamento de variação da frequência (Guzman E. *et al.*, 2022).

Quando há uma entrada de carga muito grande no sistema, ou a perda inesperada de um gerador, a demanda se torna maior do que a geração, o que pode levar a diminuição da frequência do sistema. E quando temos um excesso de geração em relação a carga, a frequência do sistema tende a subir, esse comportamento de controle primário de frequência é demonstrado na Figura 2 (Hu *et al.*, 2021; Li; Wang, 2021).

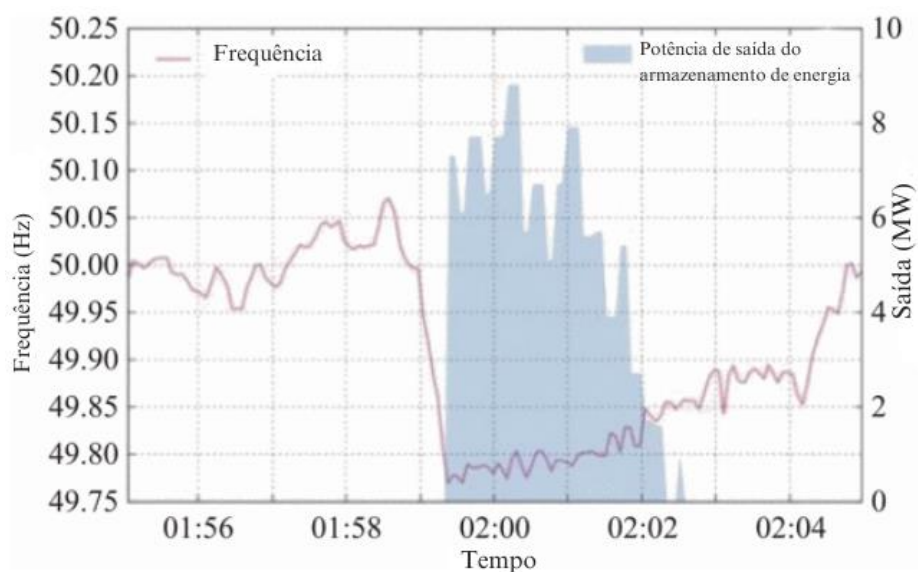
Figura 2 – Curva de controle de regulação de frequência primária



Fonte: Adaptado de Li e Wang (2021).

Li e Wang (2021) demonstram através da Figura 3, o funcionamento real de um armazenamento de energia com baterias, operando na regulação de frequência de um sistema da Austrália do Sul, em relação a uma anomalia que ocasionou a queda da frequência do sistema. Com isso podemos observar o seu comportamento, onde foi capaz de injetar uma grande quantidade de potência ativa variável em um curto espaço de tempo, evitando a diminuição da frequência.

Figura 3 – Frequência do sistema e a saída de um sistema de armazenamento de energia de baterias

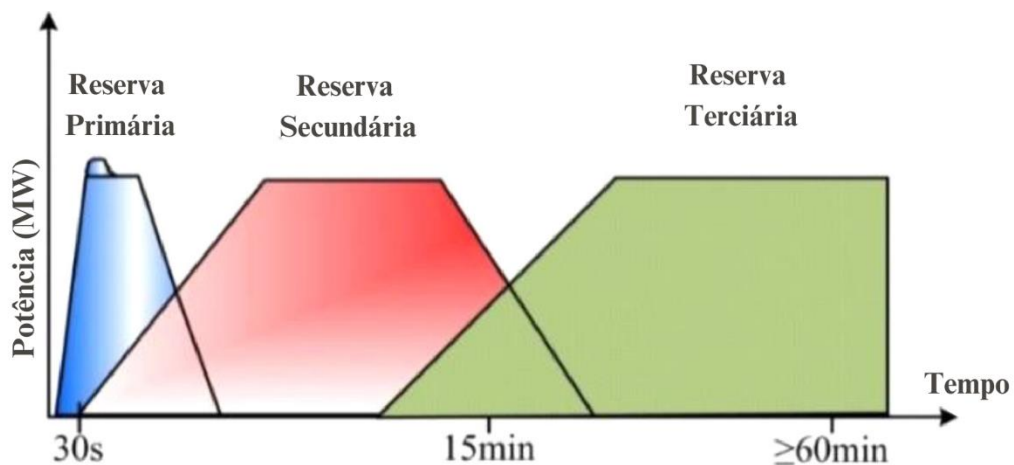


Fonte: Adaptado de Li e Wang (2021).

3.1.1 Reservas para o controle de frequência

Como visto, o sistema de armazenamento de energia com baterias pode atuar na regulação de frequência do sistema, o controle é dividido em três níveis conforme a Figura 4.

Figura 1 – Níveis de controle de frequência



Fonte: Adaptado de Tan *et al.* (2021).

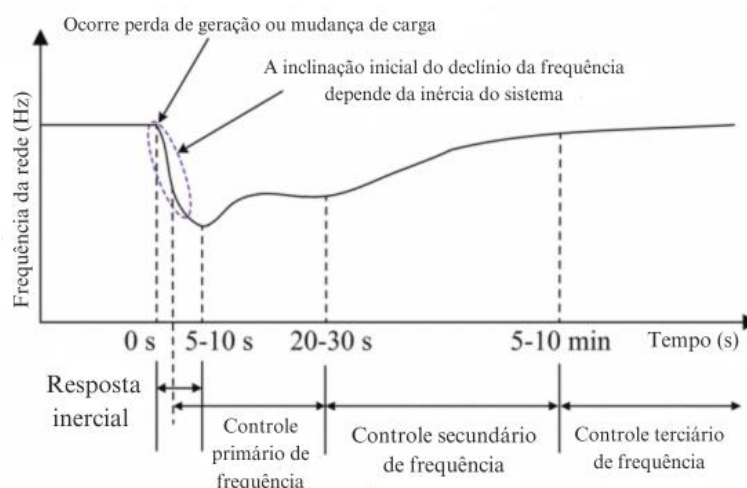
A reserva primária, realiza de forma automática a injeção ou absorção de potência, a partir da perturbação na frequência do sistema em poucos segundos, é a resposta mais rápida, com intuito de combater o transitório inicial, diminuir a taxa de variação e estabilizar a frequência entre 5 a 30 segundos durante 5 minutos. Logo após o evento transitório, de maneira automática, a reserva secundária é acionada, que tem como objetivo principal, retornar a frequência do sistema, para uma faixa aceitável, injetando ou deixando de injetar potência no sistema, isso ocorre com o acionamento ou corte de alguns geradores específicos, que podem entrar ou sair de operação em um curto período. Após o sistema atingir uma faixa segura de frequência, o controle terciário entra em atividade, dessa vez de forma manual, ou seja, as operações realizadas são executadas de acordo com o operador, com o intuito de ajustar a frequência do sistema para a frequência nominal na qual foi projetada. (Calero *et al.*, 2023; Guzman E. *et al.*, 2022; Tan *et al.*, 2021).

3.1.2 Inércia Virtual

Os geradores síncronos, possuem grandes massas girantes, onde existe uma energia cinética armazenada. São equipamentos que possuem a velocidade mecânica igual à velocidade do campo girante, isso define a frequência de funcionamento da rede elétrica. Sistemas elétricos com grande quantidade de geração provenientes de geradores síncronos, possuem uma alta inércia, ou seja, quando acontece um evento ocasionando o desbalanço de potência entre geração e demanda, ocorre uma baixa variação na frequência. Porém, os sistemas elétricos estão se tornando cada vez mais estáticos, com a grande penetração de energia eólica e fotovoltaica, que utilizam máquinas assíncronas e eletrônica de potência, diminuindo a inércia do sistema, deixando-o mais susceptível a variação de frequência nos casos de desbalanço entre carga e geração, evento acentuado também devido às características intermitentes das fontes renováveis (Fang *et al.*, 2019).

O aumento da inércia do sistema atuará justamente na taxa de variação da frequência, conhecida também como ROCOF, caso essa taxa seja muito elevada, os relés de subfrequência e sobrefrequência podem atuar, ocasionando o desligamento do sistema. Com o aumento de fontes intermitentes, a inércia do sistema diminui, sendo assim, é possível utilizar um armazenamento de energia com baterias, para inserir uma inércia virtual, ou seja, não é uma máquina rotativa, porém, associado a um sistema de controle, é possível injetar ou absorver potência rapidamente, combatendo o ROCOF, tais eventos são demonstrados na Figura 5 (Li; Wang, 2021).

Figura 5 – Perfil de frequência diante uma perturbação no sistema



Fonte: Adaptado de Li e Wang (2021).

3.2 RESERVA DE ENERGIA

A capacidade de reserva de energia do sistema de baterias, está relacionada com o controle de frequência. O sistema de transmissão está alimentando uma carga, porém em um determinado momento acontece uma falha em algumas unidades geradoras, cria-se um vale de geração para atender a carga, devido ao fato de a bateria conseguir entrar em operação descarregando a potência armazenada, é possível continuar atendendo a carga, sem sofrer um desbalanço entre geração e consumo, evitando problemas que afetam a estabilidade, como a variação de frequência. Esses sistemas estão conectados diretamente à rede, e pelo fato de entrarem em operação rapidamente, são conhecidos também como reserva de giro, mesmo não possuindo partes giratórias (Tan *et al.*, 2021).

3.3 CORTE DE PICO

A linha de transmissão foi projetada para funcionar com uma certa capacidade, em um curto espaço de tempo, a carga do sistema pode exceder o limite da capacidade, ou ter picos de demanda isolados, isso acontece devido a algumas atividades industriais. Com a instalação de sistemas de armazenamento de energia com baterias em locais estratégicos, é possível alimentar esse pico de carga, injetando potência armazenada na bateria, evitando a sobrecarregar a linha de transmissão naquele instante, e melhorando os custos de geração, uma vez que, gasta-se muito combustível para variar a geração em um curto período de tempo, além de aumentar significativamente a emissão de gás carbônico. As baterias conectadas no sistema, serão carregadas nos momentos de baixa demanda e menor custo de energia (Li; Wang, 2021; Tan *et al.*, 2021).

Com a integração de sistemas de armazenamento de energia com baterias em pontos estratégicos da linha de transmissão, é possível aumentar a sua flexibilidade, ou seja, ao fornecer potência em um ponto específico no momento de alta demanda, o restante da linha não será utilizado para escoar essa potência, ocasionando um alívio de carga na linha. Como o sistema de baterias será carregando em ocasiões de baixa demanda, a capacidade de transmissão de potência da linha torna-se suficiente, evitando a necessidade momentânea de realizar uma recapacitação da linha, ou até

mesmo, postergar a construção de novas linhas de transmissão para atender a determinada de carga (Carlini *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2022).

3.4 BLACK START

A energização do sistema elétrico, após sua saída de operação devido a alguma falha catastrófica é chamada de black start. Trata-se de um processo complexo, que deve seguir etapas específicas, para mitigar os impactos transitórios a cada manobra realizada. Existem algumas unidades geradoras que podem realizar a partida a frio, como hidrelétricas e geradores a diesel, algumas unidades são mantidas ociosas, para que, na ocorrência de uma falha, elas possam energizar as linhas de transmissão, magnetizar os transformadores e dar partida em geradores que não partem sozinhos (Nguyen *et al.*, 2021; Pan *et al.*, 2023).

Devido às características intermitentes das fontes renováveis, não é possível utilizá-las de forma isolada para realizar o black start, porém, é possível utilizar o armazenamento de energia em baterias, coordenados com as fontes de geração eólica e fotovoltaica para realizar o black start, utilizando a energia armazenada. De uma forma controlada, as linhas são energizadas, depois os geradores são acionados, e por fim o armazenamento de energia deixa de fornecer potência de forma gradual para o sistema. A realização do black start, utilizando armazenamento de energia em baterias, diminui significativamente o tempo de retomada do sistema, em comparação com a utilização de geradores de partida a frio (Nguyen *et al.*, 2021; Pan *et al.*, 2023).

3.5 REGULAÇÃO DE TENSÃO

Dependendo das características do sistema elétrico, e do seu estado operativo, podem ocorrer oscilações no nível de tensão, impactando na estabilidade da rede e na qualidade de energia. O armazenamento de energia utilizando baterias, consegue injetar ou absorver potência ativa ou reativa de forma independente uma da outra, podendo dar o suporte necessário para manter a tensão dentro de uma faixa aceitável, com os processos de carga e descarga. Como a variação da tensão é mais sensível em relação a potência reativa, é possível executar a regulação de tensão instalando o armazenamento de energia no ponto crítico, assim, quando solicitada, a potência reativa será absorvida ou injetada na rede pelo armazenamento de energia naquele

local, descongestionando o restante da linha de transmissão, uma vez que essa potência reativa viria das unidades geradoras (Li; Wang, 2021; Tan *et al.*, 2021).

Diante das perturbações no sistema, o armazenamento de energia em baterias é muito eficiente em estabilizar a tensão nos momentos transitórios, devido a sua rápida resposta e elevadas taxas de carga e descarga (Datta; Kalam; Shi, 2018).

3.6 INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

As fontes de energia renováveis como a eólica e a fotovoltaica, possuem características intermitentes, ou seja, a geração de energia elétrica não é constante, e depende de fatores climáticos. Essas imprevisibilidades dificultam a integração dessas fontes diretamente na rede elétrica, pois afetam a operação e a estabilidade do sistema. Porém, é possível realizar uma operação combinada entre o armazenamento de energia de baterias, e as gerações renováveis, para suavizar as oscilações de potência gerada. Com um sistema de controle, as baterias vão absorver ou injetar potência, com intuito de limitar as variações da geração, permitindo a integração dessas fontes de maneira segura a rede (Javadi *et al.*, 2022).

3.7 MODELOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS

Para realizar a implementação do sistema de armazenamento de energia em baterias, faz-se necessário a realização da sua modelagem, a ponto de simular e entender seu comportamento.

Os modelos eletroquímicos, possuem o maior grau de precisão em representar as dinâmicas relacionadas aos processos de carga e descarga das baterias. Porém, devido a grande quantidade de não linearidades referentes aos processos químicos, faz com que a carga computacional do modelo seja muito elevada, inviabilizando para aplicações em tempo real relacionadas ao gerenciamento de energia (Rouholamini *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2024).

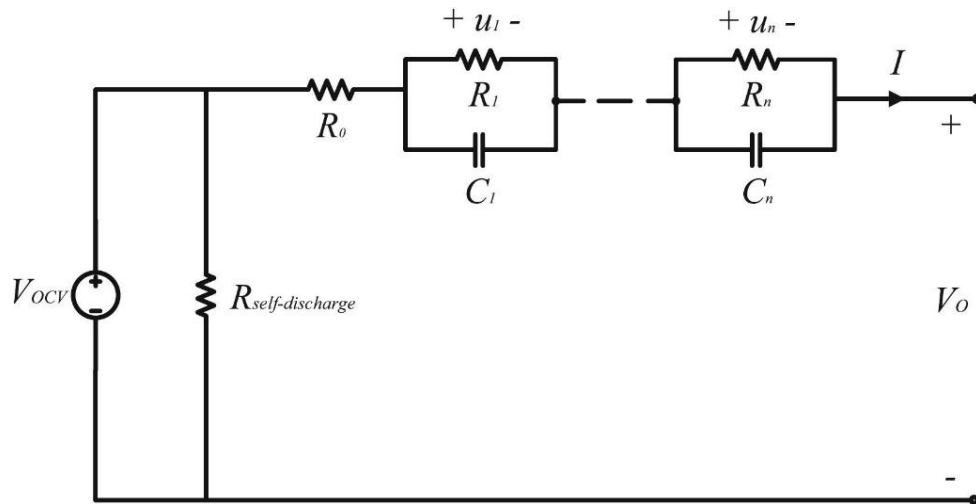
Os modelos empíricos, ou modelos de caixa preta, representam através de equações lineares os processos de carga e descarga da bateria, isso reduz consideravelmente a carga computacional para aplicações em tempo real em análise de redes. Porém, devido ao fato de não representar a dinâmica presente na bateria, torna-se o modelo menos preciso (Rouholamini *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2024).

O modelo de circuito equivalente, realiza uma mediação entre a complexidade do processo e a precisão, sem inviabilizar sua utilização com relação a carga computacional. Este modelo é composto de resistores e capacitores, a fim de representar o comportamento da bateria, é fácil de interpretar, ajustar os parâmetros e integrar com outros componentes do sistema elétrico (Rouholamini *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2024).

3.7.1 Modelo de circuito equivalente de ordem inteira

Esse modelo utiliza equações diferenciais de ordem inteira, tornando-o mais fácil de implementar, diminuindo a carga computacional. Um conjunto de componentes RC são utilizados para modelar a dinâmica transiente da bateria. Quanto mais ramificações RC, melhor a precisão, porém aumenta a complexidade e a carga computacional. A Figura 6 representa o circuito equivalente de ordem inteira (Zheng *et al.*, 2024).

Figura 6 – Circuito equivalente de ordem inteira



Fonte: Zheng *et al.* (2024).

Segundo Zheng *et al.* (2024) os parâmetros presentes no modelo são definidos da seguinte forma:

- V_{OCV} : Fonte de tensão dependente, que representa a tensão de circuito aberto da bateria, quando ela se estabiliza atingindo um nível de carga.

- I : Corrente terminal.
- V_O : Tensão terminal.
- R_O : Resistência ôhmica, representando as flutuações imediatas de tensão.
- R_1 a R_n : Resistência transientes.
- C_1 a C_n : Capacitâncias transientes.
- $R_{self-discharge}$: Resistência que modela a autodescarga da bateria.
- U_n : Tensão no ramo RC.

O estado de carga (SOC) da bateria, quantifica em porcentagem a quantidade de energia restante na bateria, em relação a sua capacidade total. Todos os parâmetros do circuito equivalente com exceção da resistência de autodescarga possuem não linearidades, e dependem do estado de carga e da temperatura operacional da bateria (Zheng *et al.*, 2024).

O comportamento do modelo de circuito equivalente de ordem inteira, é definido matematicamente conforme (3.1) e (3.2).

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{I}{C_1} - \frac{U_1}{R_1 C_1} \\ \vdots \\ \dot{U}_n = \frac{I}{C_n} - \frac{U_n}{R_n C_n} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$V_O = V_{OCV} - U_1 - \dots - U_n - IR_O \quad (3.2)$$

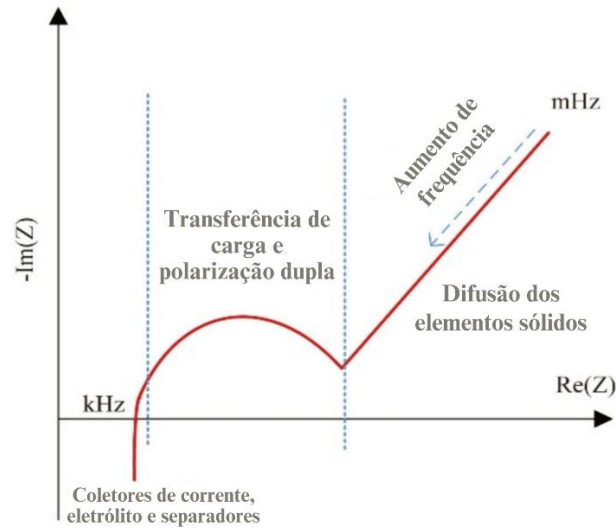
3.7.2 Modelo de circuito equivalente de ordem fracionária

O modelo de bateria de ordem inteira, consegue determinar com boa aproximação a dinâmica de uma bateria apenas em uma faixa limitada de frequência de operação. Para contornar este ponto, foi desenvolvido o modelo de ordem fracionária, utilizando equações diferenciais não inteiras, para capturar melhor a dinâmica de operação da bateria, no domínio do tempo e frequência em toda a faixa de operação (Zheng *et al.*, 2024).

Para determinar a real dinâmica interna de uma bateria de íons de lítio, pode-se utilizar uma espectroscopia de impedância eletroquímica, que é representado por um diagrama de Nyquist, representando um segmento linear de baixa frequência, uma seção semicircular de média frequência e uma calda de baixa frequência. Cada região

do diagrama, modela um comportamento físico da bateria como demonstrado na Figura 7.

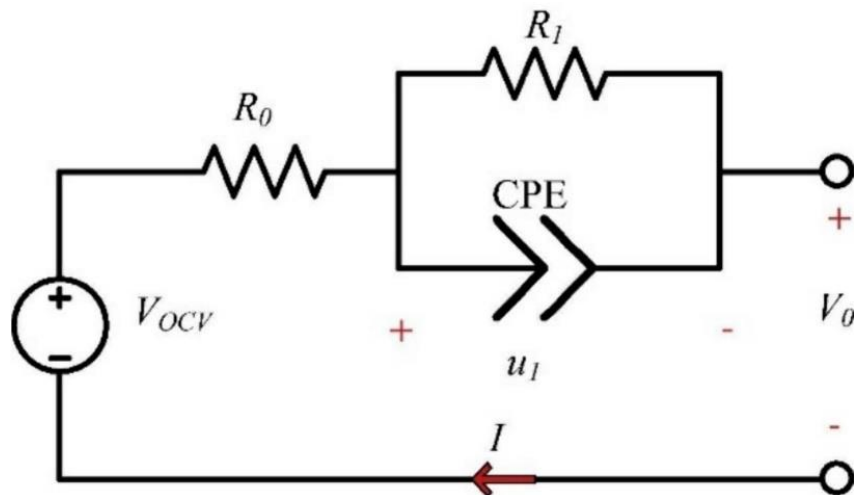
Figura 7 – Curva característica da espectroscopia de impedância eletroquímica de uma bateria de íons de lítio



Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2024).

De acordo com Zheng *et al.* (2024) para representar de forma mais precisa a dinâmica da bateria em média frequência, é introduzido um novo elemento no circuito, chamado elemento de fase constante (CPE). A Figura 8 representa o circuito equivalente do modelo de ordem fracionária.

Figura 8 – Circuito equivalente de ordem fracionária



Fonte: Zheng *et al.* (2024).

Os efeitos de difusão serão representados por um resistor R_1 e o CPE, que possui comportamentos resistivos e capacitivos. Seu modelo de impedância pode ser descrito como:

$$Z(S) = \frac{1}{C_1 S^\alpha} \quad (3.3)$$

- C_1 : Parâmetro semelhante a capacitância.
- α : Ordem de diferenciação que descreve a dispersão da capacitância ($\alpha \in \mathbb{R}^+$, $0 < \alpha < 1$).

Quando $\alpha = 1$, o CPE terá um comportamento equivalente a um capacitor ideal, e quando o $\alpha = 0$, o CPE terá um comportamento equivalente a um resistor ideal.

A função de transferência que descreve o comportamento bateria de íon-lítio da Figura 7 é descrita como:

$$\frac{V_{OCV}(S) - V_0(S)}{I(S)} = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 S^\alpha} \quad (3.4)$$

Pode-se representar o sistema dinâmico com a representação em espaço de estados definida como:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = -\frac{\eta}{3600 C_n} I(t) \\ D^\alpha u_1 = -\frac{u_1}{\tau} + \frac{R_1 I(t)}{\alpha} \end{cases} \quad (3.5)$$

- C_n : Capacidade nominal.
- z : Estado de carga (SOC).
- u_1 : Tensão da rede RC.
- $\tau = R_1 C_1$; Constante de tempo da rede.

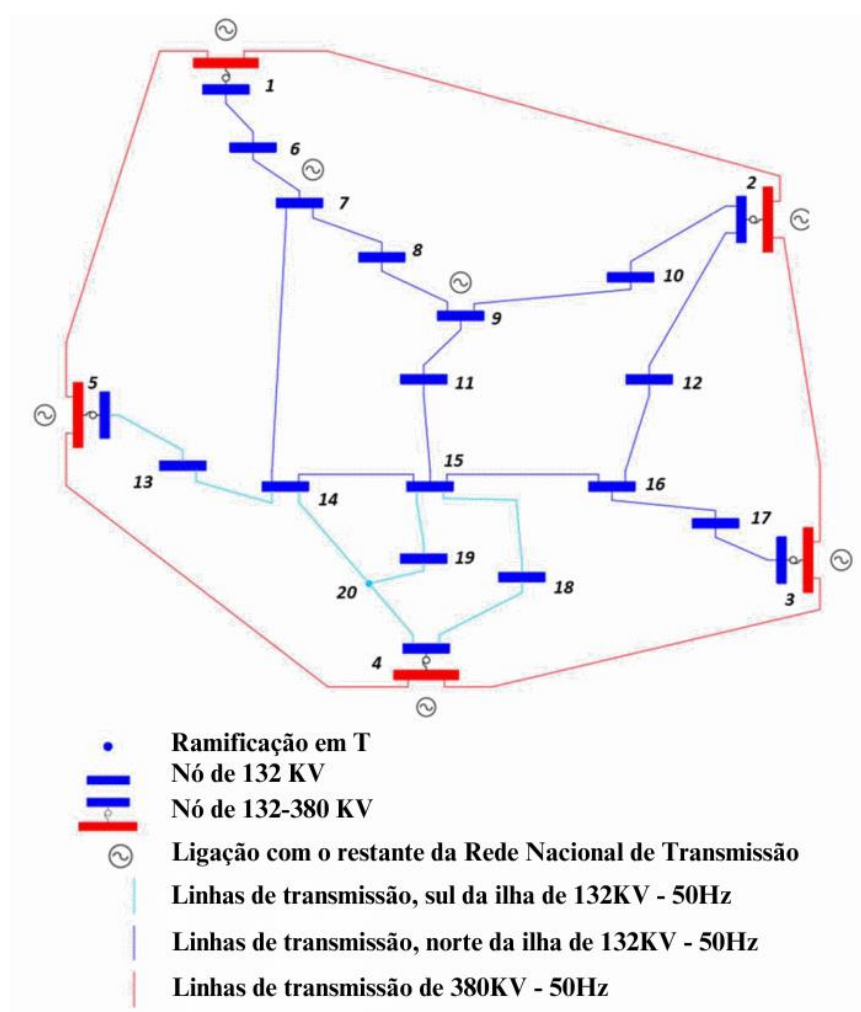
O comportamento do modelo de circuito equivalente de ordem fracionária, é definido matematicamente conforme (3.6).

$$V_0 = V_{OCV} - u_1 - I R_0 \quad (3.6)$$

3.8 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Carlini *et al.* (2024) realizaram um estudo sobre a implementação do sistema de armazenamento de energia com baterias, em uma parte da rede nacional de transmissão no nordeste da Itália, a fim de identificar o seu melhor posicionamento, para aumentar a integração de fontes de energia renováveis no sistema elétrico. A análise de rede foi realizada pelo software SpiRA, onde o valor máximo de carga das linhas é 100%, e as linhas com carga acima de 80% recebem uma atenção especial por estarem próximas ao seu limite. Através do estudo realizado, o nó 15 será representado como uma nova subestação, utilizada para a conexão das novas fontes de energia renováveis. O estudo foi dividido em três casos, que foram apresentados juntamente com seus resultados.

Figura 9 – Sistema elétrico de potência do Nordeste da Itália



Fonte: Adaptado de Carlini *et al.* (2024).

3.8.1 Metodologia do exemplo de estudo

O estudo de caso A, foca em analisar diferentes posicionamentos para a instalação de armazenamento de energia em baterias, identificando o comportamento do fluxo de potência, considerando conectar todas as solicitações de fontes de energia renovável existentes.

Para o estudo do caso B, será realizada uma comparação entre o sistema elétrico com o armazenamento de energia conectado ao nó mais eficiente obtido no estudo de caso A, e do sistema elétrico sem o armazenamento de energia conectado, além disso, será incluído uma fonte de energia renovável extra para avaliar suas consequências.

O estudo de caso C, visa identificar o máximo de geração proveniente de energias renováveis que o sistema pode suportar, a partir da identificação do ponto mais eficiente realizado pelos estudos dos casos A e B.

A Tabela 1, fornece as potências injetadas por fontes de geração renováveis em cada nó, para que seja possível analisar os efeitos no sistema elétrico conforme descritos nos casos A, B e C. A potência do armazenamento de energia com baterias utilizada é de 90 MW.

Tabela 1 – Dados utilizados nos estudos

Casos	Geração por fonte de energia renovável (MW)						BESS	
	Nó 11	Nó 14	Nó 15	Nó 16	Nó 18	Nó 19	Nó	P (MW)
A.1	-	25	150	-	25	25	15	-90
A.2	-	25	150	-	25	25	18	-90
A.3	-	25	150	-	25	25	19	-90
B.1	-	-	-	-	100	-	-	-
B.2	-	-	-	-	100	-	15	-90
C	75	25	150	75	25	25	15	-90

Fonte: Adaptado de Carlini *et al.* (2024).

3.8.2 Conclusões do exemplo de estudo

O Fit for 55, trata-se de uma meta para os países da União Europeia, em reduzir até 55% das emissões líquidas de gases de efeito estufa até 2030. Para atingir tal meta, é necessário integrar ao sistema, fontes de energia renovável, como a eólica e a fotovoltaica. Devido às suas características intermitentes, para realizar essa integração, seria necessário a construção de novas linhas de transmissão, além de ser uma obra complexa que pode ser limitada por algumas políticas públicas, necessita de um investimento muito elevado.

Somente será possível acomodar toda a geração renovável com a utilização do armazenamento de energia com baterias conectada a barra 15, nas demais barras, o limite de capacidade de algumas linhas é atingido. Além disso, será possível aumentar a geração renovável até 375 MW, sem extrapolar a capacidade das linhas.

Com a escolha correta da localização de instalação do armazenamento de energia em baterias, é possível atender as metas de quantidade de geração renovável estipuladas pelo Fit for 55, sem a necessidade da construção de novas linhas de transmissão.

4 MODELAGEM IMPLEMENTADA

Com o objetivo de demonstrar os benefícios da utilização de sistemas de armazenamento de energia na operação de um sistema elétrico de potência, implementou-se um modelo computacional para a resolução de um fluxo de potência ótimo, utilizando o software MATLAB 2019a, que se trata de um ambiente de programação voltado para aplicações numéricas, onde é possível utilizar ferramentas matemáticas, como programação linear, a fim de otimizar problemas propostos de acordo com as suas restrições. As simulações realizadas pelo MATLAB 2019a, foram executadas por um sistema operacional Windows 10 Home de 64 bits, em um computador com processador Intel® Core™ i5-7200U CPU @ 2.50GHz 2.71 GHz e com 8 GB de memória RAM instalada.

4.1 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Para determinar a operação ótima do sistema, faz-se necessário a utilização de técnicas de otimização, permitindo garantir que os limites operacionais físicos do sistema não sejam violados, e que seja possível determinar a operação com o menor custo possível.

4.1.1 Programação Linear

A área de pesquisas operacionais consiste na análise de dados para otimizar processos e decisões. A programação linear é uma técnica matemática desenvolvida nessa área, que tem como objetivo maximizar ou minimizar uma função, por exemplo, determinar o lucro máximo ou mínimo de uma operação, respeitando um conjunto de restrições lineares preestabelecidas.

4.1.2 Formulação matemática

A modelagem matemática para o problema de programação linear é definida conforme (4.1).

$$\begin{cases} \text{Maximizar ou Minimizar } Z = c^t x \\ Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

- Z: Função linear, função objetivo.
- c^t : Coeficientes da função objetivo.
- x: Variáveis de decisão.
- A: Coeficientes das restrições.
- b: Termos independentes das restrições.

4.1.3 Formulação computacional

O MATLAB possui uma função que efetua os cálculos necessários para resolver um sistema de programação linear envolvendo otimização, denominada `linprog`, que pode ser chamada utilizando o ambiente de trabalho do MATLAB conforme (4.2).

$$[XSOL, FVAL, EXITFLAG, OUTPUT, LAMBDA] = \text{linprog}(F, A, b, Aeq, beq, Lb, ub) \quad (4.2)$$

As entradas da função `linprog` são definidas como:

- F: Vetor de custos.
- A: Matriz dos coeficientes lineares de inequações.
- b: Vetor independente de inequações.
- Aeq: Matriz dos coeficientes lineares de equações.
- beq: Vetor independente de equações.
- Lb: Vetor de limites inferiores.
- ub: Vetor de limites superiores.

As saídas da função `linprog` são definidas como:

- XSOL: Vetor de resultados.
- FVAL: Valor da função objetivo.
- EXITFLAG: Condição de finalização do algoritmo.
- OUTPUT: estrutura com informações de saída.
- LAMBDA: Vetor de multiplicadores de Lagrange.

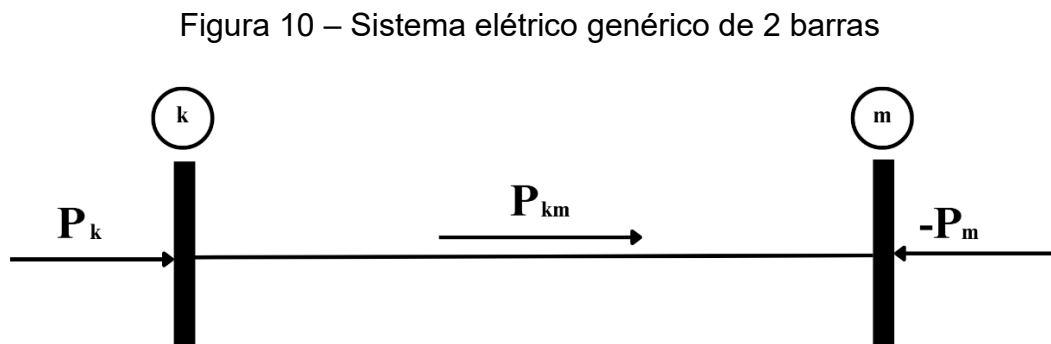
4.2 ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Para observar o comportamento da integração de um sistema de armazenamento de energia em um sistema elétrico de potência, faz-se necessário a utilização de estudos de fluxo de potência, uma das ferramentas mais utilizadas, que permite identificar o comportamento da rede elétrica em regime permanente. Como o foco é analisar a injeção e absorção de potência ativa de uma bateria em um sistema elétrico, utilizou-se o modelo de fluxo de potência linearizado, que também é conhecido como fluxo de potência de corrente contínua, ou fluxo de potência CC.

4.2.1 Fluxo de potência linearizado

Segundo Monticelli (1983), para a formulação do fluxo de potência linearizado, é realizada algumas aproximações, que permitem definir o fluxo de potência em uma linha de transmissão, sendo aproximadamente proporcional a abertura angular da linha, e se desloca no sentido da barra com maior ângulo para a barra com menor ângulo. O fluxo de potência CC, não substitui por completo os métodos de análise de redes elétricas não lineares, mas possibilita realizar uma grande quantidade de estudos preliminares de operação e expansão do sistema, com baixo custo computacional.

A Figura 10, representa um sistema elétrico de potência genérico com 2 barras, barra k e a barra m, interligadas por uma linhas de transmissão, denominada linha k-m. Existe uma injeção de potência ativa positiva na barra k, representando um gerador, e uma injeção negativa de potência ativa na barra m, representando uma carga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para a representação do fluxo de potência linearizado, são feitas as seguintes aproximações: as perdas nas linhas de transmissão são nulas, as tensões nas barras são aproximadamente iguais a 1,0 pu; e o seno da abertura angular das barras é aproximadamente igual a ângulo das barras, todas definidas conforme (4.3).

$$\begin{cases} V_k \cong V_m \cong 1,0 \text{ pu} \\ \text{sen}(\theta_{km}) \cong \theta_{km} \\ b_{km} \cong \frac{1}{x_{km}} \end{cases} \quad (4.3)$$

O fluxo de potência que flui da barra k para a barra m é representado por P_{km} , e pode ser calculado conforme (4.4).

$$P_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (4.4)$$

De acordo com a primeira lei de Kirchhoff, como as perdas foram desprezadas, pode-se afirmar que, o somatório de todas as potências que chegam na barra é igual ao somatório de todas as potências que saem da barra, sendo assim é definida a injeção líquida das potências ativas na barra k e na barra m, conforme (4.5).

$$\begin{cases} P_k = P_{km} \\ P_m = -P_{km} \end{cases} \quad (4.5)$$

4.2.2 Fluxo de potência ótimo

O cálculo do fluxo de potência CC, permite determinar o estado operativo da rede elétrica, dadas algumas informações, como as potências injetadas nas barras, a carga e a reatância da linha. O sistema elétrico possui limites operacionais, como a capacidade de uma linha de transmissão para transmitir potência ativa. Sendo assim, surge a ferramenta de fluxo de potência ótimo, que integra a análise de fluxo de potência, com métodos de otimização, permitindo estabelecer limites operacionais.

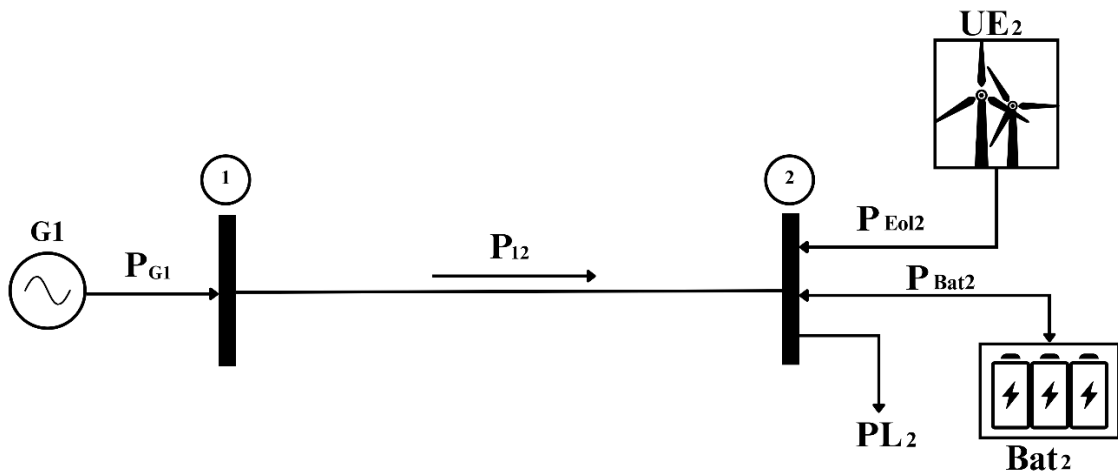
O fluxo de potência ótimo, possibilita determinar estado operativo do sistema, respeitando seus limites físicos, a ponto de maximizar ou minimizar um objetivo, que será encontrar a condição com o menor custo operacional, sujeito a respeitar os limites de capacidade das linhas de transmissão, variando a injeção de potência dos geradores despacháveis de acordo com o seu custo, proporcionando se possível, o total atendimento à carga.

4.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO

Para determinar o menor custo operativo do sistema elétrico, respeitando todos os limites físicos, faz-se necessário a realização da modelagem computacional dos equipamentos envolvidos na análise, para serem integrados nos modelos de fluxo de potência ótimo, utilizando a ferramenta linprog do MATLAB.

Considere o sistema elétrico genérico da Figura 11, para a realização da modelagem do fluxo de potência ótimo.

Figura 11 – Sistema elétrico genérico para modelagem do fluxo de potência ótimo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- $G1$: Gerador despachável conectado à barra 1.
- P_{G1} : Potência ativa injetada pelo gerador despachável na barra 1.
- P_{12} : Fluxo de potência na linha 12.
- $UE2$: Usina eólica conectada à barra 2.
- P_{Eol2} : Potência ativa injetada pela usina eólica na barra 2.
- $Bat2$: Sistema de baterias conectado à barra 2.
- P_{Bat2} : Potência ativa injetada ou absorvida pelo sistema de baterias na barra 2.
- $PL2$: Carga da barra 2.

4.3.1 Usina de geração eólica

A usina eólica, é uma fonte de geração intermitente, ou seja, não é possível prever ou controlar sua geração de energia elétrica, pois depende de fatores

climáticos, para que haja vento o suficiente, tornando possível movimentar as pás do aerogerador, gerando energia elétrica de acordo com a velocidade de rotação das pás. Portanto P_{Eol2} não será uma variável controlada, mas sim um valor de potência injetada por hora.

Para expressar de maneira real o comportamento de injeção de potência pela usina eólica, considerou-se um perfil de geração médio horário, relativo ao mês de dezembro de 2024, disponível no site do ONS, do Complexo Eólico Babilônia Sul, localizado na Bahia, que possui 360 MW de capacidade instalada. Sendo assim, será possível determinar uma curva de geração eólica normalizada, utilizando o fator de capacidade horário definido em (4.6).

$$FC(t) = \frac{P_{ge}(t)}{\text{Capacidade instalada}} \quad (4.6)$$

- $FC(t)$: Fator de capacidade na hora t .
- $P_{ge}(t)$: Potência gerada na hora t (MW).

Tabela 2 – Curva de geração eólica normalizada utilizando o fator de capacidade

(continua)

Hora	P_{ge} (MW)	FC
00:00	298,4992	0,8292
01:00	285,2908	0,7925
02:00	270,2711	0,7508
03:00	264,1283	0,7337
04:00	252,8423	0,7023
05:00	232,2448	0,6451
06:00	218,3960	0,6067
07:00	196,3482	0,5454
08:00	166,4613	0,4624
09:00	139,4455	0,3873
10:00	111,3086	0,3092
11:00	84,2325	0,2340
12:00	63,6949	0,1769
13:00	58,0837	0,1613

(conclusão)

Hora	P_{ge} (MW)	FC
14:00	61,1696	0,1699
15:00	67,7404	0,1882
16:00	84,3084	0,2342
17:00	109,7166	0,3048
18:00	159,0369	0,4418
19:00	207,5126	0,5764
20:00	225,6273	0,6267
21:00	234,0968	0,6503
22:00	257,3271	0,7148
23:00	290,8672	0,8080

Fonte: ONS (2025).

Devido às características intermitentes da geração eólica, em casos de violação dos limites operacionais do sistema, como a capacidade da linha de transmissão, faz-se necessário a realização do corte de geração eólica ou limitação da geração da usina, conhecido também como curtailment, diminuindo o faturamento das empresas responsáveis por gerenciar o parque eólico. Esse custo será associado à variável de corte de geração eólica (PC_{Eol}) na formulação do fluxo de potência ótimo.

4.3.2 Sistema de baterias

O sistema de baterias analisado, consiste na injeção ou absorção de potência ativa, portanto adotou-se um valor positivo para P_{Bat} , representando o descarregamento da bateria, ela estará injetando potência ativa na rede; P_{Bat} com valor negativo, representará o carregamento da bateria, ela estará absorvendo potência ativa da rede.

A quantidade total de energia que pode ser armazenada por uma bateria é definida conforme (4.7).

$$\text{Cap} = P_{\text{Batmax}} \times t_{\text{Descarga}} \quad (4.7)$$

- Cap: Capacidade da bateria (MWh).
- P_{Batmax} : Potência máxima da bateria (MW).
- t_{Descarga} : Tempo para a descarga completa da bateria (h).

A P_{Batmax} permite estabelecer o limite de potência ativa que o sistema de baterias consegue absorver ou injetar no sistema em um período de uma hora.

A operação da bateria, segue restrições impostas pelo seu estado de carga (SOC), onde será definido um SOC mínimo (SOCmin), e um SOC máximo (SOCmax), para simular os efeitos físicos relativos ao limite de carregamento e descarregamento das baterias. Além disso, considerou-se uma eficiência de carregamento e descarregamento de 100%.

Considerou-se que, ao iniciar a análise do sistema, no início da primeira hora a bateria estará com 50% de carga, conforme demonstrado em (4.8). Além disso, o SOC será representado em termos de (MWh) para que seja possível atualizar o estado de carga de acordo com a potência injetada ou absorvida em um intervalo de tempo.

$$\text{SOCini} = \frac{50}{100} \times \text{Cap} \quad (4.8)$$

A atualização do SOC, depende da potência injetada no intervalo de uma hora, pelo sistema de baterias conforme (4.9).

$$\text{SOC}_2(t) = \text{SOC}_2(t-1) - P_{\text{Bat2}}(t) \quad (4.9)$$

- $\text{SOC}_2(t)$: Estado de carga da bateria conectada à barra 2 ao final da hora t (MWh).
- $\text{SOC}_2(t-1)$: Estado de carga da bateria conectada à barra 2 no início da hora t (MWh).
- $P_{\text{Bat2}}(t)$: Potência total injetada no intervalo de uma hora, para a hora t (MWh).

Para uma operação de 24 horas, com a primeira hora sendo 00:00 horas, e a última hora sendo 23:00 horas, pode-se modelar a atualização do SOC conforme (4.10).

$$\begin{cases} \text{SOC}_2(0) + P_{\text{Bat}2}(0) = \text{SOC}_{\text{ini}} \\ \text{SOC}_2(1) - \text{SOC}_2(0) + P_{\text{Bat}2}(1) = 0 \\ \text{SOC}_2(2) - \text{SOC}_2(1) + P_{\text{Bat}2}(2) = 0 \\ \vdots \\ \text{SOC}_2(23) - \text{SOC}_2(22) + P_{\text{Bat}2}(23) = 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

4.3.3 Balanço de potência do sistema

O balanço de potência das barras 1 e 2, que representam o comportamento do sistema para o intervalo de uma hora, pode ser definido respectivamente conforme (4.11).

$$\begin{cases} P_{G1} = P_{12} \\ P_{D2} = P_{L2} - P_{12} - P_{\text{Eol}2} + P_{\text{CEol}2} - P_{\text{Bat}2} \end{cases} \quad (4.11)$$

- P_{D2} : Corte de carga na barra 2 (MW).

De posse das formulações apresentadas, é possível definir em (4.12), a equação geral do balanço de potência por barra, que representa o comportamento do sistema elétrico, levando em consideração todas as variáveis trabalhadas. Onde o subíndice k, representa o número da barra analisada, e o subíndice m, representa todas as barras que possuem conectividade elétrica com a barra k.

$$P_{Gk} + P_{Dk} - \sum P_{km} + P_{\text{Bat}k} - P_{\text{CEolk}} = P_{Lk} - P_{\text{Eolk}} \quad (4.12)$$

4.3.4 Função objetivo e variáveis do problema

A função objetivo, não é um parâmetro de entrada no linprog, porém ela é construída através das restrições e do vetor de custos. Neste estudo, a função objetivo é minimizar o custo de operação do sistema elétrico, respeitando todas as suas limitações físicas preestabelecidas.

As variáveis do problema, vetor \mathbf{x} , podem ser definidas como: os valores que serão variados pelo programa em uma delimitada faixa, para atingir o objetivo de mínimo custo de operação.

Cada barra do sistema possui como variáveis, P_{Gk} , P_{Dk} e o θ_k . Assim como cada parque de geração eólica possui uma única variável PC_{Eolk} . E cada sistema de baterias possui duas variáveis P_{Batk} e SOC_k .

Logo o vetor \mathbf{x} pode ser definido de acordo com (4.14).

$$\mathbf{X}' = [P_{Gk} \quad P_{Dk} \quad P_{Batk} \quad SOC_k \quad PC_{Eolk} \quad \theta_k \quad \theta_m] \quad (4.14)$$

4.3.4 Restrições de igualdade

O sistema de equações lineares que representam as restrições de igualdade é definido conforme (4.15).

$$\mathbf{A}_{eq}\mathbf{X} = \mathbf{b}_{eq} \quad (4.15)$$

- \mathbf{A}_{eq} possui dimensão $(\Delta tm \times \Delta tn)$.
- \mathbf{X} possui dimensão $(\Delta tn \times 1)$.
- \mathbf{b}_{eq} possui dimensão $(\Delta tm \times 1)$.
- Δtm : Número de equações de igualdade do sistema, vezes o intervalo de tempo considerado na análise.
- Δtn : Número de variáveis do sistema, vezes o intervalo de tempo considerado na análise.

As equações de igualdade são construídas pelas equações de balanço de potência definida em (4.12), onde cada barra do sistema contribui com uma equação de igualdade. Além disso, cada bateria contribui com uma equação de igualdade referente a atualização do SOC para aquela hora, conforme (4.9).

A matriz \mathbf{A}_{eq} será preenchida com as constantes dos termos dependentes das equações de igualdade. Enquanto que o vetor \mathbf{b}_{eq} seja preenchido com os termos independentes das equações de igualdade. Respeitando a ordem das variáveis preestabelecidas em (4.14), relativas a cada hora de operação.

4.3.5 Restrições de desigualdade

O sistema de inequações lineares que representam as restrições de desigualdade é definido conforme (4.16).

$$\mathbf{AX} \leq \mathbf{b} \quad (4.16)$$

- **A** possui dimensão ($\Delta t_j \times \Delta t_n$).
- **X** possui dimensão ($\Delta t_n \times 1$).
- **b** possui dimensão ($\Delta t_j \times 1$).
- Δt_j : Número de inequações de desigualdade do sistema, vezes o intervalo de tempo considerado na análise.
- Δt_n : Número de variáveis do sistema, vezes o intervalo de tempo considerado na análise.

As restrições de desigualdade são definidas pela capacidade das linhas de transmissão. Como o fluxo de potência em uma linha de transmissão foi definido em (4.4), pode-se determinar o fluxo máximo de uma linha de transmissão em (4.17).

$$\frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \leq P_{km} \max \quad (4.17)$$

- $P_{km} \max$: Potência máxima que pode ser transmitida na linha_{km} (MW).

Cada linha de transmissão, contribui com duas equações de desigualdade, O fluxo de k para m conhecido como P_{km} , e o fluxo de m para k, representado por $-P_{km}$. A direção do fluxo depende do estado do sistema, podendo estar em uma das duas direções.

A matriz **A** será preenchida com as constantes dos termos dependentes das inequações de desigualdade. Enquanto o vetor **b** será preenchido com os termos independentes das inequações de desigualdade. Respeitando também a ordem das variáveis relativas a cada hora de operação.

4.3.6 Restrições de canalização

Enquanto as restrições de desigualdade delimitam as variáveis até um limite superior, as restrições de canalização, delimitam as variáveis em uma faixa de valores, com limites superiores representados pelo vetor **ub**, e limites inferiores representados pelo vetor **Lb**, conforme (4.18), ambos os vetores possuem dimensões ($n \times 1$).

$$\mathbf{Lb} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{ub} \quad (4.18)$$

Os limites inferiores e superiores das variáveis são demonstrados em (4.19).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Gk} \min \leq P_{Gk} \leq P_{Gk} \max \\ P_{Dk} \min \leq P_{Dk} \leq P_{Dk} \max \\ -P_{Batk} \max \leq P_{Batk} \leq P_{Batk} \max \\ SOC_k \min \leq SOC_k \leq SOC_k \max \\ PC_{Eolk} \min \leq PC_{Eolk} \leq PC_{Eolk} \max \\ \theta_k \min \leq \theta_k \leq \theta_k \max \\ \theta_m \min \leq \theta_m \leq \theta_m \max \end{array} \right. \quad (4.19)$$

Os limites inferiores e superiores das variáveis são dados, fornecidos pelas características do sistema, excluindo as variáveis P_{Dk} , PC_{Eolk} e o θ . Os limites dessas variáveis podem ser interpretados como:

- $P_{Dk} \min$: Corte de carga mínimo, é interessante que seja nulo, representando que toda a carga foi atendida.
- $P_{Dk} \max$: Corte de carga máximo, será igual ao PL_k .
- $PC_{Eolk} \min$: Corte de geração eólica mínimo, é interessante que seja nulo, representando que toda a geração eólica foi utilizada.
- $PC_{Eolk} \max$: Corte de geração eólica máximo, será igual ao P_{Eolk} daquela hora.
- $\theta \min$: O ângulo mínimo de todas as barras do sistema é 0 rad.
- $\theta \max$: O ângulo máximo de todas as barras do sistema é π rad, mas para a barra de referência, ele será considerado 0 rad.

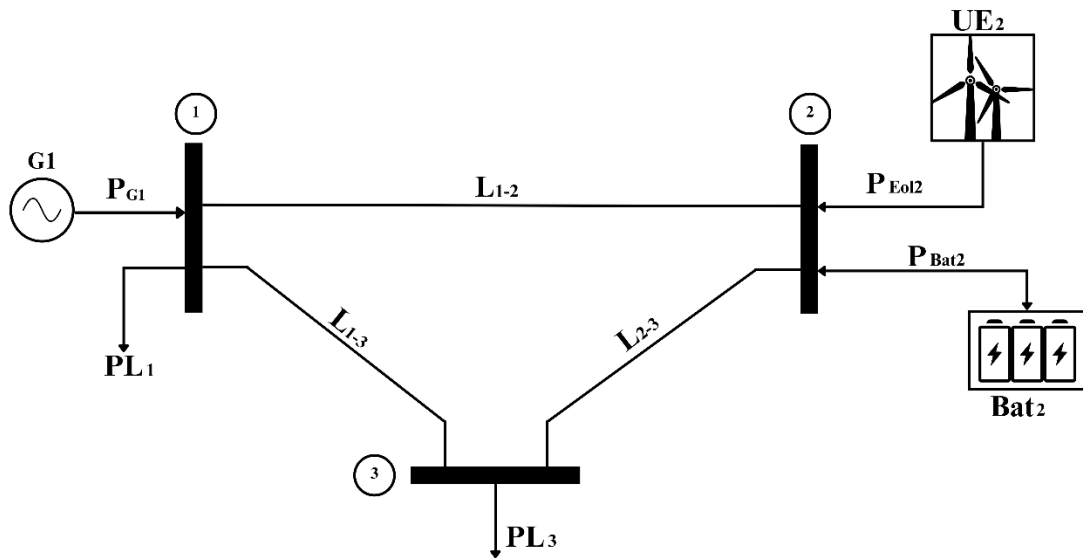
4.3.7 Vetor de custos

O vetor de custos \mathbf{F} , representa o custo associado a cada variável do sistema, por exemplo o custo de geração, custo de corte de carga, custo associado ao corte de geração eólica, e possui dimensão $(n \times 1)$. As posições associadas às variáveis que não possuem custo, são incrementadas com valor nulo.

4.4 SISTEMA ELÉTRICO DE PEQUENO PORTE UTILIZADO PARA SIMULAÇÕES

A Figura 12, representa um sistema elétrico de pequeno porte, que será utilizado para demonstrar os benefícios da implementação de um sistema de armazenamento de energia com baterias.

Figura 12 – Sistema elétrico de pequeno porte



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- L_{1-2} : Linha de transmissão da barra 1 para a barra 2.
- L_{1-3} : Linha de transmissão da barra 1 para a barra 3.
- L_{2-3} : Linha de transmissão da barra 2 para a barra 3.

A potência base adotada para o sistema é de 10 MVA. A Tabela 3 apresenta os dados das barras do sistema.

Tabela 3 – Dados das barras do sistema de pequeno porte

Número da barra	Tipo	Carga (MW)	Custo do corte de carga (R\$/MW)
1	Referência	20	0
2	Carga	0	1000,00
3	Carga	20	1000,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 4 apresenta os dados das linhas de transmissão.

Tabela 4 – Dados das linhas do sistema de pequeno porte

Barra de	Barra para	X(pu)	Potência máxima (MW)
1	2	0,04	20
1	3	0,04	20
2	3	0,04	20

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 5 apresenta os dados das barras geradoras.

Tabela 5 – Dados das barras geradoras do sistema de pequeno porte

Número da barra	Potência mínima (MW)	Potência máxima (MW)	Custo de geração (R\$/MW)
1	0	40	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 6 apresenta os dados da usina eólica, que possui uma curva de carga determinada pelo fator de capacidade obtido na Tabela 2.

Tabela 6 – Dados da usina eólica do sistema de pequeno porte

Número da barra	Potência mínima (MW)	Potência máxima (MW)	Custo de geração (R\$/MW)	Custo de corte de geração eólica (R\$/MW)
2	0	30	0	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A curva da potência gerada ao longo de 24 horas, pela usina eólica conectada à barra 2 do sistema de pequeno porte, pode ser determinada conforme (4.20), e é apresentada pela Tabela 7.

$$P_{Eol2}(t) = FC(t) \times \text{Potência máxima da usina} \quad (4.20)$$

- $P_{Eol2}(t)$: Potência gerada pela usina eólica na hora t .

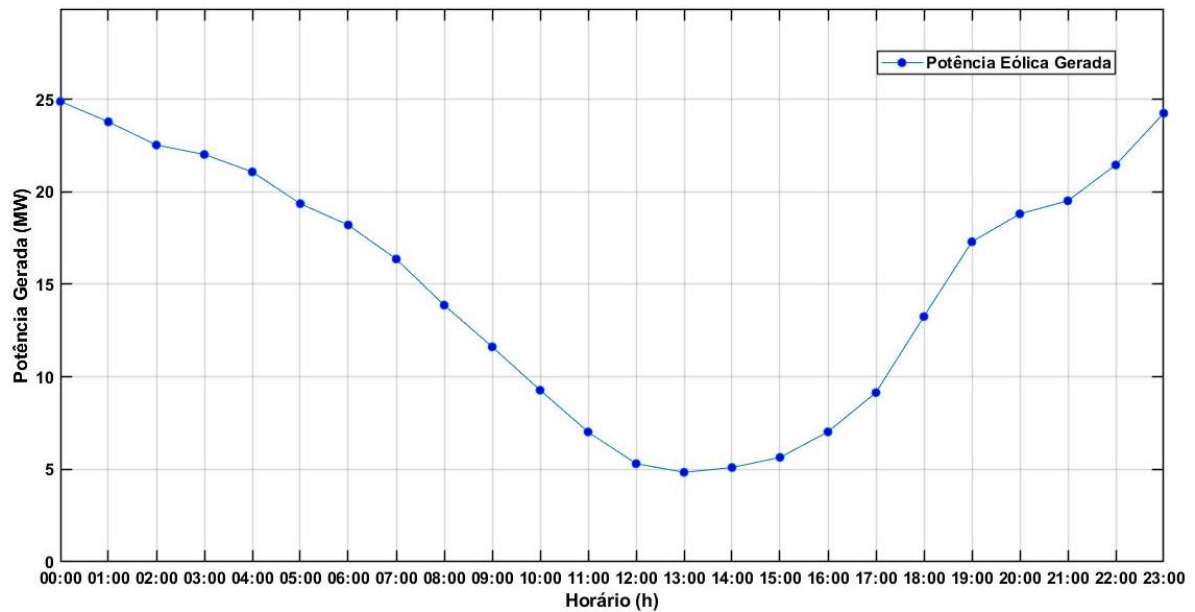
Tabela 7 – Curva de geração da usina eólica ao longo de 24 horas

Hora	FC	P_{Eol2} (MW)	P_{Eol2} (pu)
00:00	0,8292	24,876	2,4876
01:00	0,7925	23,775	2,3775
02:00	0,7508	22,524	2,2524
03:00	0,7337	22,011	2,2011
04:00	0,7023	21,069	2,1069
05:00	0,6451	19,353	1,9353
06:00	0,6067	18,201	1,8201
07:00	0,5454	16,362	1,6362
08:00	0,4624	13,872	1,3872
09:00	0,3873	11,619	1,1619
10:00	0,3092	9,276	0,9276
11:00	0,2340	7,020	0,7020
12:00	0,1769	5,307	0,5307
13:00	0,1613	4,839	0,4839
14:00	0,1699	5,097	0,5097
15:00	0,1882	5,646	0,5646
16:00	0,2342	7,026	0,7026
17:00	0,3048	9,144	0,9144
18:00	0,4418	13,254	1,3254
19:00	0,5764	17,292	1,7292
20:00	0,6267	18,801	1,8801
21:00	0,6503	19,509	1,9509
22:00	0,7148	21,444	2,1444
23:00	0,8080	24,240	2,4240

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 13 demonstra o comportamento da geração eólica ao longo de 24 horas.

Figura 13 – Gráfico da geração eólica ao longo de 24 horas



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 8, apresenta os dados do sistema de bateria utilizado no sistema elétrico de pequeno porte.

Tabela 8 – Dados do sistema de baterias do sistema elétrico de pequeno porte

Número da barra	Capacidade (MWh)	Tempo de descarga (h)	SOC inicial (%)	SOC mínimo (%)	SOC máximo (%)
2	150	5	50	40	90

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.5 ESTUDO PROPOSTO PARA O SISTEMA ELÉTRICO DE PEQUENO PORTE

Para demonstrar os benefícios da implementação do sistema de armazenamento de energia com baterias em um sistema elétrico de pequeno porte, serão analisados 3 cenários distintos.

O caso 1, consiste em demonstrar a aplicabilidade do sistema baterias na redução do custo da operação do sistema elétrico de pequeno porte.

O caso 2, consiste em demonstrar a aplicabilidade do sistema de baterias na redução do corte de carga em sistemas sobrecarregados, onde os limites operativos estão sendo violados.

O caso 3, consiste em demonstrar a aplicabilidade do sistema de baterias na redução do corte geração eólica, devido ao congestionamento do sistema de transmissão, provocado pela alta geração de energia eólica e a violação do limite de capacidade de escoamento da energia pelas linhas de transmissão.

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Executou-se um fluxo de potência ótimo para o sistema elétrico de pequeno porte representado pela Figura 12, conforme descrito na seção 4.4 obtendo os resultados da operação.

5.1 REDUÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL

A Tabela 9, apresenta os resultados da operação do sistema elétrico de pequeno porte sem a utilização do sistema de armazenamento com baterias.

Tabela 9 - Operação do sistema elétrico de pequeno porte sem baterias
(continua)

Hora	P _{G1} (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
00:00	15,124	-9,917	5,0413	14,9587
01:00	16,225	-9,183	5,4083	14,5917
02:00	17,476	-8,349	5,8253	14,1747
03:00	17,989	-8,007	5,9963	14,0037
04:00	18,931	-7,379	6,3103	13,6897
05:00	20,647	-6,235	6,8823	13,1177
06:00	21,799	-5,467	7,2663	12,7337
07:00	23,638	-4,241	7,8793	12,1207
08:00	26,128	-2,581	8,7093	11,2907
09:00	28,381	-1,079	9,4603	10,5397
10:00	30,724	0,4827	10,2413	9,7587
11:00	32,98	1,9867	10,9933	9,0067
12:00	34,693	3,1287	11,5643	8,4357
13:00	35,161	3,4407	11,7203	8,2797
14:00	34,903	3,2687	11,6343	8,3657
15:00	34,354	2,9027	11,4513	8,5487
16:00	32,974	1,9827	10,9913	9,0087
17:00	15,124	-9,917	5,0413	14,9587
18:00	16,225	-9,183	5,4083	14,5917

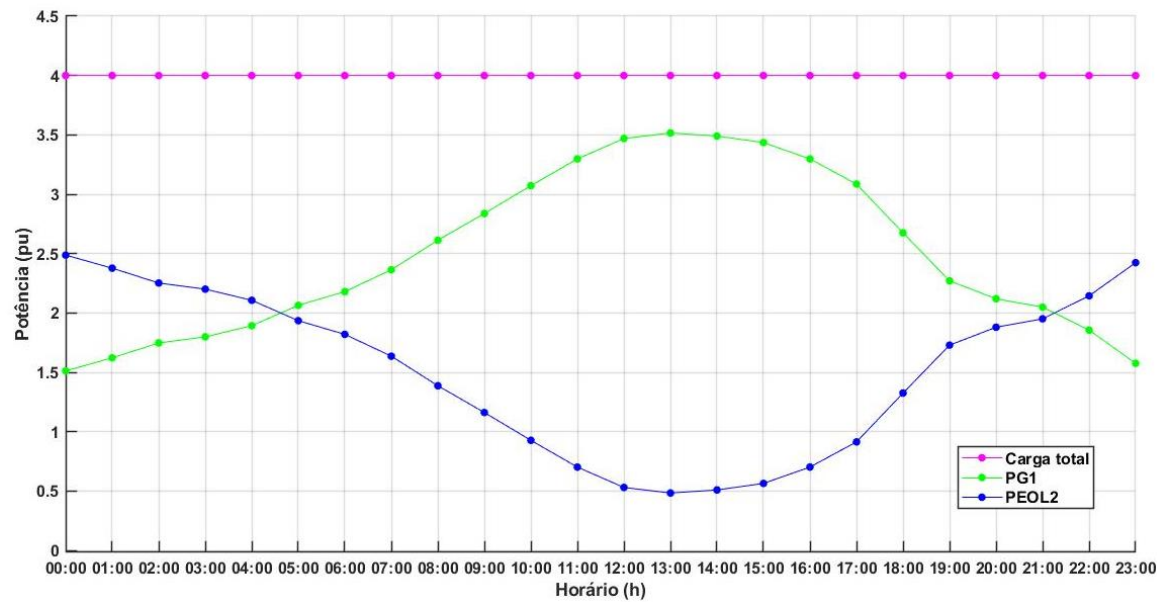
(conclusão)

Hora	P _{G1} (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
19:00	30,856	0,5707	10,2853	9,7147
20:00	26,746	-2,169	8,9153	11,0847
21:00	22,708	-4,861	7,5693	12,4307
22:00	21,199	-5,867	7,0663	12,9337
23:00	20,491	-6,339	6,8303	13,1697
Potência total injetada pelo gerador despachável (MW)				598,443
Custo total de operação (R\$)				5984,43

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Todos os limites operacionais foram atendidos, não houve corte de carga e de geração eólica. A Figura 14, demonstra o comportamento do sistema ao longo das 24 horas.

Figura 14 – Gráfico da operação do sistema elétrico de pequeno porte sem baterias



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 10 apresenta os resultados da operação do sistema elétrico de pequeno porte com a utilização do sistema de armazenamento de baterias.

Tabela 10 - Operação do sistema elétrico de pequeno porte com baterias

Hora	P _{G1} (MW)	P _{Bat2} (MW)	SOC ₂ (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
00:00	40,0	-24,876	99,876	6,6667	13,3333	6,6667
01:00	40,0	-23,775	123,651	6,6667	13,3333	6,6667
02:00	28,825	-11,349	135,0	-0,7833	9,6083	10,3917
03:00	17,989	0,0	135,0	-8,0073	5,9963	14,0037
04:00	18,931	0,0	135,0	-7,3793	6,3103	13,6897
05:00	20,647	0,0	135,0	-6,2353	6,8823	13,1177
06:00	21,799	0,0	135,0	-5,4673	7,2663	12,7337
07:00	20,445	3,193	131,807	-6,37	6,815	13,185
08:00	0,0	26,128	105,679	-20,0	0,0	20,0
09:00	0,0	28,381	77,298	-20,0	0,0	20,0
10:00	40,0	-9,276	86,574	6,6667	13,3333	6,6667
11:00	40,0	-7,02	93,594	6,6667	13,3333	6,6667
12:00	40,0	-5,307	98,901	6,6667	13,3333	6,6667
13:00	40,0	-4,839	103,74	6,6667	13,3333	6,6667
14:00	40,0	-24,876	99,876	6,6667	13,3333	6,6667
15:00	40,0	-23,775	123,651	6,6667	13,3333	6,6667
16:00	40,0	-5,097	108,837	6,6667	13,3333	6,6667
17:00	40,0	-5,646	114,483	6,6667	13,3333	6,6667
18:00	0,0	-7,026	121,509	6,6667	13,3333	6,6667
19:00	0,0	-9,144	130,653	6,6667	13,3333	6,6667
20:00	0,0	26,746	103,907	-20,0	0,0	20,0
21:00	20,491	22,708	81,199	-20,0	0,0	20,0
22:00	18,556	21,199	60,0	-20,0	0,0	20,0
23:00	15,76	0,0	60,0	-6,3393	6,8303	13,1697
Potência total injetada pelo gerador despachável (MW)						583,443
Custo total de operação (R\$)						5834,43

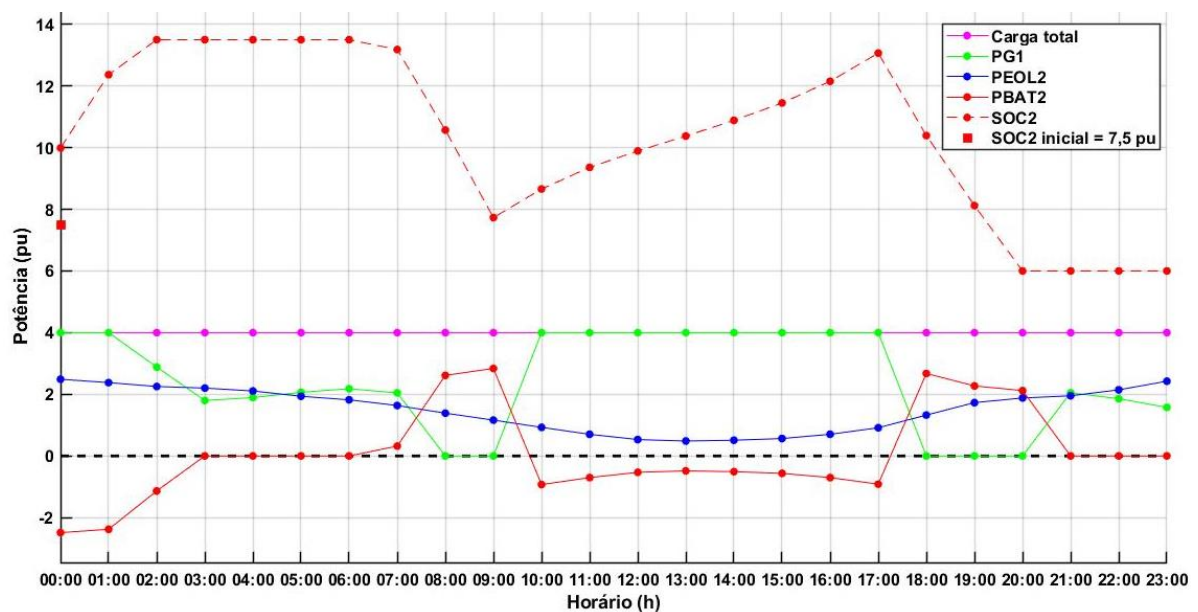
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com a utilização do sistema de baterias, houve uma redução do custo operacional de R\$150,00 equivalente a 2,5%. Essa redução ocorreu pelo fato de existir uma potência residual na bateria, superior ao seu limite mínimo, antes da

primeira hora de operação, equivalente a 15 MW. Mas a economia operacional pode atingir valores mais atrativos, ao considerar a variação do custo de geração ligado às diferentes fontes de geração ao longo do dia. Assim é possível controlar a bateria para armazenar mais energia nos horários de menor custo de geração, e fornecer energia nos horários de maior custo de geração.

A Figura 15, demonstra o comportamento do sistema ao longo das 24 horas com a utilização do sistema de baterias.

Figura 15 – Gráfico da operação do sistema elétrico de pequeno porte com baterias



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2 REDUÇÃO DO CORTE DE CARGA

Para demonstrar o efeito do corte de carga devido às limitações físicas do sistema, a capacidade das linhas de transmissão, foram reduzidas de 20 MW para 14 MW. Os resultados da operação do sistema elétrico de pequeno porte, com as novas capacidades das linhas de transmissão, sem o sistema de baterias são demonstrados na Tabela 11.

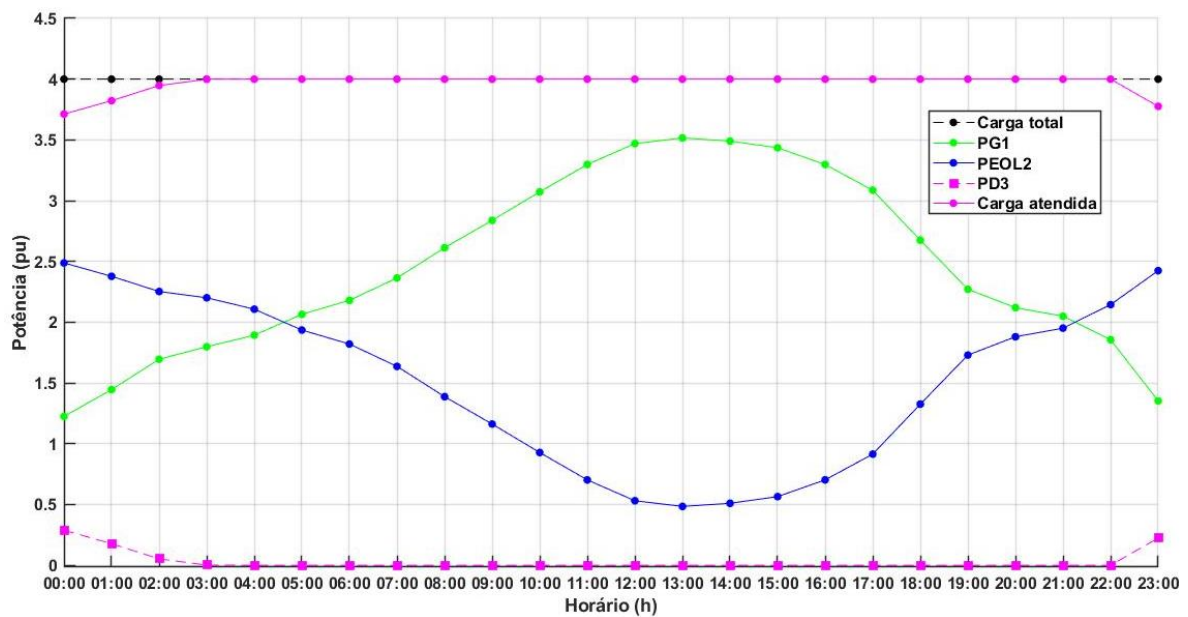
Tabela 11 - Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW
por linha sem baterias

Hora	P _{G1} (MW)	P _{D1} (MW)	P _{D3} (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
00:00	12,248	0,0	2,876	-10,876	3,124	14,0
01:00	14,45	0,0	1,775	-9,775	4,225	14,0
02:00	16,952	0,0	0,524	-8,524	5,476	14,0
03:00	17,978	0,0	0,011	-8,011	5,989	14,0
04:00	18,931	0,0	0,0	-7,3793	6,3103	13,6897
05:00	20,647	0,0	0,0	-6,2353	6,8823	13,1177
06:00	21,799	0,0	0,0	-5,4673	7,2663	12,7337
07:00	23,638	0,0	0,0	-4,2413	7,8793	12,1207
08:00	26,128	0,0	0,0	-2,5813	8,7093	11,2907
09:00	28,381	0,0	0,0	-1,0793	9,4603	10,5397
10:00	30,724	0,0	0,0	0,4827	10,2413	9,7587
11:00	32,98	0,0	0,0	1,9867	10,9933	9,0067
12:00	34,693	0,0	0,0	3,1287	11,5643	8,4357
13:00	35,161	0,0	0,0	3,4407	11,7203	8,2797
14:00	34,903	0,0	0,0	3,2687	11,6343	8,3657
15:00	34,354	0,0	0,0	2,9027	11,4513	8,5487
16:00	32,974	0,0	0,0	1,9827	10,9913	9,0087
17:00	30,856	0,0	0,0	0,5707	10,2853	9,7147
18:00	26,746	0,0	0,0	-2,1693	8,9153	11,0847
19:00	22,708	0,0	0,0	-4,8613	7,5693	12,4307
20:00	21,199	0,0	0,0	-5,8673	7,0663	12,9337
21:00	20,491	0,0	0,0	-6,3393	6,8303	13,1697
22:00	18,556	0,0	0,0	-7,6293	6,1853	13,8147
23:00	13,52	0,0	2,24	-10,24	3,76	14,0
Potência total injetada pelo gerador despachável (MW)						591,017
Corte total de carga (MW)						7,426
Custo total de operação (R\$)						13336,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao limitar a capacidade das linhas de transmissão do sistema elétrico de pequeno porte para 14 MW, não foi possível atender a carga, ocasionando um corte de carga de 7,426 MW para manter a segurança operacional da rede elétrica, aumentando significativamente o custo operacional. O novo comportamento do sistema é demonstrado pela Figura 16.

Figura 16 – Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW por linha sem baterias



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com a integração do sistema baterias, observou-se os resultados apresentados pela Tabela 12.

Tabela 12 - Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW por linha com baterias

(continua)

Hora	P _{G1} (MW)	P _{D1} (MW)	P _{D3} (MW)	P _{Bat2} (MW)	SOC ₂ (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
00:00	40,0	0,0	0,0	24,876	99,876	6,6667	13,3333	6,6667
01:00	18,0	0,0	0,0	-1,775	101,651	-8,0	6,0	14,0
02:00	18,0	0,0	0,0	-0,524	102,175	-8,0	6,0	14,0
03:00	18,0	0,0	0,0	-0,011	102,186	-8,0	6,0	14,0

(conclusão)

Hora	P _{G1} (MW)	P _{D1} (MW)	P _{D3} (MW)	P _{Bat2} (MW)	SOC ₂ (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
04:00	18,0	0,0	0,0	0,931	101,255	-8,0	6,0	14,0
05:00	18,0	0,0	0,0	2,647	98,608	-8,0	6,0	14,0
06:00	18,0	0,0	0,0	3,799	94,809	-8,0	6,0	14,0
07:00	18,0	0,0	0,0	5,638	89,171	-8,0	6,0	14,0
08:00	18,0	0,0	0,0	8,128	81,043	-8,0	6,0	14,0
09:00	18,0	0,0	0,0	10,381	70,662	-8,0	6,0	14,0
10:00	40,0	0,0	0,0	-9,276	79,938	6,6667	13,3333	6,6667
11:00	18,0	0,0	0,0	14,98	64,958	-8,0	6,0	14,0
12:00	29,735	0,0	0,0	4,958	60,0	-0,1767	9,9117	10,0883
13:00	35,161	0,0	0,0	0,0	60,0	3,4407	11,7203	8,2797
14:00	34,903	0,0	0,0	0,0	60,0	3,2687	11,6343	8,3657
15:00	37,884	0,0	0,0	-3,53	63,53	5,256	12,628	7,372
16:00	40,0	0,0	0,0	-7,026	70,556	6,6667	13,3333	6,6667
17:00	40,0	0,0	0,0	-9,144	79,7	6,6667	13,3333	6,6667
18:00	18,0	0,0	0,0	8,746	70,954	-8,0	6,0	14,0
19:00	18,0	0,0	0,0	4,708	66,246	-8,0	6,0	14,0
20:00	18,0	0,0	0,0	3,199	63,047	-8,0	6,0	14,0
21:00	18,0	0,0	0,0	2,491	60,556	-8,0	6,0	14,0
22:00	18,0	0,0	0,0	0,556	60,0	-8,0	6,0	14,0
23:00	18,0	0,0	0,0	-2,24	62,24	-8,0	6,0	14,0
Potência total injetada pelo gerador despachável (MW)								585,683
Corte total de carga (MW)								0,0
Custo total de operação (R\$)								5856,83

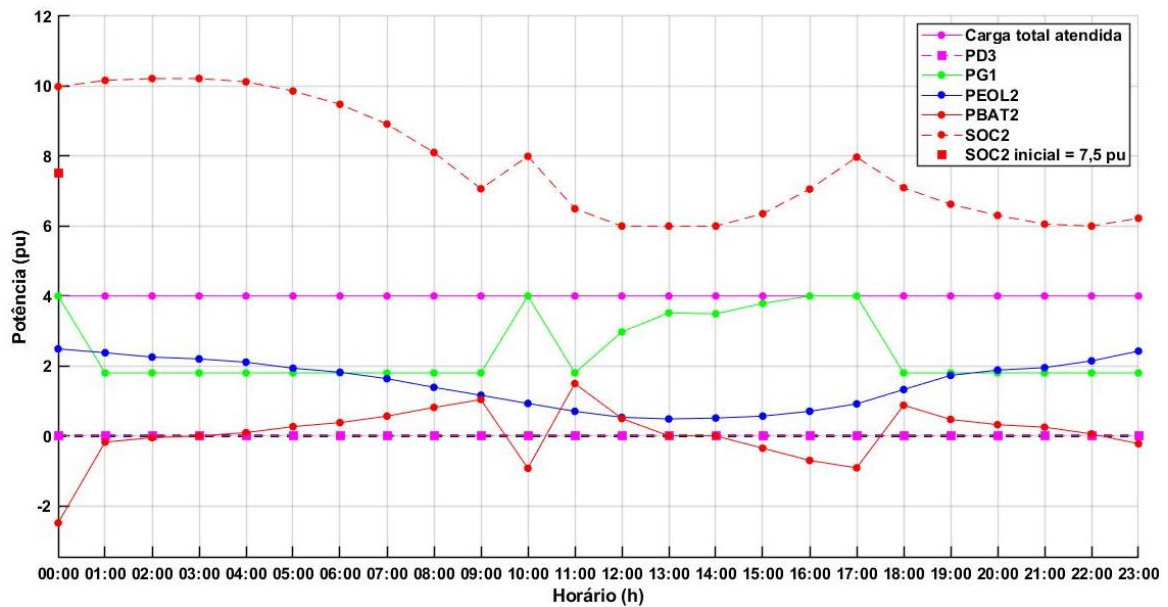
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com a instalação de um sistema de baterias na barra 2, foi possível atender totalmente a carga, ocasionando uma redução no custo operacional de R\$7479,34 equivalente a uma economia de 56,08%. Como o corte de geração eólica não foi considerado, o sistema não seria capaz de atender a carga, sendo necessário realizar a recapacitação ou construção de novas linhas de transmissão. O sistema de

armazenamento de energia possibilitou o atendimento total da carga, postergando investimentos elevados nas linhas de transmissão.

A Figura 17, apresenta o comportamento da rede elétrica com a integração do sistema de armazenamento com baterias.

Figura 17 – Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 14 MW por linha com baterias



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3 REDUÇÃO DO CORTE DE GERAÇÃO EÓLICA

Para demonstrar o efeito do corte de geração eólica, devido às limitações físicas do sistema, a capacidade das linhas de transmissão, foram novamente reduzidas de 14 MW para 12 MW, a fim de simular o congestionamento das linhas de transmissão. Os resultados da operação do sistema elétrico de pequeno porte, com as novas capacidades das linhas de transmissão, sem o sistema de baterias são demonstrados pela Tabela 13.

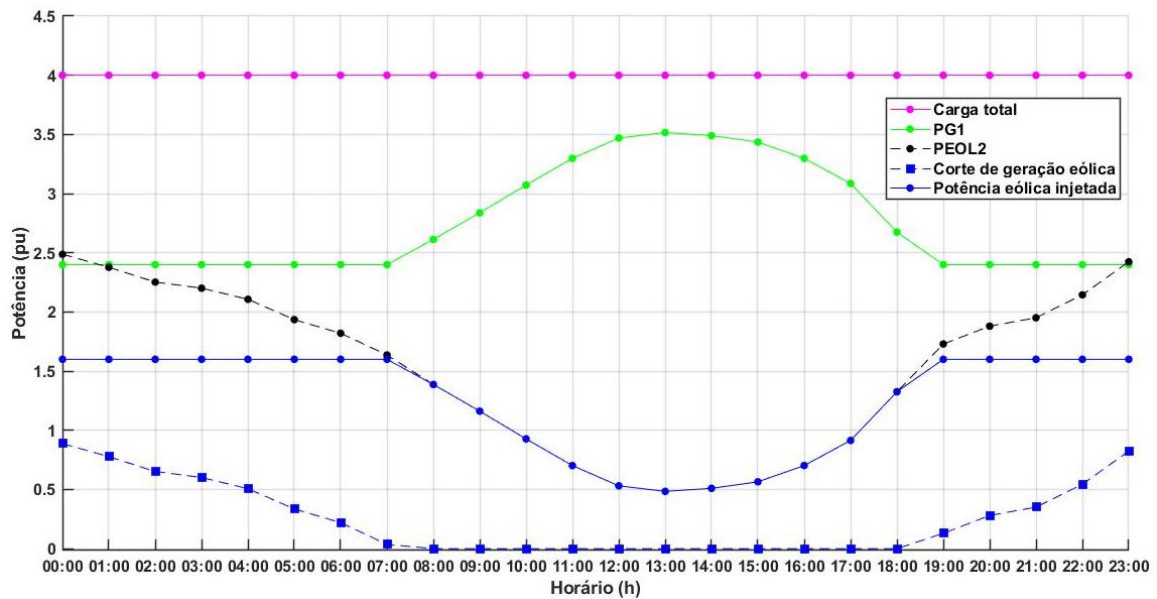
Tabela 13 - Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha sem baterias

Hora	P _{G1} (MW)	P _{D1} (MW)	P _{D3} (MW)	P _{CEol2} (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
00:00	24,0	0,0	0,0	8,876	-4,0	8,0	12,0
01:00	24,0	0,0	0,0	7,775	-4,0	8,0	12,0
02:00	24,0	0,0	0,0	6,524	-4,0	8,0	12,0
03:00	24,0	0,0	0,0	6,011	-4,0	8,0	12,0
04:00	24,0	0,0	0,0	5,069	-4,0	8,0	12,0
05:00	24,0	0,0	0,0	3,353	-4,0	8,0	12,0
06:00	24,0	0,0	0,0	2,201	-4,0	8,0	12,0
07:00	24,0	0,0	0,0	0,362	-4,0	8,0	12,0
08:00	26,128	0,0	0,0	0,0	-2,5813	8,7093	11,2907
09:00	28,381	0,0	0,0	0,0	-1,0793	9,4603	10,5397
10:00	30,724	0,0	0,0	0,0	0,4827	10,2413	9,7587
11:00	32,980	0,0	0,0	0,0	1,9867	10,9933	9,0067
12:00	34,693	0,0	0,0	0,0	3,1287	11,5643	8,4357
13:00	35,161	0,0	0,0	0,0	3,4407	11,7203	8,2797
14:00	34,903	0,0	0,0	0,0	3,2687	11,6343	8,3657
15:00	34,354	0,0	0,0	0,0	2,9027	11,4513	8,5487
16:00	32,974	0,0	0,0	0,0	1,9827	10,9913	9,0087
17:00	30,856	0,0	0,0	0,0	0,5707	10,2853	9,7147
18:00	26,746	0,0	0,0	0,0	-2,1693	8,9153	11,0847
19:00	24,0	0,0	0,0	1,292	-4,0	8,0	12,0
20:00	24,0	0,0	0,0	2,801	-4,0	8,0	12,0
21:00	24,0	0,0	0,0	3,509	-4,0	8,0	12,0
22:00	24,0	0,0	0,0	5,444	-4,0	8,0	12,0
23:00	24,0	0,0	0,0	8,24	-4,0	8,0	12,0
Potência total injetada pelo gerador despachável (MW)							659,9
Corte total de carga (MW)							0,0
Corte total de geração eólica (MW)							61,457
Custo total de operação (R\$)							12744,70

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que o sistema não consegue acomodar toda a geração de energia eólica, sendo necessário deixar de gerar 61,457 MW por dia, mas toda a carga foi atendida utilizando o gerador despachável. O comportamento do sistema é demonstrado pela Figura 18.

Figura 18 – Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha sem baterias



Com a integração do sistema baterias, observou-se os resultados apresentados pela Tabela 14.

Tabela 14 - Operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha com baterias

(continua)

Hora	P _{G1} (MW)	P _{DT} (MW)	P _{Bat2} (MW)	SOC ₂ (MW)	PC _{Eol2} (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
00:00	24,0	0,0	-8,876	83,876	0,0	-4,0	8,0	12,0
01:00	24,0	0,0	-7,775	91,651	0,0	-4,0	8,0	12,0
02:00	24,0	0,0	-6,524	98,175	0,0	-4,0	8,0	12,0
03:00	24,0	0,0	-6,011	104,186	0,0	-4,0	8,0	12,0
04:00	24,0	0,0	-5,069	109,255	0,0	-4,0	8,0	12,0

(conclusão)

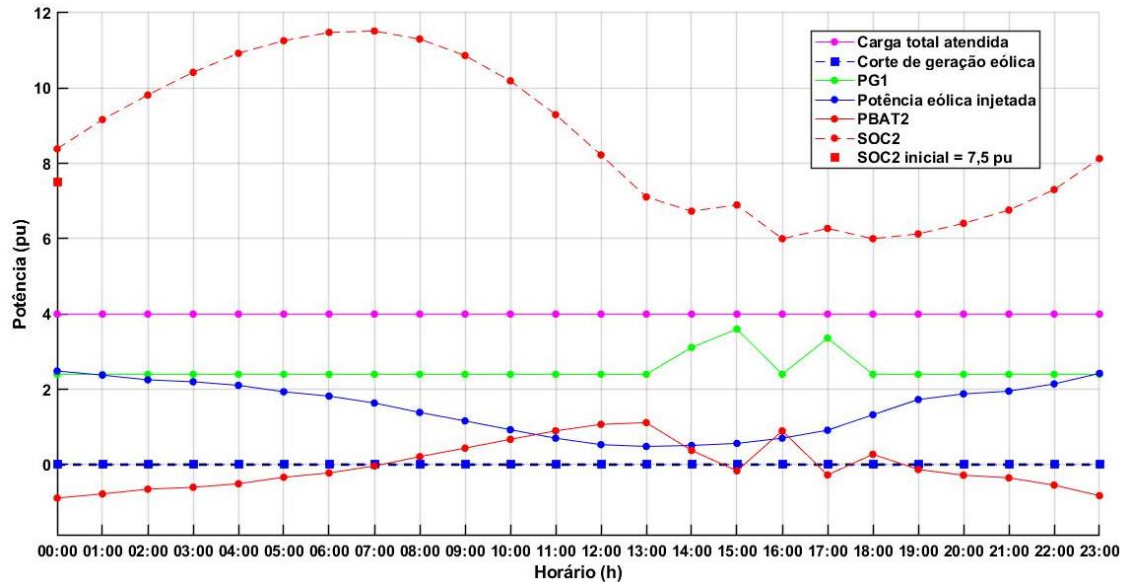
Hora	P _{G1} (MW)	P _{DT} (MW)	P _{Bat2} (MW)	SOC ₂ (MW)	PC _{Eol2} (MW)	P ₁₂ (MW)	P ₁₃ (MW)	P ₂₃ (MW)
05:00	24,0	0,0	-3,353	112,608	0,0	-4,0	8,0	12,0
06:00	24,0	0,0	-2,201	114,809	0,0	-4,0	8,0	12,0
07:00	24,0	0,0	-0,362	115,171	0,0	-4,0	8,0	12,0
08:00	24,0	0,0	2,128	113,043	0,0	-4,0	8,0	12,0
09:00	24,0	0,0	4,381	108,662	0,0	-4,0	8,0	12,0
10:00	24,0	0,0	6,724	101,938	0,0	-4,0	8,0	12,0
11:00	24,0	0,0	8,98	92,958	0,0	-4,0	8,0	12,0
12:00	24,0	0,0	10,693	82,265	0,0	-4,0	8,0	12,0
13:00	24,0	0,0	11,161	71,104	0,0	-4,0	8,0	12,0
14:00	31,127	0,0	3,776	67,328	0,0	0,7513	10,3757	9,6243
15:00	36,0	0,0	-1,646	68,974	0,0	4,0	12,0	8,0
16:00	24,0	0,0	8,974	60,0	0,0	-4,0	8,0	12,0
17:00	33,602	0,0	-2,746	62,746	0,0	2,4013	11,2007	8,7993
18:00	24,0	0,0	2,746	60,0	0,0	-4,0	8,0	12,0
19:00	24,0	0,0	-1,292	61,292	0,0	-4,0	8,0	12,0
20:00	24,0	0,0	-2,801	64,093	0,0	-4,0	8,0	12,0
21:00	24,0	0,0	-3,509	67,602	0,0	-4,0	8,0	12,0
22:00	24,0	0,0	-5,444	73,046	0,0	-4,0	8,0	12,0
23:00	24,0	0,0	-8,24	81,286	0,0	-4,0	8,0	12,0
Potência total injetada pelo gerador despachável (MW)								604,729
Corte total de carga (MW)								0,0
Corte total de geração eólica (MW)								0,0
Custo total de operação (R\$)								6047,29

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Devido a implementação de um sistema de armazenamento de energia com baterias na barra 2, foi possível acomodar toda a geração eólica, sem a necessidade de recapacitar ou construir novas linhas de transmissão. Além disso, observou-se que não ocorreu nenhum corte de carga, atendendo totalmente a demanda. A redução do custo operacional foi de R\$6697,41 equivalente a uma economia de 52,55%.

O comportamento da rede elétrica com a implementação do sistema de armazenamento com baterias é demonstrado pela Figura 19.

Figura 19 – Gráfico da operação do sistema elétrico com capacidade de transmissão de 12 MW por linha com baterias



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao diminuir a capacidade das linhas de transmissão para valores menores do que 12 MW, o sistema de baterias não é capaz de acomodar a geração eólica e evitar o corte de carga, sendo necessário realizar o investimento na recapitação ou construção de novas linhas, para efetuar a operação com segurança.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou os benefícios da implementação dos sistemas de armazenamento de energia em linhas de transmissão. Ao longo do estudo, foram descritas diferentes tecnologias e suas contribuições. O armazenamento de energia com baterias está sendo amplamente utilizado, devido aos grandes avanços tecnológicos, como a melhoria na eficiência de carga e descarga, maior quantidade de ciclos, maior densidade energética e principalmente a redução dos custos de produção e implementação.

As simulações realizadas, comprovam os benefícios da utilização de um sistema de armazenamento de energia com baterias em um sistema de transmissão, demonstrando a redução do custo operacional ao longo do dia, evitando o corte de carga devido ao congestionamento das linhas de transmissão, possibilitando aumentar a penetração de energia eólica, com características intermitentes, gerenciando o congestionamento das linhas de transmissão, evitando o curtailment.

Devido a capacidade de gerenciar os fluxos de potência nas linhas de transmissão, o sistema de baterias consegue aumentar a flexibilidade da rede elétrica, postergando investimentos como a recapacitação e a construção de novas linhas de transmissão, para atender com segurança a demanda de energia elétrica.

Com a transição energética, há uma busca pela substituição das fontes de energia que utilizam combustíveis fósseis, por fontes de energia renováveis, como as eólicas e as fotovoltaicas, a fim de minimizar as emissões de gases causadores do efeito estufa. Portanto a utilização do armazenamento de energia com baterias, possibilita aumentar a penetração de fontes de energia renováveis no sistema elétrico, eliminando os problemas inerentes a intermitência de geração, e a baixa inércia, que podem comprometer a segurança operacional do sistema.

A partir da modelagem implementada para um sistema elétrico de pequeno porte, é possível realizar a modelagem e simulações para sistemas elétricos maiores. Porém não houve tempo hábil para determinar a dimensão máxima desses sistemas, em que o programa implementado no MATLAB executaria com precisão o fluxo de potência ótimo.

Um modelo de injeção e absorção de potência ativa foi utilizado para representar o sistema de baterias, onde não foi considerada eficiência de carga e descarga. Esse modelo impossibilita as simulações para comprovação dos benefícios

relacionados à injeção e absorção de potência reativa, para o controle de tensão, analisados em modelagens não lineares. Limitando outras análises relevantes, como a de estabilidade, analisada em relação a segurança de tensão, que está diretamente relacionada em determinar o ponto de máximo carregamento do sistema. Além disso, não foram consideradas as perdas nas linhas de transmissão, que podem ser obtidas modelando o fluxo de potência linear com perdas.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para a continuação e desenvolvimento deste trabalho, uma boa proposta seria refinar a modelagem implementada, modelando as perdas do sistema, considerando eficiências de carga e descarga para o sistema de armazenamento com baterias, e avaliar a implementação de sistemas de grande porte.

Outra abordagem interessante seria a modelagem não linear do sistema de armazenamento com baterias, juntamente com o sistema elétrico, a fim de demonstrar aspectos relacionados a injeção e absorção de potência reativa, envolvendo estudos de fluxo de potência não linear, conhecido também como fluxo de potência CA, seguindo a mesma linha de raciocínio, ao verificar diferentes cenários, utilizando fluxo de potência ótimo, levando em consideração a modelagem não linear.

Além disso, realizar a modelagem de algumas características inerentes às baterias, como a sua degradação, eficiência nos processos de carga e descarga, e o impacto da operação em diferentes temperaturas.

REFERÊNCIAS

- MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. E. Blucher, 1983.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico – Resultados da Operação – Boletim de Geração Eólica, 2025. <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-eolica.aspx> Acesso em: 20 fev. 2025.
- ZANATTA, Giuseppe; PEREIRA, Ana; FERREIRA, Ângela. On the mitigation of renewable energy curtailment by using pumped hydro storage systems. In: **2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS)**. IEEE, 2023. p. 1-6.
- ZHOU, Hong et al. Robust scheduling of a hybrid hydro/photovoltaic/pumped-storage system for multiple grids peak-shaving and congestion management. **IEEE Access**, v. 12, p. 22230-22242, 2023.
- CALERO, Fabian et al. A review of modeling and applications of energy storage systems in power grids. **Proceedings of the IEEE**, v. 111, n. 7, p. 806-831, 2022.
- ZHANG, Xuhan et al. Research on Scheduling and Optimizing Operation of External Delivery System Considering Compressed Air and Battery Energy Storage. In: **2024 6th International Conference on Energy Systems and Electrical Power (ICESEP)**. IEEE, 2024. p. 554-560.
- BERRUETA, Alberto et al. Supercapacitors: electrical characteristics, modeling, applications, and future trends. **IEEE Access**, v. 7, p. 50869-50896, 2019.
- WANG, Yanan et al. Comprehensive analysis of equivalent models of supercapacitor: Towards optimization and better application. In: **2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)**. IEEE, 2023. p. 2642-2648.
- ZHANG, Jie; GU, Min; CHEN, Xi. Supercapacitors for renewable energy applications: A review. **Micro and Nano Engineering**, v. 21, p. 100229, 2023.
- JAVADI, Masoud et al. Battery energy storage technology in renewable energy integration: A review. In: **2022 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)**. IEEE, 2022. p. 435-440.
- QUDAIH, Sovana et al. Technology Assessment of Hydrogen Storage: Cases Enabling the Clean Energy Transition. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 71, p. 5744-5756, 2024.
- LI, Jianlin et al. Modeling and simulation of hydrogen energy storage system for power-to-gas and gas-to-power systems. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 11, n. 3, p. 885-895, 2022.

DUBEY, Pankaj Kumar et al. Energy Storage Technologies: Types, Recent Trends, and Development. In: **2024 3rd International conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)**. IEEE, 2024. p. 1-7.

SCHILT, Ueli; SCHUETZ, Philipp. Thermal Energy Storage in Multi-Energy System Optimization: How to Consider Temperatures?. In: **2024 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)**. IEEE, 2024. p. 1-7.

KARIM, Mowaz Mohammed Abdul et al. Archetype of energy generation system from concentrated solar power and thermal gradient of water bodies and atmosphere. In: **2024 7th International Conference on Development in Renewable Energy Technology (ICDRET)**. IEEE, 2024. p. 1-6.

TAN, Kang Miao et al. Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration. **Journal of Energy Storage**, v. 39, p. 102591, 2021.

MUKHERJEE, Poulomi; RAO, V. V. Superconducting magnetic energy storage for stabilizing grid integrated with wind power generation systems. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 7, n. 2, p. 400-411, 2019.

LI, XIANGJUN; WANG, SHANGXING. Energy Management and Operational Control Methods for Grid Battery Energy Storage Systems. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 7, n. 5, 2021.

SANTOS, Sergio F. et al. Influence of Battery Energy Storage Systems on Transmission Grid Operation With a Significant Share of Variable Renewable Energy Sources. **IEEE Systems Journal**, v. 16, n. 1, p. 1508-1519, 2022.

NOELA SOFIA GUZMAN, E. et al. Frequency Regulation Model of Bulk Power Systems With Energy Storage. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 37, n. 2, p. 913-926, 2022.

FANG, Jingyang et al. On the Inertia of Future More-Electronics Power Systems. **IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS**, v. 7, n. 4, 2019.

CARLINI, Enrico Maria et al. Battery Energy Storage System (BESS) for an Efficient RES Integration: A Real Case Study on the Transmission Network Evolution in the North-Eastern Italian Grid Portion. In: **2024 AEIT International Annual Conference (AEIT)**. IEEE, 2024. p. 1-6.

PAN, Zhongmei et al. Black-start using battery storage and wind turbines. In: **2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)**. IEEE, 2023. p. 1626-1631.

NGUYEN, Quan et al. Control and simulation of a grid-forming inverter for hybrid pv-battery plants in power system black start. In: **2021 IEEE power & energy society general meeting (PESGM)**. IEEE, 2021. p. 1-5.

DATTA, Ujjwal; KALAM, Akhtar; SHI, Juan. Battery energy storage system to stabilize transient voltage and frequency and enhance power export capability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 3, p. 1845-1857, 2018.

ZHENG, Simeng et al. A review of equivalent-circuit model, degradation characteristics and economics of Li-ion battery energy storage system for grid applications. **Journal of Energy Storage**, v. 101, p. 113908, 2024.

ROUHOLAMINI, Mahdi et al. A review of modeling, management, and applications of grid-connected Li-ion battery storage systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 13, n. 6, p. 4505-4524, 2022.