



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA – CEEI
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA – UAEE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC
PROFESSOR: RONIMACK TRAJANO DE SOUZA
ALUNO: EDUARDO SÁTIRO LEAL

AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS DE CHUMBO

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

JULHO DE 2024

Eduardo Sátiro Leal

**Avaliação Da Operação De Um Sistema De Armazenamento De
Energia Com Baterias De Chumbo**

*Trabalho de Conclusão de Curso Submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como Parte dos
Requisitos Necessários para Conclusão do Curso em Engenharia
Elétrica.*

Área de Concentração: Armazenamento de energia com baterias

Orientador:

Ronimack Trajano de Souza

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

JULHO DE 2024

Eduardo Sátiro Leal

**Avaliação Da Operação De Um Sistema De Armazenamento De
Energia Com Baterias de Chumbo**

*Trabalho de Conclusão de Curso Submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como Parte dos
Requisitos Necessários para Conclusão do Curso em Engenharia
Elétrica.*

Aprovado em /_____/_____

Pablo Bezerra Vilar

Universidade Federal de Campina Grande Avaliador

Ronimack Trajano de Souza

Universidade Federal de Campina Grande Orientador

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

JULHO DE 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me manteve firme na caminhada.

Agradeço aos meus pais, em primeiro lugar a minha mãe, que me incentivou e lutou por minhas decisões, e a meu pai, que foi exemplo de dedicação profissional e homem.

Além de minha casa familiar, agradeço o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande e a todos os amigos que criam o melhor ambiente de estudo e trabalho, me acolhendo e participando tanto nos momentos difíceis quanto nos momentos de descontração nesses últimos 6 anos de convivência.

Em especial, agradeço aos professores George Lira, Ronimack Trajano e Alexandre Cunha por todos os ensinamentos e orientações durante minha graduação.

Agradeço a Moura, por permitir e compartilhar o banco de dados da operação do BESS do ITEM, enriquecendo ainda mais este trabalho.

“A energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada.”

(Primeira Lei da Termodinâmica)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada da operação de um sistema real de armazenamento de energia com baterias (BESS - *Battery Energy Storage System*). No contexto de um cenário energético em transição, os sistemas BESS desempenham um papel fundamental na mitigação da intermitência das fontes renováveis, como solar e eólica, proporcionando maior estabilidade e confiabilidade às redes elétricas. O estudo aborda a composição e o funcionamento dos principais componentes do BESS, incluindo o sistema de gerenciamento de baterias (BMS), o sistema de conversão de potência (PCS) e o sistema de gerenciamento de energia (EMS). Além disso, foram realizadas análises de dados para avaliar o desempenho do sistema, correlacionando variáveis operacionais e explorando aplicações práticas como suporte de tensão, regulação de frequência e arbitragem de energia. Com isso, o trabalho visa fornecer uma visão abrangente da relevância dos sistemas de armazenamento de energia para uma matriz elétrica mais sustentável e resiliente.

Palavras-chave: Sistema de armazenamento de energia de baterias, BESS e ciência de dados.

ABSTRACT

This paper presents a detailed analysis of the operation of a real Battery Energy Storage System (BESS). In the context of an evolving energy landscape, BESS systems play a crucial role in mitigating the intermittency of renewable sources, such as solar and wind, thereby enhancing the stability and reliability of electrical grids. The study addresses the composition and functioning of the main components of the BESS, including the Battery Management System (BMS), the Power Conversion System (PCS), and the Energy Management System (EMS). Furthermore, data analyses were conducted to evaluate the system's performance by correlating operational variables and exploring practical applications such as voltage support, frequency regulation, and energy arbitrage. In this way, the work aims to provide a comprehensive view of the relevance of energy storage systems for a more sustainable and resilient electrical grid.

Keywords: Battery Energy Storage System, BESS, and data science.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tecnologias de armazenamento de energia	17
Figura 2 - Processo de descarga da bateria	21
Figura 3 - Processo de carga da bateria	22
Figura 4 - Componentes do BESS	25
Figura 5- Níveis de hierarquia do sistema de baterias	26
Figura 6 – Níveis de gerenciamento do BMS.....	30
Figura 7 - Balanceamento passivo	31
Figura 8 - Balanceamento ativo	32
Figura 9 - Funções do BMS	33
Figura 10 - Funcionamento do PCS.....	33
Figura 11 - Configuração do EMS.....	36
Figura 12 - Aplicações do BESS	40
Figura 13 - Diagrama do ciclo de vida da ciência de dados.	46
Figura 14 - Fluxograma da metodologia	51
Figura 15 - Topologia do BESS do ITEM	55
Figura 16 - BESS ITEM.....	55
Figura 17 – Carga e descarga da bateria x SoC	61
Figura 18 - Geração fotovoltaica x SoC	62
Figura 19 – Tensão da bateria x SoC.....	63
Figura 20 – Temperatura das baterias x SoC	64
Figura 21 – Atuação dos sensores do BESS	65
Figura 22 – Corrente da bateria x fator de potência	66
Figura 23 – Tensões de fase.....	67
Figura 24 – Tensão fase A x Potência reativa	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos da geração FV	56
Tabela 2 - Atributos do BMS.....	56
Tabela 3 – Atributos do PCS	56
Tabela 4 - Atributos dos sensores	56
Tabela 5 - Análise dos atributos do BMS.....	57
Tabela 6 - Análise dos atributos do PCS	58
Tabela 7 - Análise dos atributos dos sensores do HVAC	59

LISTA DE ABREVIACOES

- EES - electrical energy storage;
- BESS - battery energy storage system;
- PHS - Pumped hydroelectric storage;
- CAES – Compressed air energy storage;
- SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage;
- TES - Thermal Energy Storage;
- BMS - Battery Management System;
- PCS - Power Conversion System;
- EMS - Energy Management System;
- DoD - Depth of Discharge;
- SoC - State of Charge;
- SoH - State of Health;
- BMU - Battery Management unit;
- SBMS - String Battery Management System;
- SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition;
- HVAC - Heating, Ventilation and Air Conditioning;
- BTM - behind-the-meter;
- FTM - front-of-meter;

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE ABREVIACÕES.....	10
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	15
2.1.1 ARMAZENAMENTO MECÂNICO	17
2.1.1.1 ARMAZENAMENTO HIDROELÉTRICO.....	17
2.1.1.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR AR COMPRIMIDO....	18
2.1.2 ARMAZENAMENTO ELETROMAGNÉTICO	18
2.1.2.1 CAPACITORES E SUPERCAPACITORES	18
2.1.2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MAGNÉTICA SUPERCONDUTORA.....	19
2.1.3 ARMAZENAMENTO TÉRMICO	20
2.1.4 ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICO.....	20
2.1.4.1 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO	22
2.1.4.2 BATERIAS DE ÍON-LÍTIO.....	23
2.2 COMPONENTES DO BESS.....	24
2.2.1 SISTEMA DE BATERIAS	25
2.2.1.1 PRINCIPAIS PARÂMETROS DAS BATERIAS	26
2.2.1.2 MÉTODOS PARA CARREGAR BATERIAS	28

2.2.2	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS.....	29
2.2.3	SISTEMA DE CONVERSÃO DE POTÊNCIA	33
2.2.4	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA.....	35
2.2.5	SISTEMAS AUXILIARES	38
2.3	APLICAÇÕES DO BESS	39
2.4	PROJETOS DE BESS PELO MUNDO	43
2.5	CIÊNCIA DE DADOS	45
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	47
4	METODOLOGIA	51
4.1	ENTENDIMENTO DO PROBLEMA E COLETA DE DADOS BRUTOS .	51
4.2	PROCESSAMENTO E AJUSTES DOS DADOS	52
4.3	ANÁLISE EXPLORATÓRIA.....	53
4.4	TESTES	53
4.5	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	54
5	RESULTADOS.....	54
5.1	ENTENDIMENTO, COLETA DE DADOS, PROCESSAMENTO E ANÁLISE EXPLORATÓRIA.....	54
5.2	TESTES E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	60
6	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

As fontes de geração de energia renovável variável, como a energia solar e eólica, cresceram exponencialmente neste século, podendo se tornar, em alguns países, a fonte dominante de eletricidade. No Brasil, o investimento nas fontes intermitentes foi essencial para a diversificação da matriz elétrica, hoje, as energias provenientes do sol e do vento já representam aproximadamente 33,1% da capacidade instalada em junho de 2024, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A entrada em grande escala destas fontes que são consideradas intermitentes, ou seja, dependentes de condições climáticas, trouxe novas preocupações para o sistema elétrico. Por dependerem de fatores externos, a produção nos grandes parques é volátil e pouco previsível, (BUTURACHE; STANCU, 2021). As usinas de geração solar, por exemplo, são dependentes da incidência de sol e condições de sombreamento ou chuva, as quais podem afetar severamente o desempenho da geração e tornar sua operação mais complexa.

A integração em grande escala de fontes renováveis, apesar dos benefícios econômicos e ambientais, pode causar violações nos limites aceitáveis dos indicadores de qualidade e segurança. Assim, surgem desafios que precisam ser superados para garantir a estabilidade e a confiabilidade do sistema a longo prazo. Nesse contexto, a adoção de estratégias para mitigar a intermitência e reduzir a variabilidade das fontes de geração não controláveis tem se tornado crucial.

Os sistemas de armazenamento de energia (*electrical energy storage – EES*) fornecem uma importante solução para mitigar os fatores negativos da intermitência das fontes de energia renovável e a imprevisibilidade da sua geração, pois a energia pode ser armazenada em períodos onde a produção de energia excede o consumo e ser utilizada para cobrir em horários específicos ou quando o consumo excede a produção. Além desta aplicação, os EES possuem diversas outras aplicações, desde sistemas de maior escala, como geração e transmissão de energia, até sistemas pequenos, para o consumidor final. Com isso, o EES está perto de se tornar o sexto elo da cadeia de valor tradicional da eletricidade, que é composta por fonte de combustível/energia, geração, transmissão, distribuição e cliente (CHEN, Haisheng. et al, 2009).

Os sistemas de armazenamento de energia com baterias (*battery energy storage system – BESS*), se tornam cada vez mais cruciais no sistema de energia moderna, devido aos desequilíbrios temporais entre oferta e demanda de eletricidade. Com BESS, é possível fornecer um fluxo de energia mais previsível e constante, tornando a operação do sistema elétrico mais

confiável e segura, permitindo que as energias renováveis se tornem uma opção ainda mais viável na transição energética. Em decorrência dos diversos benefícios, a Agência Internacional de Energia (AIE) ressaltou em seu relatório “Baterias e transição energética seguras”, que, em 2020, possuía um armazenamento de cerca de 20 GW, pode atingir, até 2030, cerca de 585 GW.

A versatilidade do BESS é evidenciada pela sua ampla gama de aplicações, que incluem, mas não se limitam a: otimização da geração de energia renovável; prestação de serviços ancilares, como regulação de frequência e tensão; e redução e gerenciamento dos picos de demanda nas redes de transmissão e distribuição (Datta; Kalam; Shi, 2021). Esta tecnologia tem se destacado no Sistema Elétrico de potência (SEP) por sua multifuncionalidade, redução contínua dos custos, alta eficiência e maturidade tecnológica.

Tendo em vista a importância e o crescimento dessa tecnologia para solucionar os problemas do sistema elétrico, este trabalho tem como objetivo, realizar uma fundamentação teórica sobre os principais equipamentos que compõem o BESS e seu funcionamento, explanando e exemplificando suas principais aplicações. Por fim, será realizada a análise do sistema BESS do ITEM, mostrando o projeto com detalhes e as suas aplicações para cada serviço de gestão de energia.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é realizar um levantamento dos principais sistemas de armazenamento de energia, aprofundando os estudos no BESS, que vem ganhando bastante destaque e investimento em todo o mundo, por fornecer um fluxo de energia mais previsível e constante. Para consolidar a pesquisa, será avaliado um caso real de um sistema de armazenamento de energia com baterias.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Estudar a importância e evolução dos sistemas de armazenamento com baterias no mercado nacional e internacional;
- Compreender o funcionamento de um sistema de armazenamento;
- Especificar todos os componentes de um BESS, assim como suas aplicações no sistema elétrico;
- Estudar a metodologia de desenvolvimento de projetos da ciência de dados;
- Realizar um levantamento do estado da arte sobre projetos relevantes, novas tecnologias e novas aplicações dos sistemas de armazenamento de energia

com baterias;

- Realizar a análise dos dados de operação do BESS em estudo;
- Avaliar o desempenho de um sistema em estudo.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, começando por este capítulo introdutório.

O capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica sobre os sistemas de armazenamento de energia, aprofundando na composição dos equipamentos e nas aplicações do sistema BESS.

No capítulo 3, é mostrado as pesquisas mais relevantes nos últimos anos relacionadas ao tema proposto, a partir de uma revisão bibliográfica.

No capítulo 4, é apresentada a metodologia que descreve os materiais e métodos da pesquisa, especificando os passos para realizar a análise de dados do sistema BESS em estudo.

O capítulo 5 é dedicado a exposição e análise dos resultados, seguido das considerações finais, no Capítulo 6, sobre os resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários para o entendimento da metodologia utilizada no trabalho, bem como para a análise e discussão dos resultados obtidos. Dessa forma, são destacados conceitos sobre armazenamento de energia, componentes e aplicações do BESS.

2.1 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento de energia é uma forma de capturar certa quantidade de energia em um dado momento na qual ela está disponível para uso posterior, podendo ser no momento de sua geração ou não. Assim, é possível manter o equilíbrio entre a demanda e a produção. Assim, o domínio sobre essa tecnologia foi primordial para o avanço da sociedade moderna, desempenhando um papel crucial nos aspectos do desenvolvimento econômico, social e ambiental.

Mesmo sendo uma tecnologia que voltou ao foco no século XXI, o conceito de armazenar energia é muito antigo, onde começou a tomar forma em 1800, com Alessandro

Volta, que inventou a pilha voltaica, a primeira bateria eletroquímica. Alguns anos depois, outras duas importantes invenções impactaram este século, como a célula de Daniell, em 1836, e a bateria de chumbo-ácido de Gaston Planté, em 1859, avanços que serviram de base para as baterias recarregáveis que conhecemos hoje.

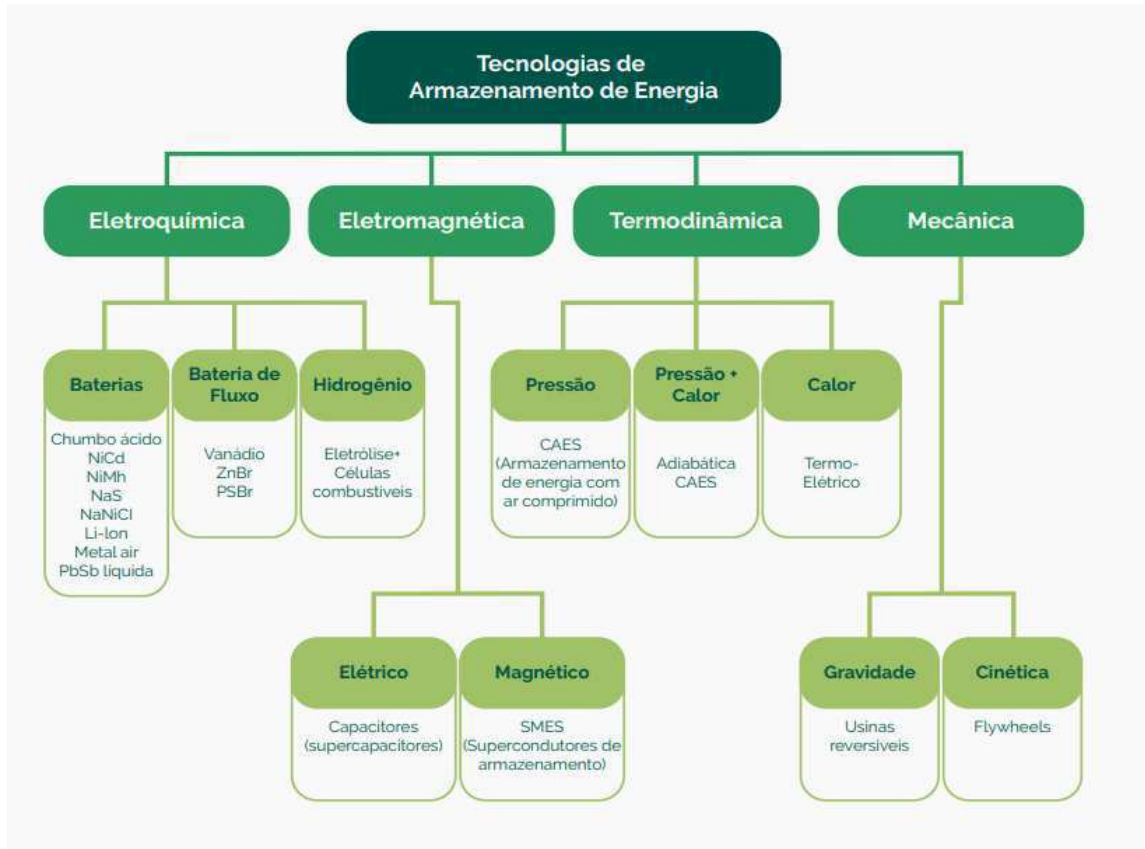
Foi no início século XX que o EES começou a ser explorado como uma opção para armazenamento de energia em larga escala. Em 1929, foi construída a primeira instalação de comercial de armazenamento hidroelétrico bombeado, na Suíça, usando energia da água para armazenar energia potencial. Nesta época, as baterias de chumbo-ácido se tornaram referência no mercado, sendo amplamente usada em veículos e em sistemas de energia estacionária. A crise energética, na década de 1970, aumentou o estímulo para o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento de energia, as baterias de íon-lítio foram desenvolvidas e comercializadas pela Sony em 1991, revolucionando a indústria de eletrônicos portáteis.

No início do século XXI, o advento das energias renováveis, como solar e eólica, cresceram exponencialmente, surgindo, assim, novas preocupações para a estabilidade e confiança do sistema elétrico. O armazenamento de energia se tornou a principal solução para esses sistemas de geração de energia, mitigando os problemas ocasionado pela intermitência dessas fontes. Com essa integração, é possível armazenar o excesso de energia gerada durante períodos de alta produção e liberar a energia quando a produção é baixa.

As grandes indústrias em todo o mundo estão investindo pesado nas tecnologias de EES, apoiando a transição energética sustentável e resiliente. Desta forma, antes de iniciar, de forma minuciosa, o estudo sobre o sistema de armazenamento de energia com baterias, será apresentado, brevemente, os principais tipos de armazenamento de energia elétrica.

Existem dois critérios para categorizar os diversos sistemas de energia de armazenamento: função e forma (CHEN, Haisheng. et al, 2009). Será tratado a classificação por forma, que é baseado na tecnologia, sendo este, dividido em quatro categorias: armazenamento mecânico, armazenamento eletroquímico, armazenamento eletromagnético e armazenamento térmico.

Figura 1 - Tecnologias de armazenamento de energia



Fonte: Marcos Aurélio (2023)

2.1.1 ARMAZENAMENTO MECÂNICO

O armazenamento mecânico de energia elétrica envolve o uso de métodos físicos para armazenar e liberar energia. Estas tecnologias aproveitam a energia potencial ou cinética para armazenamento e são amplamente usadas devido à sua eficácia em aplicações de larga escala. Cada tecnologia possui suas próprias vantagens e desvantagens, a escolha apropriada do tipo de armazenamento mecânico depende das condições específicas de cada aplicação, como requisitos de capacidade, eficiência, custo e impacto ambiental.

2.1.1.1 ARMAZENAMENTO HIDROELÉTRICO

O armazenamento hidroelétrico bombeado (*Pumped hydroelectric storage – PHS*) é o ESS de larga escala mais amplamente implementado. Normalmente, o sistema consiste em dois reservatórios localizados em diferentes elevações, uma unidade para bombear água para elevação alta, que será armazenada na forma de energia potencial hidráulica, e uma turbina para gerar eletricidade com a água retornando para o reservatório inferior. Uma tecnologia muito

comum no mundo são as usinas hidroelétricas reversíveis, que são baseadas no mesmo princípio da PHS, mas com uma ligeira diferença no foco da tecnologia das turbinas, que podem funcionar tanto para bombear água para o reservatório superior quanto para gerar eletricidade ao liberar água.

2.1.1.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR AR COMPRIMIDO

O armazenamento de energia por ar comprimido (Compressed Air Energy Storage – CAES) é uma tecnologia avançada capaz de oferecer uma grande capacidade de armazenamento energético. O sistema é composto por cinco principais componentes: um motor/gerador com um sistema de acoplamento que alterna a conexão entre compressor e turbina; um compressor de múltiplos estágios com intercooler e aftercooler para otimizar a compressão e reduzir a umidade do ar comprimido; turbinas de alta e baixa pressão; uma cavidade ou recipiente, como cavernas subterrâneas impermeáveis, para armazenar o ar comprimido; e equipamentos de controle e auxiliares, incluindo unidades de armazenamento de combustível e trocadores de calor. O funcionamento do CAES é dividido em dois ciclos: durante o ciclo de armazenamento, que ocorre em períodos de baixa demanda de eletricidade, o excesso de energia é utilizado para comprimir o ar, que é mantido em alta pressão nas cavernas ou recipientes. No ciclo de recuperação, que ocorre quando a demanda por eletricidade aumenta, o ar comprimido é aquecido, geralmente por uma fonte de calor, e expandido em turbinas, gerando eletricidade.

2.1.2 ARMAZENAMENTO ELETROMAGNÉTICO

O armazenamento de energia eletromagnética abrange diversas tecnologias que armazenam energia na forma de campos elétricos ou magnéticos. São tecnologias bastante úteis para fornecer energia de forma eficiente, com resposta rápida e que exigem alta densidade de energia. A seguir, será exposto duas das principais tecnologias de armazenamento eletromagnético.

2.1.2.1 CAPACITORES E SUPERCAPACITORES

Capacitores e supercapacitores são dispositivos de armazenamento de energia que utilizam campos elétricos para armazenar e liberar energia rapidamente, embora compartilhem o mesmo princípio de funcionamento, possuem diferenças significativas. Os capacitores armazenam energia na forma de um campo elétrico entre duas placas condutoras separadas por

um dielétrico; quando uma placa é carregada por uma fonte de corrente contínua, a outra placa adquire uma carga de sinal oposto, criando um campo elétrico. Entretanto, uma limitação dos capacitores é sua baixa densidade de energia, ou seja, armazenam menos energia por unidade de volume ou peso em comparação com baterias, o que restringe suas aplicações principalmente a filtros de energia, circuitos de temporização e armazenamento temporário de energia.

Em contrapartida, os supercapacitores eletroquímicos representam um avanço significativo, oferecendo uma capacitância e densidade de energia muito superiores aos capacitores convencionais. Essa tecnologia armazena energia por meio de uma solução eletrolítica entre dois condutores sólidos, com eletrodos frequentemente feitos de carbono poroso. Supercapacitores destacam-se pela alta eficiência de carga e descarga, geralmente superior a 90%, e maior densidade de energia em comparação aos capacitores tradicionais, embora ainda inferior à das baterias. Suas principais aplicações incluem fontes de alimentação de emergência, estabilização de redes elétricas e suavização da intermitência das energias renováveis.

2.1.2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MAGNÉTICA SUPERCONDUTORA

O armazenamento de energia magnética supercondutora (*Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES*) é uma tecnologia armazena energia elétrica diretamente da corrente elétrica que passa por uma bobina, feita de material supercondutor e circular, para que a corrente possa circular indefinidamente com quase nenhuma perda. Além disso, o SMES pode ser usado para armazenar energia como o campo magnético criado pelo fluxo de corrente elétrica. Para manter o indutor em seu estado de supercondutor, o mesmo é imerso em hélio líquido contido em um criostato isolado a vácuo.

As principais vantagens dessa tecnologia são rápida resposta, sendo capaz de absorver ou fornecer grandes quantidades de energia quase instantaneamente, alta eficiência nos ciclos de carga/descarga, podendo ser maior que 97%, e uma longa vida útil, com um número virtualmente ilimitado de carga e descarga sem degradação. Dentre as suas desvantagens, se destaca o custo elevado dos materiais supercondutores e do sistema de resfriamento criogênico, a complexidade operacional e a capacidade de armazenamento relativamente baixo, quando comparado com as outras tecnologias de EES.

2.1.3 ARMAZENAMENTO TÉRMICO

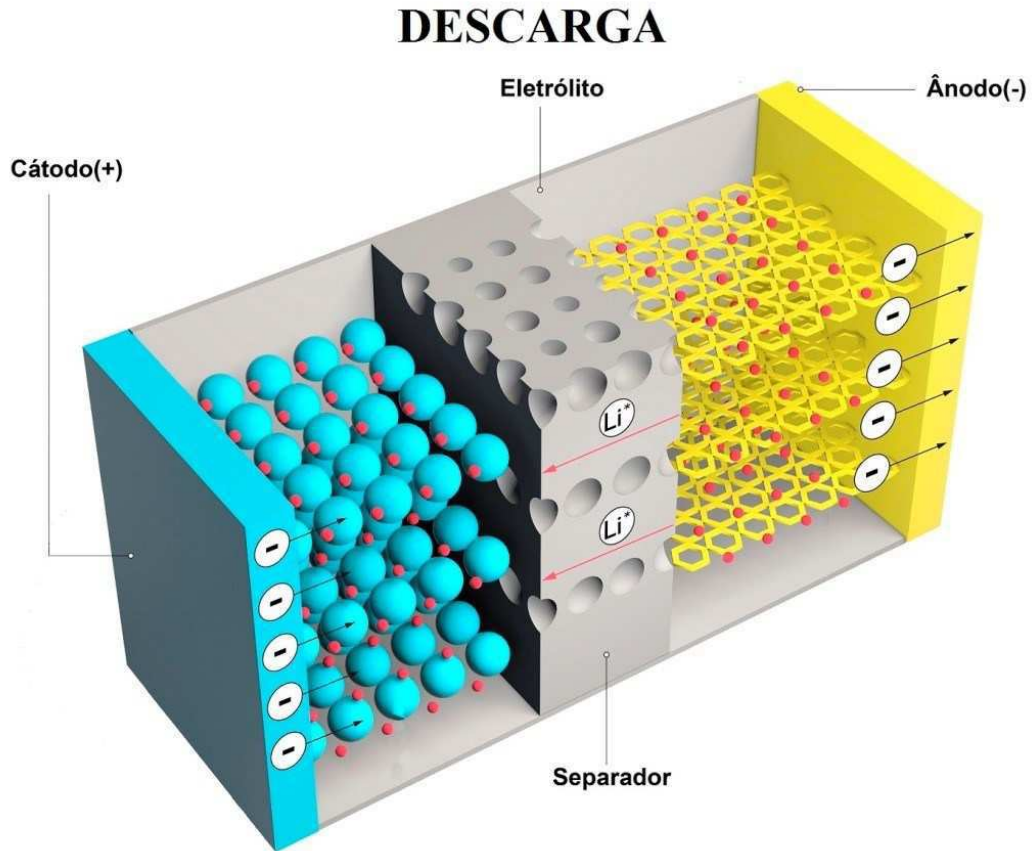
O armazenamento térmico (*Thermal Energy Storage – TES*) é uma tecnologia que armazena energia na forma de calor ou frio, para uso posterior. Os principais componentes são: os tanques de armazenamento, que são utilizados para armazenar matérias de armazenamento e devem ser bem isolados para minimizar as perdas térmicas; trocadores de calor, que são utilizados para transferir calor entre o material de armazenamento e o sistema que utiliza o calor armazenado; bombas e válvulas, para controlar o fluxo de materiais e calor dentro do sistema; materiais de mudança de fase, substâncias que absorvem e liberam calor durante a mudança de fase; materiais hidrocópicos, que são utilizados em sistemas termoquímicos para absorver e liberar vapor de água.

2.1.4 ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICO

As baterias é a forma mais antiga de armazenamento de eletricidade, armazenando-a na forma de energia química, durante o processo de carga, e convertendo, de volta, em energia elétrica durante o processo de descarga, através das reações eletroquímicas que ocorrem entre seus componentes internos: ânodo (eletrodo negativo), cátodo (eletrodo positivo) e eletrólito. O funcionamento das baterias durante os processos de carga e descarga é de suma importância para entender como é possível armazenar e liberar energia.

No processo de descarga, a energia química armazenada é convertida em energia elétrica. Quando uma carga é conectada à bateria é criado um caminho para o fluxo de elétrons, que se movem do ânodo para o cátodo através de um circuito externo, fornecendo energia a carga. No ânodo, ocorre uma reação de oxidação, onde seu material libera íons positivos para o eletrólito e elétrons para o circuito externo. Simultaneamente, no cátodo, ocorre o processo de redução, onde os íons positivos do eletrólito se combinam com os elétrons vindo do circuito externo, formando o material do cátodo.

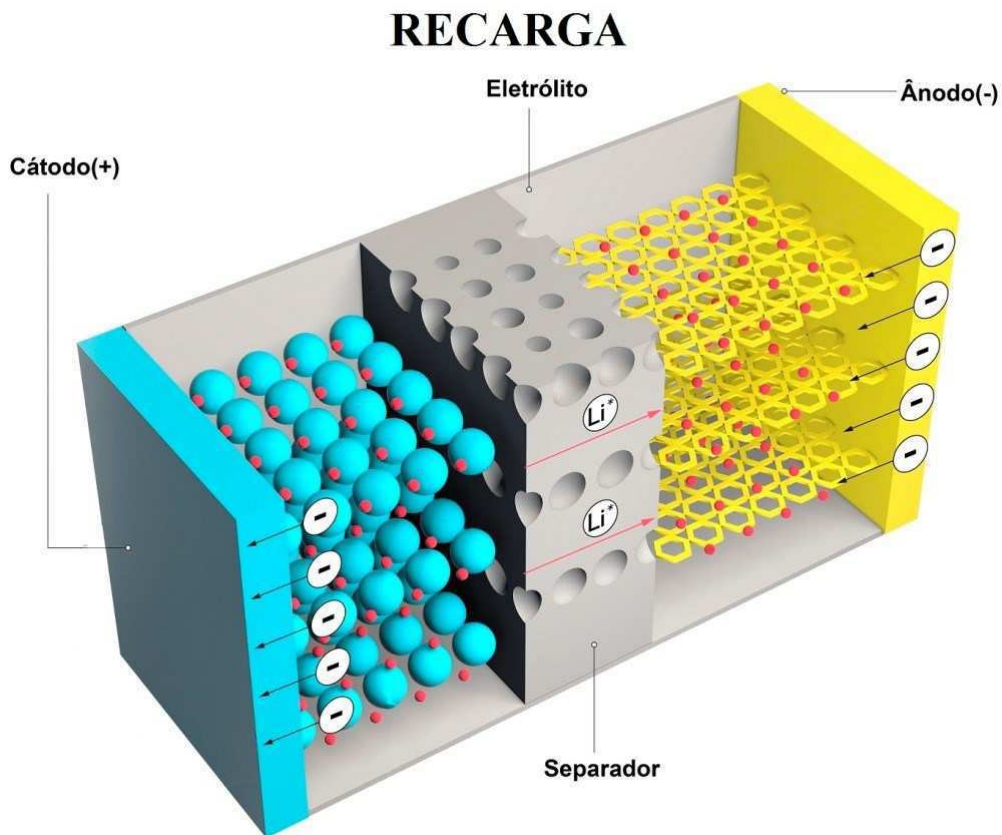
Figura 2 - Processo de descarga da bateria



Fonte: Sistema de tecnologia aplicada (STA)

Durante o processo de carga, a energia elétrica é convertida em energia química, através da aplicação de uma corrente elétrica por uma fonte de energia externa, forçando os elétrons a se mover do cátodo para o ânodo, através de um circuito externo. No ânodo, ocorre uma reação de redução, onde os íons positivos do eletrólito se combinam com os elétrons vindo do circuito externo, formando o material do ânodo. No cátodo, de forma simultânea, ocorre uma reação de oxidação, onde o material do cátodo libera íons positivos para o eletrólito e elétrons que retornam do circuito externo.

Figura 3 - Processo de carga da bateria



Fonte: Sistema de tecnologia aplicada (STA)

O armazenamento de energia em baterias é crucial para a transição energética limpa e sustentável, proporcionando soluções flexíveis e eficientes para diversas aplicações. Existem muitas tecnologias de baterias que são usadas para diferentes tipos de projetos, dentre as principais temos: chumbo-ácido, íon de lítio, níquel-cádmio, íon de sólido e baterias de fluxo. Entretanto, será direcionado os estudos para as baterias de chumbo-ácido e íon de lítio, pois são as mais usadas nos projetos dos BESS.

2.1.4.1 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

As baterias de chumbo-ácido são compostas por duas placas de chumbo, o ânodo, e dióxido de chumbo, o cátodo, que são imersas em uma solução de ácido sulfúrico, o eletrólito. Durante a descarga, o chumbo do ânodo reage com os íons de sulfato do eletrólito, para formar o sulfato de chumbo e liberar elétrons. De forma simultânea, o dióxido de chumbo do cátodo reage com íons de hidrogênio e sulfato, formando sulfato de chumbo e água, enquanto recebe elétrons, esse fluxo de elétrons gera a corrente elétrica necessária para alimentar uma carga externa. No processo de carregamento da bateria, uma fonte externa de corrente elétrica é

aplicada, invertendo as reações do cátodo e do ânodo, seguindo o mesmo princípio mostrado anteriormente.

Dentre as principais vantagens, se destaca o baixo custo de fabricar e comprar essa tecnologia de bateria, sua alta confiabilidade, alta densidade de energia, elevado número de ciclos de carga e descarga, e são altamente recicláveis, tendo cerca de 99% dos materiais sendo recuperados. Nas desvantagens, se sobressai a curta vida útil quando comparada com outras baterias, o grande peso e volume, e a possível liberação de gases tóxicos se forem sobrecarregadas ou danificadas.

É possível encontrar as baterias de chumbo-ácido em diversas aplicações, se destacando principalmente na indústria automotiva, principalmente para sistemas de partida, iluminação e ignição. São usadas como fonte de backup para estações de telecomunicações e outros equipamentos críticos, e também são empregadas em sistemas de energia de reserva, como por exemplo em sistemas de emergência hospitalar, pelo fato da sua confiabilidade e baixo custo. Com o crescimento da energia solar fotovoltaica, essa tecnologia de baterias é utilizada para o armazenamento da energia gerada durante o dia para ser usada posteriormente, conhecido como sistemas *off-grid*.

2.1.4.2 BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

As baterias de íon-lítio também possuem o mesmo princípio de funcionamento do armazenamento eletroquímico, operando através da movimentação do íon de lítio entre o ânodo e o cátodo. Durante a carga, os íons de lítio se movem do cátodo, geralmente feito de óxido de cobalto de lítio, para o ânodo, tipicamente grafite, armazenando energia. Na descarga, o processo é revertido, liberando energia elétrica para alimentar a carga.

Dentre as principais vantagens, se destaca: a alta densidade de energia, permitindo armazenar mais energia por unidade de peso; baixa autodescarga, durante o não uso a bateria perde carga mais lentamente; sem efeito memória, podendo ser descarregada em qualquer nível de carga sem degradar a capacidade. Nas desvantagens, dois pontos se sobressaem: o risco de sobreaquecimento, podendo ocorrer sobreaquecimento ou explosão em condições de falhas; grande impacto ambiental, pois, diferentemente da chumbo-ácido que pode ser reciclada quase que 100%, a extração de lítio e o descarte inadequado das baterias podem ser prejudiciais ao meio ambiente.

Por conta de suas vantagens as baterias de íon de lítio se destacam no mercado internacional, possuindo diversas aplicações. Devido à sua alta densidade de energia, dispositivos eletrônicos, como, smartphones, laptops e tablets usam essa tecnologia para armazenamento e fornecimento de energia. Entretanto, as grandes aplicações das baterias de íon-lítio se encontram nos veículos elétricos, por serem capazes de fornecer energia de forma eficiente e compacta, e no armazenamento de energia em larga escala, empregadas em sistemas de geração de energia renovável, para otimizar a utilização.

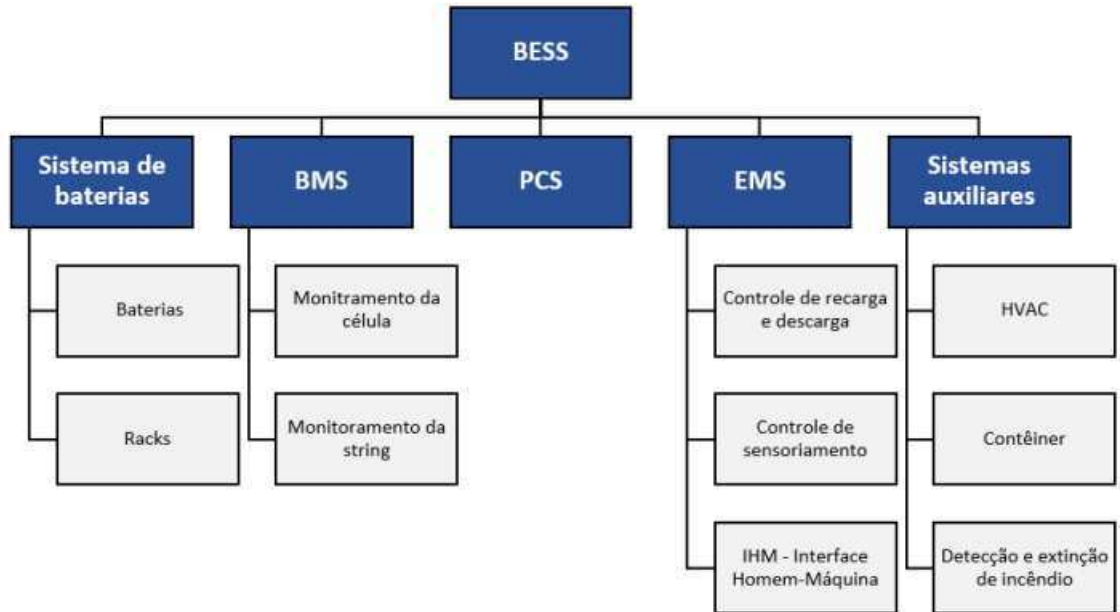
2.2 COMPONENTES DO BESS

Ao longo de quase um século, os sistemas de energia em todo o mundo se concentram em três funções principais: geração, transmissão e distribuição de eletricidade como uma *commodity* em tempo real. A física exige que a geração seja constantemente equilibrada com a demanda, independentemente de sua variabilidade, em intervalos de milissegundos. Com o aumento da penetração de fontes de energia renováveis variáveis, a redução da geração baseada em combustíveis fósseis e o perfil de consumo cada vez mais diversificado, os operadores do sistema estão implementando novos métodos para manter o equilíbrio da rede. Um dos métodos mais inovadores e promissores é o sistema de armazenamento por baterias.

O BESS é um sistema de armazenamento de energia crucial para alcançar a descarbonização no setor elétrico. Esses sistemas de armazenamento por baterias podem armazenar o excesso de energia elétrica gerada por fontes renováveis variáveis, funcionando de maneira similar às baterias que usamos em nossos dispositivos diários, convertendo uma reação química em energia elétrica, armazenando-a para uso conforme necessário. A integração desses sistemas no setor elétrico é vista como uma abordagem significativa para fornecer serviços ancilares, otimizar a geração de fontes renováveis variáveis e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia proveniente de fontes fósseis.

O BESS é constituído por um Banco de Baterias, um Sistema de Monitoramento de Baterias (*Battery Management System - BMS*), um Sistema de Conversão de Potência (*Power Conversion System - PCS*), um Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System - EMS*) e componentes auxiliares, como sensores e extintores de incêndio. A vida útil das baterias de um BESS varia entre 10 e 15 anos, podendo ser estendida dependendo de suas características de construção, como o tipo de bateria química, padrões de uso, condições de operação e manutenção. Nessa sessão, iremos conhecer de forma detalhada cada um dos componentes do BESS.

Figura 4 - Componentes do BESS



Fonte: Acervo da Moura

2.2.1 SISTEMA DE BATERIAS

O Sistema de Baterias é o subsistema responsável por armazenar e liberar energia conforme solicitado. Todo processo de integração do sistema, desde a célula até o sistema de baterias apresentam uma estrutura de montagem modular, flexível e de fácil manutenção. Pode ser conectado em série ou em paralelo, dependendo da quantidade de energia necessária para cada aplicação. Este sistema é organizado em diferentes níveis de hierarquia:

- **Célula:** É o menor nível do sistema de baterias, composto por células de 2 V cuja capacidade em Ah varia conforme a densidade energética exigida pelo projeto, são conectadas em série e/ou paralelo para formar o módulo;
- **Módulo:** Pode ser entendido como o produto intermediário entre célula e *pack*;
- **Pack:** consiste em uma combinação de módulos com um padrão de design para facilitar a instalação e manutenção;
- **Racks:** Consiste em uma combinação de *packs* montados em um gabinete;
- **Strings:** O terceiro nível da hierarquia, que consiste na conexão de seis *racks* em série;
- **Banco de Baterias:** O nível mais alto da hierarquia, composto por *strings* conectadas em paralelo.

Figura 5- Níveis de hierarquia do sistema de baterias



Fonte: Acervo da Moura

2.2.1.1 PRINCIPAIS PARÂMETROS DAS BATERIAS

Compreender e monitorar os parâmetros das baterias é crucial para a operação eficiente e segura dos sistemas de armazenamento de energia. Eles permitem otimizar o desempenho da bateria, prolongar sua vida útil, garantir a segurança e maximizar a eficiência energética do sistema (João Henrique, 2015).

1. **Energia:** Associada a capacidade de produzir trabalho, mede em Ws (watt/segundos, Nm (newton/metro) ou J (joule));
2. **Potência:** Energia transferida, consumida ou fornecida, por unidade de tempo, mede-se em W (watt);
3. **Tensão:**
 - **Tensão Nominal:** A tensão típica fornecida por uma célula ou bateria;
 - **Tensão de Operação:** A faixa de tensão em que a bateria opera de forma segura;
 - **Tensão de Corte:** A tensão mínima que uma célula pode atingir antes de ser considerada descarregada;
4. **Corrente:**
 - **Corrente de Carga:** A taxa na qual a bateria está sendo carregada;
 - **Corrente de Descarga:** A taxa na qual a bateria está fornecendo energia;
 - **Corrente de Pico:** A corrente máxima que a bateria pode fornecer em curtos períodos;
5. **Ciclo de vida:** Número de ciclos completos de carga e descarga que uma bateria pode suportar antes que sua capacidade diminua significativamente;

6. **Temperatura de operação:** A faixa de temperatura na qual a bateria pode operar de forma segura e eficiente;
7. **Densidade de energia:** Quantidade de energia armazenada por volume ou massa, podendo expressar-se em Wh/d³ ou Wh/kg;
8. **Densidade de potência:** Potência disponível por unidade de volume ou massa, W/d³ ou W/kg;
9. **Taxa de Autodescarga:** A taxa na qual a bateria perde carga quando não está em uso;
10. **Impedância interna:** A resistência interna da bateria que afeta sua capacidade de fornecer corrente. Impedância alta pode indicar envelhecimento ou defeitos na bateria;
11. **Eficiência:**
 - **Eficiência Coulombiana:** A relação entre a carga de saída durante a descarga e a carga de entrada durante a carga;
 - **Eficiência Energética:** A relação entre a energia de saída e a energia de entrada;
12. **Capacidade:**
 - **Capacidade Nominal:** A quantidade de carga que a bateria pode armazenar, geralmente medida em ampere-hora (Ah);
 - **Capacidade Real:** A quantidade real de carga que a bateria pode armazenar, que pode ser menor do que a nominal devido a fatores como a idade e as condições de operação;
13. **Tempo de descarga:** período durante o qual a bateria pode fornecer energia antes de precisar ser descarregada;
14. **Profundidade de descarga (*Depth of Discharge – DoD*):** Indica a quantidade de carga que foi removida da bateria, também expressa em porcentagem. Por exemplo, se uma bateria de 100 Ah tiver 60 Ah removidos, o DoD será de 60%.
15. **Estado de carga (*State of Charge – SoC*):** Representa o nível de carga atual da bateria em relação à sua capacidade total, expressa em porcentagem (%). Um SoC de 100% significa que a bateria está totalmente carregada, enquanto um SoC de 0% significa que está completamente descarregada.

16. Estado de Saúde (*State of Health – SoH*): Uma medida da condição geral da bateria em comparação com seu estado novo. Expressa em porcentagem, indica a capacidade restante e a eficiência da bateria.

17. Taxa de Carga/Descarga (C-rate): Uma medida que indica a taxa na qual a bateria é carregada ou descarregada em relação à sua capacidade nominal.

2.2.1.2 MÉTODOS PARA CARREGAR BATERIAS

Existem vários métodos para carregar baterias, e a escolha do método apropriado depende do tipo de bateria, da aplicação, dos requisitos de carga específicos e seguir as instruções do fabricante. Será especificado os quatro métodos mais aplicados as tecnologias de baterias de chumbo-ácido e íon-lítio:

- 1. Carregamento de corrente constante:** O carregador fornece uma corrente constante à bateria até que a tensão atinja um valor pré-determinado. Aplicadas geralmente em baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio (NiCd). Suas principais vantagens são a simplicidade e controle preciso da corrente de carga. Como desvantagens temos a sobrecarga se não for monitorado adequadamente;
- 2. Carregamento de tensão constante:** O carregador mantém uma tensão constante e a corrente diminui conforme a bateria se aproxima da carga completa. Aplicadas geralmente em baterias de íon de lítio (Li-ion). Suas principais vantagens são a redução do risco de sobrecarga e a prolongação da vida útil da bateria. A principal desvantagem é o tempo de carga mais longo.
- 3. Carregamento de corrente constante com tensão constante:** Combinação dos métodos mencionados anteriormente. Primeiro, carrega a bateria com corrente constante até que a tensão atinja um nível específico, depois mantém essa tensão enquanto a corrente diminui. Aplicadas geralmente em baterias de íon de lítio (Li-ion). Dentre as principais vantagens se destaca o equilíbrio entre velocidade de carga e segurança. A desvantagem é a maior complexidade em relação aos métodos isolados;
- 4. Carregamento rápido:** Usa uma corrente alta para carregar a bateria rapidamente, monitorando continuamente a temperatura e a tensão para evitar danos. Aplicadas geralmente em baterias de íon de lítio e NiMH. A principal vantagem é a redução significativa do tempo de carga. Por consequência, as principais desvantagens são o aquecimento excessivo e desgaste se não for bem controlado.

Monitorar a temperatura e a tensão durante o carregamento é crucial para evitar sobrecarga e sobreaquecimento, que podem causar falhas na bateria ou até incêndios. Métodos de carregamento eficientes prolongam a vida útil da bateria e reduzem o tempo de inatividade. Diferentes tipos de baterias têm características e requisitos de carregamento específicos, sendo essencial usar o método de carregamento adequado para cada tipo de bateria.

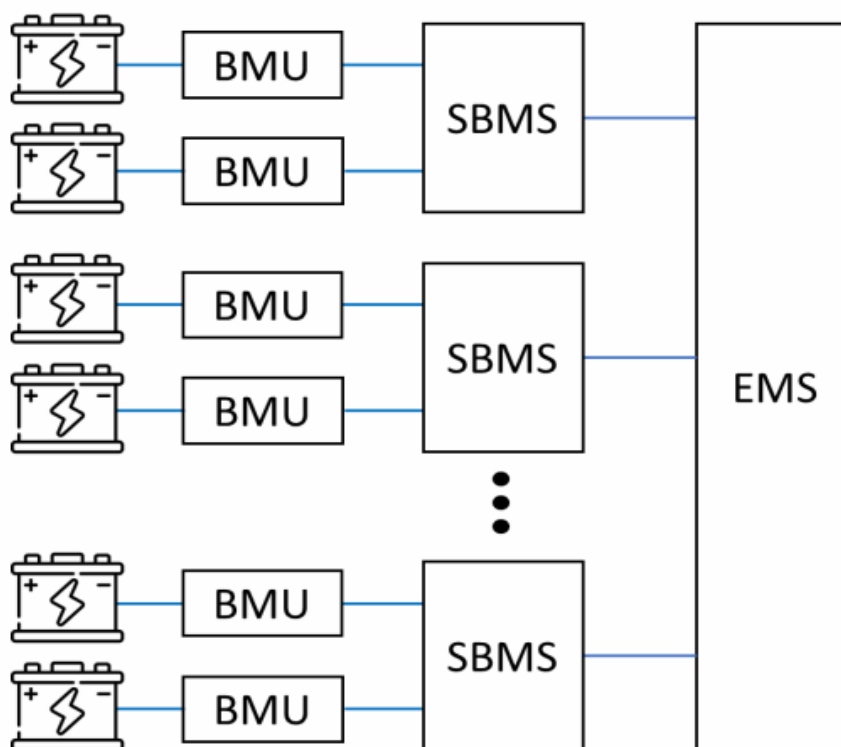
2.2.2 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS

Sistema de Gerenciamento de Baterias (*Battery Management System - BMS*) é um sistema eletrônico responsável por monitorar e gerenciar um sistema de baterias, podendo atuar em nível de célula, bateria, pack de bateria e rack de bateria. Sua principal função é manter o desempenho, a segurança e a durabilidade dos sistemas constituídos por baterias, a partir do correto gerenciamento das baterias.

O BMS coleta, processa e armazena informações importantes do processo de operação das células em tempo real, além de realizar a proteção do sistema de baterias, garantindo, assim, uma operação segura e uma maior vida útil ao equipamento. O sistema de gerenciamento deve monitorar continuamente as condições de operação da bateria e atuar para interromper situações prejudiciais, desligando a bateria ou alterando as taxas de carga/descarga. Dessa forma, é de suma importância para a segurança do BESS, evitando condições que poderiam levar a falhas catastróficas, como incêndios ou explosões, protegendo tanto o equipamento quanto os usuários. Dessa forma, o BMS é dividido em dois níveis de gerenciamento e as principais funções são:

- **Nível 1:** A unidade de gerenciamento das baterias (*Battery Management unit – BMU*) monitora a tensão, a temperatura do polo negativo e a resistência interna das células. Também é responsável pela equalização das baterias, garantindo uma recarga uniforme de todas as células. As informações são transmitidas para o nível 2 em tempo real;
- **Nível 2:** O sistema de gerenciamento de *string* (*String Battery Management System – SBMS*) monitora a tensão total e a corrente total do sistema de armazenamento, além de calcular o SoC e SoH do banco de baterias. O SBMS realiza a comunicação com os outros equipamentos do sistema, transmitindo em tempo real para o EMS todas as informações coletadas e o status do banco de baterias. Outra função deste nível é da proteção de cada *string*, utilizando parâmetros algumas informações inseridas pelo usuário.

Figura 6 – Níveis de gerenciamento do BMS



Fonte: Acervo da Moura

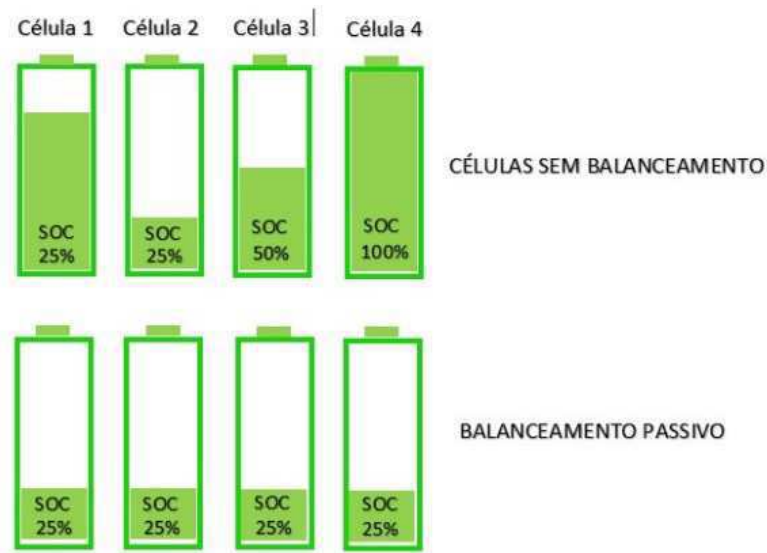
A equalização é uma tarefa crítica realizada pelo BMS para garantir níveis de carga uniforme entre todas as células de uma bateria. Isso é importante porque discrepâncias nos níveis de carga das células podem levar a uma degradação acelerada de algumas células, reduzindo a eficiência e a vida útil da bateria. A equalização pode ser realizada através dos métodos passivo ou ativo.

1. Equalização passiva: Envolve a dissipação de energia das células com maior carga na forma de calor. Isso é feito por meio de resistores (podendo ser resistores fixos, resistores com diodo zener ou resistores com chaves controladas) que são conectados às células com carga mais alta para descarregar o excesso de energia. A equalização passiva é comumente usada em aplicações onde a simplicidade e o baixo custo são prioritários e onde a eficiência energética não é uma preocupação crítica.

- As principais vantagens são a simplicidade, pois o circuito de equalização passiva é relativamente simples e barato de implementar, e a confiabilidade, já que possui um menor número de componentes ativos, o que pode resultar em maior confiabilidade do sistema;

- Dentre as principais desvantagens temos a ineficiência, pois a energia é desperdiçada na forma de calor, resultando em perdas de energia, e por consequência, a dissipação de calor precisa ser gerenciada adequadamente para evitar superaquecimento.

Figura 7 - Balanceamento passivo



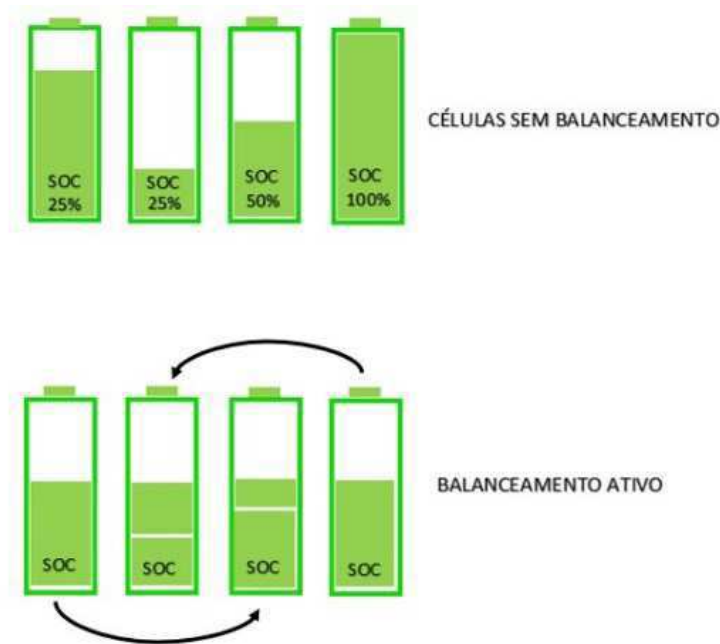
Fonte: Sistema de tecnologia aplicada (STA)

2. Equalização ativa: Envolve transferir energia das células com maior carga para as células com menor carga. Existem várias abordagens, incluindo o uso de capacitores, indutores ou circuitos de conversão de energia. A equalização ativa é preferida em aplicações onde a eficiência energética é crítica, como em veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia de grande escala, onde o custo adicional e a complexidade são justificáveis.

- Baseada em Capacitores: Usa capacitores para transferir carga entre células;
- Baseada em Indutores: Usa indutores e conversores de energia para mover a carga de uma célula para outra;
- Conversores Bidirecionais: Usa conversores bidirecionais para transferir energia entre células de maneira controlada;
- Dentre as vantagens se destaca a alta eficiência, pois a energia é redistribuída em vez de ser dissipada como calor, resultando em maior eficiência, e permite um balanceamento mais preciso e rápido das células.

- As principais desvantagens são a maior complexidade e investimento para a implementação, além de um maior número de componentes ativos, o que pode reduzir a confiabilidade e aumentar a complexidade de gerenciamento térmico.

Figura 8 - Balanceamento ativo



Fonte: Sistema de tecnologia aplicada (STA)

A equalização das células é uma função crítica do BMS para manter a saúde e o desempenho da bateria. A escolha entre equalização passiva e ativa depende das necessidades específicas do sistema, incluindo considerações de custo, eficiência e complexidade. Ambas as abordagens têm suas vantagens e desvantagens, e a escolha deve ser baseada nos requisitos da aplicação e nas prioridades do projeto.

O monitoramento tende a proteger contra condições que possam causar danos ou apresentar riscos à segurança, realizando ações para neutralizar cenários como sobrecarga, sobrecorrente, curto-circuito, sobreaquecimento e descargas profundas, reduzindo a perda de capacidade e a deterioração ao longo do tempo, prolongando a vida útil da bateria e aumentando a confiabilidade do sistema. Na Figura 9, é exposto as principais funções do sistema de gerenciamento de baterias.

Figura 9 - Funções do BMS

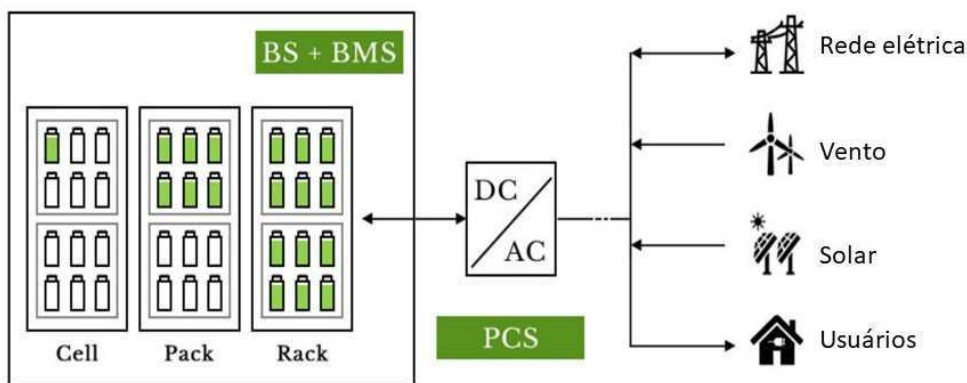


Fonte: Próprio autor

2.2.3 SISTEMA DE CONVERSÃO DE POTÊNCIA

O sistema de Conversão de Potência (*Power Conversion System - PCS*) é uma parte fundamental dos Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS). Ele desempenha o papel crucial de converter a corrente contínua (DC) armazenada nas baterias em corrente alternada (AC), que pode ser utilizada na rede elétrica ou em aplicações locais. Além disso, o PCS permite a conversão bidirecional, facilitando tanto a carga das baterias com energia da rede ou de um sistema de geração externo, quanto a descarga para a rede ou cargas locais, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Funcionamento do PCS



Fonte: MORNSUN (Adaptado)

Além disso, o PCS permite a operação em dois modos principais: conectado à rede, onde as referências de tensão e frequência são fornecidas por uma fonte externa e o PCS opera com referências para fornecimento de potência ativa e reativa; ilhado, onde o PCS gerencia o fornecimento e controle de tensão e frequência sem necessitar de uma fonte de referência externa. Além de incluir funcionalidades de proteção, como sub e sobre tensão e sub e sobre frequência, o equipamento possui proteção anti-ilhamento, que pode ser desativada para operações de contingência.

As topologias do conversor em cada estágio são classificadas em topologias com transformador ou sem transformador. Se dispositivos de baixa tensão forem utilizados no estágio DC/AC para topologias de dois ou três níveis, um transformador elevador é necessário para conectar o BESS à rede de média tensão. Uma desvantagem dessas topologias é a alta corrente no lado de baixa tensão do transformador, o que pode reduzir sua eficiência. Portanto, tendências de tecnologias de conversores DC/AC sem transformador estão sendo aplicadas em BESS, como a de dois níveis com interruptores em série e o conversor multinível modular (Xavier, Lucas. et al, 2019).

A integração de PCS no BESS não apenas melhora a eficiência energética, mas também prolonga a vida útil das baterias e contribui significativamente para a estabilidade e flexibilidade da rede elétrica. Dentre suas principais funções, podemos destacar:

- 1. Conversão de Energia:** O PCS converte a energia DC das baterias em AC, adequada para uso na rede elétrica ou em aplicações de consumo. Da mesma forma, converte a energia AC da rede em DC para armazenar nas baterias durante períodos de baixa demanda.
- 2. Eficiência Energética:** Sistemas PCS avançados são projetados para minimizar perdas de energia durante o processo de conversão, aumentando a eficiência geral do BESS. A eficiência pode ser influenciada por fatores como condição de carga, temperatura e qualidade dos componentes utilizados.
- 3. Estabilidade e Confiabilidade da Rede:** O PCS fornece serviços de suporte à rede, respondendo rapidamente a flutuações de demanda e geração, ajudando a manter uma rede equilibrada e resiliente.
- 4. Flexibilidade para Várias Aplicações:** Sistemas PCS modernos oferecem flexibilidade para diversas aplicações, como integração de energias renováveis, estabilização da rede e fornecimento de energia de backup.

5. **Segurança e Proteção:** Inclui recursos como detecção de falhas, isolamento e procedimentos de desligamento do sistema para proteger tanto o BESS quanto os sistemas elétricos conectados.
6. **Monitoramento e Controle de Dados:** Sistemas PCS contemporâneos vêm com sistemas de controle avançados que fornecem dados em tempo real, diagnósticos do sistema e capacidades de controle remoto.

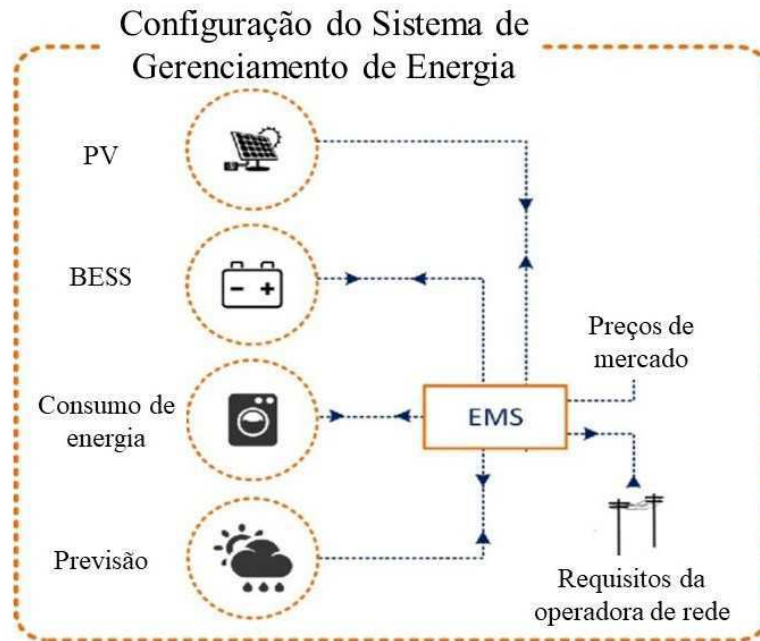
Os sistemas de conversão de energia são elementos essenciais dos sistemas de armazenamento de energia em baterias. Sua operação eficiente e funcionalidades avançadas não apenas permitem a integração perfeita do BESS com a rede, mas também contribuem para a estabilidade, confiabilidade e longevidade do sistema de armazenamento de energia. A medida que a tecnologia continua a evoluir, o papel do PCS em contêineres BESS será fundamental na formação do futuro da indústria de armazenamento de energia, abrindo novas possibilidades para um futuro energético mais limpo e resiliente.

2.2.4 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA

O sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System - EMS*) funciona como a interface crucial entre a demanda da rede elétrica e o BMS. Monitorando continuamente as necessidades da rede e gerenciando a transferência de energia do sistema de armazenamento de energia em bateria. Isso é realizado através da aplicação de lógica de controle, onde o EMS emite sinais para iniciar a carga ou descarga das baterias, conforme necessário, baseando-se nos requisitos definidos pela lógica de controle e no estado de carga (SoC) do sistema de baterias (Nashvinder Singh; Jigeesha Upadhaya, 2021).

Adicionalmente, um EMS pode atuar como um sistema abrangente de gerenciamento de energia que equilibra múltiplos recursos de geração de acordo com as demandas da rede. Em uma configuração que combina a geração fotovoltaica e armazenamento, o EMS é capaz de equilibrar as saídas tanto do sistema solar quanto do sistema de baterias. O sistema de gerenciamento determina os momentos ideais para iniciar a descarga das baterias, fornecendo energia armazenada para a rede, e quando interromper a descarga e iniciar a carga, baseado no cenário de produção e nos acordos contratuais com os clientes. Além disso, o EMS pode ser programado para decidir se o sistema de baterias deve ser carregado a partir dos recursos PV ou diretamente da rede elétrica. Na Figura 11 é possível observar uma configuração do EMS, sabendo, que a depender das especificações do cliente, mais cenários podem ser acrescentados no sistema de gerenciamento.

Figura 11 - Configuração do EMS



Autor: Florides, Michalis, et al. 2019 (Adaptado)

O Sistema de Gerenciamento de Energia é uma ferramenta avançada projetada para otimizar o gerenciamento, a distribuição e a utilização de recursos energéticos. Este software desempenha um papel crucial ao permitir que os provedores de energia administrem o fornecimento de maneira eficiente, respondam às demandas dos consumidores e mantenham a estabilidade da rede elétrica. Suas funcionalidades abrangem uma ampla gama de aplicações essenciais para o fornecimento moderno de energia, assegurando uma operação equilibrada e sustentável do sistema energético. Dentre suas funcionalidades, destacam-se:

- 1. Monitoramento e controle de energia:** O EMS monitora a demanda da rede e controla a transferência de energia do BESS. Decidindo quando carregar ou descarregar as baterias com base nas necessidades da rede e no estado de carga (SOC) do sistema de baterias;
- 2. Integração com SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*):** O sistema SCADA se comunica com o BMS para monitorar a saúde da bateria, temperatura, avisos de incêndio, saída, tensão e SOC. Se houver algo errado com o sistema de bateria, o sistema SCADA pode alertar o operador por meio de um alarme. Esse monitoramento ajuda a garantir que o SOC seja mantido e carregado continuamente, seja pela rede ou PV. O EMS pode se integrar com sistemas SCADA para monitorar

e controlar dispositivos em toda a planta de energia, permitindo que operadores monitorem e controlem as operações do sistema de armazenamento de energia;

3. **Estratégia de controle:** O EMS pode ser programado para gerenciar a carga e descarga das baterias com base em cenários de produção e acordos com clientes. Também decide se as baterias devem ser carregadas a partir de recursos de energia renovável (como PV) ou da rede. Sendo fundamental para equilibrar múltiplos recursos de geração e assegurar que a saída de energia do PV e do sistema de baterias seja otimizada;
4. **Capacidade firme:** O BESS ajuda a garantir uma capacidade de produção/transmissão disponível em um dado momento, especialmente importante para integrar fontes de energia renovável intermitentes;
5. **Arbitragem de energia:** O EMS gerencia a carga das baterias quando os preços da eletricidade são baixos e a descarga quando os preços são altos, permitindo uma otimização econômica do uso de energia armazenada;
6. **Serviços de confiabilidade de curto e longo prazo:**
 - Resposta Rápida de Frequência: O EMS permite que o BESS forneça uma resposta rápida à frequência, contribuindo com energia elétrica de forma controlada para minimizar desequilíbrios na rede;
 - Resposta Primária de Frequência: Ajuda a restaurar os níveis normais de frequência na rede após a resposta inicial de frequência rápida, fornecendo suporte contínuo de potência.

O monitoramento e a análise em tempo real fornecidos pelo EMS são essenciais para identificar ineficiências do sistema e falhas potenciais, permitindo uma manutenção rápida e a redução do tempo de inatividade. Essa abordagem proativa no gerenciamento da rede aumenta a confiabilidade do fornecimento de energia aos consumidores.

O sistema de gerenciamento de energia oferece diversos benefícios aos provedores de energia, sendo essencial para aprimorar a eficiência operacional e a sustentabilidade na distribuição de energia. Uma das principais vantagens do EMS é a capacidade avançada de prever a demanda e gerenciar as cargas de maneira eficaz, permitindo que os provedores otimizem a alocação de recursos e evitem a sobrecarga da rede. Dessa forma, EMS é uma ferramenta indispensável para os fornecedores de energia, promovendo eficiência, confiabilidade e sustentabilidade na gestão moderna de energia.

2.2.5 SISTEMAS AUXILIARES

Os sistemas auxiliares em um Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria são componentes essenciais que garantem a segurança, eficiência e confiabilidade da operação do sistema. Entre esses sistemas, destacam-se os contêineres que abrigam os componentes, o sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (*Heating, Ventilation and Air Conditioning - HVAC*), e os sistemas de detecção e supressão de incêndios.

Os contêineres utilizados para BESS são projetados para fornecer um ambiente seguro e controlado para as baterias e equipamentos auxiliares. Esses contêineres são geralmente fabricados com materiais resistentes ao fogo e isolantes para minimizar os riscos de incêndio e proteger os componentes internos de influências externas. Além disso, eles são equipados com sistemas de monitoramento e controle, como sensores de temperatura e gás, para detectar qualquer anomalia e tomar medidas preventivas rapidamente.

O sistema HVAC é crucial para manter as condições ambientais ideais dentro dos contêineres que abrigam as baterias e outros equipamentos eletrônicos. O controle da temperatura e umidade é vital para evitar o superaquecimento das baterias, o que pode levar a falhas e reduzir a vida útil do sistema. Sistemas de HVAC bem projetados garantem que a temperatura dentro do contêiner permaneça dentro de limites seguros, independentemente das condições climáticas externas. Além disso, ventilação adequada também ajuda a dissipar qualquer calor gerado pelas baterias durante os ciclos de carga e descarga. A operação autônoma integrada ao EMS garante otimização de consumo de energia, aumento da vida útil dos equipamentos e segurança ao sistema.

A segurança contra incêndios é uma das principais preocupações em sistemas BESS devido ao risco de *"thermal runaway"*, um fenômeno perigoso que pode ocorrer em baterias, especialmente em baterias de íon-lítio. Esse fenômeno acontece quando uma célula da bateria começa a aquecer descontroladamente devido a uma falha interna ou externa e, se não for controlado, o calor e os gases acumulados podem resultar em incêndios ou até mesmo explosões. Sistemas de detecção de incêndio são implementados para identificar rapidamente o início de um incêndio. Esses sistemas podem incluir detecção de fumaça, calor e gás. Uma vez detectado um incêndio, os sistemas de supressão de incêndio são ativados. Existem várias tecnologias para supressão de incêndios em BESS:

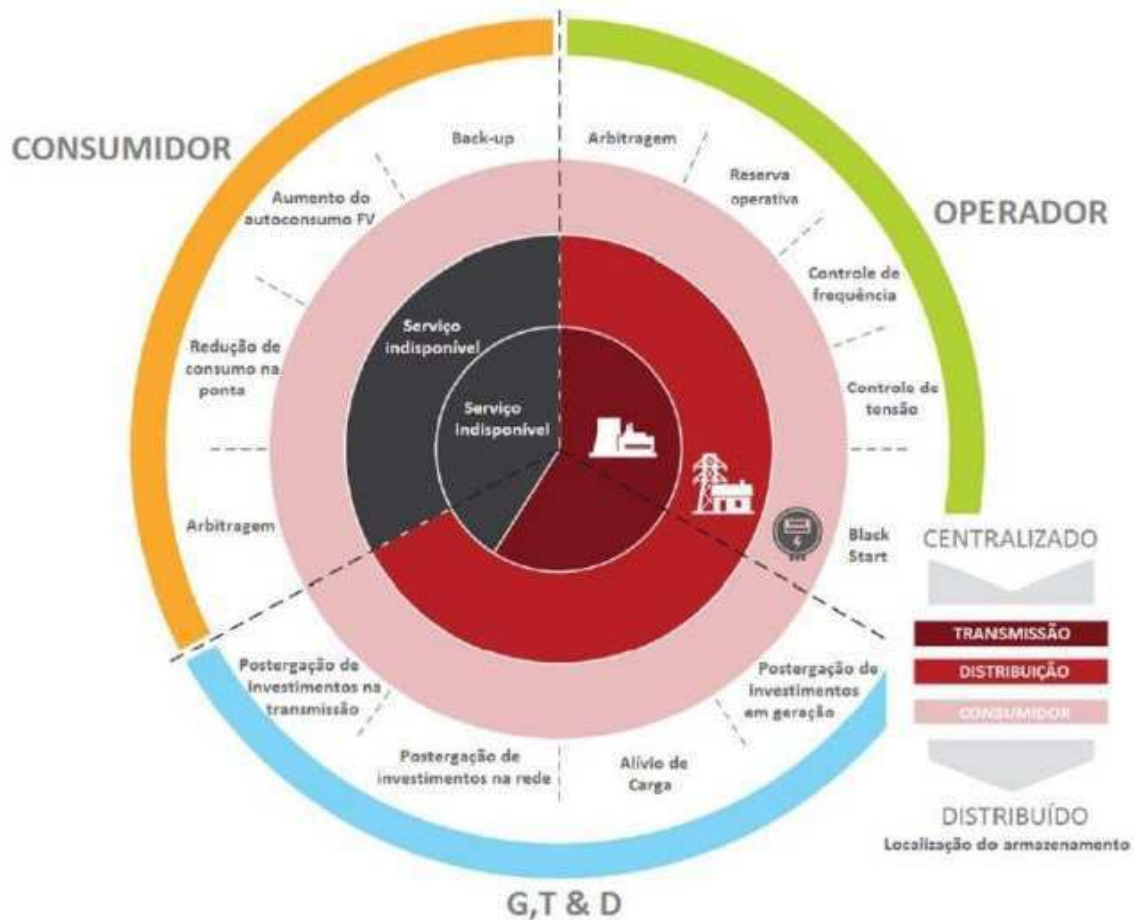
- **Agentes Condensados de Aerossol:** Esses agentes, são eficazes em extinguir incêndios em células de bateria e em prevenir a propagação de "*thermal runaway*" para baterias adjacentes. Eles são projetados para operar em ambientes fechados, sem necessidade de infraestrutura significativa, e são seguros para equipamentos sensíveis;
- **Sistemas de Supressão Baseados em Água:** Tradicionalmente, sistemas de *sprinklers* (sistemas projetados para detectar e extinguir incêndios em seus estágios iniciais) podem não ser adequados para BESS devido à dificuldade de penetração da água nas áreas internas das baterias e o potencial de danos causados pela água aos componentes eletrônicos. No entanto, sistemas de névoa de água podem ser utilizados como uma medida adicional de segurança para resfriar o ambiente e controlar incêndios em áreas adjacentes aos contêineres das baterias;
- **Sistemas de Gás Inerte e CO₂:** Estes sistemas são usados para suprimir incêndios ao reduzir a concentração de oxigênio no ambiente, o que ajuda a impedir a combustão. No entanto, seu uso é mais comum em áreas como salas de controle e outros espaços onde os equipamentos eletrônicos são críticos.

O bom funcionamento dos sistemas auxiliares em um BESS é indispensável para assegurar a segurança, confiabilidade e eficiência do sistema. Investir em tecnologias avançadas de detecção e supressão de incêndios, sistemas HVAC robustos e soluções de monitoramento contínuo é essencial para manter a integridade e a operação eficiente dos sistemas de armazenamento de energia em baterias.

2.3 APLICAÇÕES DO BESS

Sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias desempenham um papel vital na modernização e estabilização das redes elétricas, oferecendo uma vasta gama de aplicações no setor elétrico. Esses sistemas podem ser utilizados em várias áreas, incluindo geração, transmissão, distribuição e uso atrás do medidor, como mostra a Figura 12. A viabilidade de cada aplicação deve ser cuidadosamente avaliada com base nas características e necessidades específicas de cada setor. Avaliar essas necessidades e características é crucial para determinar a solução mais eficaz e econômica para cada aplicação.

Figura 12 - Aplicações do BESS



Fonte: Fitzgerald, Garrett, et al. 2015

Os BESS são usados em várias aplicações cruciais para otimizar o fornecimento e a eficiência energética. As possibilidades de utilização são diversas nos segmentos do SEP, podendo ser instaladas nos sistemas *off-grid*, antes (*BTM, behind-the-meter*) ou depois (*FTM, front-of-meter*) do medidor de energia elétrica. Na geração, os BESS podem ajudar a integrar fontes de energia renovável, armazenando o excesso de produção e fornecendo energia durante períodos de baixa produção. Na transmissão e distribuição, esses sistemas podem melhorar a estabilidade da rede, reduzir picos de demanda e evitar sobrecargas. No uso atrás do medidor, os BESS oferecem benefícios como a redução de custos de energia e aumento da resiliência energética. Os sistemas *off-grid*, por sua vez, são aqueles que operam fora da rede elétrica. Agora, iremos explorar algumas das principais aplicações, entender como funcionam e conhecer alguns sistemas, tanto no Brasil quanto em outras partes do mundo.

- **Aumento do autoconsumo dos sistemas fotovoltaicos**

Os sistemas de armazenamento de energia em bateria permitem que os consumidores maximizem o uso da energia gerada por seus sistemas fotovoltaicos (PV). Durante o dia, quando a produção de energia solar é alta, o excesso de energia pode ser armazenado nas baterias. Esta energia armazenada pode então ser utilizada durante a noite ou em períodos de baixa geração solar, reduzindo a dependência da rede elétrica e aumentando o consumo próprio de energia limpa. Isso não só proporciona economia de custos, mas também contribui para a sustentabilidade energética.

- **Redução de carga de demanda**

A redução de carga de demanda envolve o uso de BESS para diminuir os picos de demanda de energia. Empresas e indústrias frequentemente enfrentam altas tarifas de energia durante períodos de pico de consumo. Ao armazenar energia durante períodos de baixa demanda e liberá-la durante os picos, os BESS ajudam a suavizar a curva de demanda, resultando em tarifas mais baixas e melhor gerenciamento da carga elétrica. Essa aplicação é especialmente útil para reduzir os custos operacionais e evitar sobrecargas na infraestrutura elétrica.

- **Energia de *backup***

Os BESS fornecem uma fonte confiável de energia de *backup* durante interrupções no fornecimento de energia da rede. Em caso de falhas na rede elétrica, as baterias podem fornecer energia instantaneamente, garantindo a continuidade das operações em residências, empresas e instalações críticas, como hospitais. Essa aplicação é essencial para aumentar a resiliência e a segurança energética, minimizando os impactos negativos das interrupções de energia.

- **Arbitragem de energia**

A arbitragem de energia envolve comprar eletricidade a preços baixos e vendê-la a preços altos. Os BESS permitem armazenar energia quando os preços são baixos, geralmente durante a noite, e liberar essa energia durante os períodos de alta demanda, quando os preços são mais elevados. Isso não apenas proporciona oportunidades de lucro para as operadoras de energia, mas também ajuda a estabilizar os preços da eletricidade ao equilibrar a oferta e a demanda.

- **Reserva girante / não girante**

A reserva girante e não girante são serviços essenciais para a estabilidade da rede elétrica. A reserva girante envolve a disponibilidade imediata de energia gerada por unidades em operação, enquanto a reserva não girante refere-se a unidades que podem ser rapidamente ativadas. Os BESS podem fornecer ambos os tipos de reserva, respondendo rapidamente às flutuações na demanda e ajudando a manter a frequência da rede dentro dos limites operacionais seguros.

- **Regulação de frequência**

A regulação de frequência é uma aplicação crítica onde os BESS ajudam a manter a estabilidade da frequência da rede elétrica. Flutuações na oferta e demanda de energia podem causar variações na frequência, o que pode danificar equipamentos e comprometer a integridade da rede. Os BESS respondem rapidamente a essas flutuações, injetando ou absorvendo energia conforme necessário para manter a frequência estável.

- **Suporte de tensão**

Os BESS podem ser utilizados para fornecer suporte de tensão, ajudando a manter os níveis de tensão da rede elétrica dentro dos limites aceitáveis. Durante períodos de alta demanda, a tensão da rede pode cair, enquanto durante períodos de baixa demanda, a tensão pode subir. Os BESS podem injetar ou absorver energia reativa para estabilizar a tensão, melhorando a qualidade da energia fornecida aos consumidores.

- **Partida a frio**

A partida a frio é uma aplicação onde os BESS fornecem a energia inicial necessária para reiniciar usinas de energia após uma falha total da rede elétrica. Em situações de *blackout*, os BESS podem fornecer a energia necessária para ativar os sistemas de geração, permitindo uma recuperação rápida e segura da rede elétrica.

- **Diferimento de distribuição e transmissão**

Os BESS podem ser usados para adiar a necessidade de investimentos em infraestrutura de distribuição e transmissão. Ao fornecer energia localmente durante os picos de demanda, os BESS reduzem a carga nas linhas de transmissão ou de distribuição, adiando a necessidade de novas linhas ou atualizações, resultando em economia de custos significativas.

- **Alívio de congestionamento de transmissão**

Os BESS podem ajudar a aliviar o congestionamento nas linhas de transmissão, que ocorre quando a demanda por eletricidade excede a capacidade das linhas de transmissão. Ao fornecer energia localmente e reduzir a necessidade de transmissão de longa distância, os BESS podem melhorar a eficiência da rede e evitar sobrecargas, garantindo um fornecimento de energia mais confiável.

- **Sistemas isolados e microrredes**

Os BESS desempenham um papel crucial em sistemas isolados e microrredes, onde a conexão com a rede elétrica principal é inexistente ou intermitente. Em comunidades remotas ou em ilhas, os BESS podem ser combinados com fontes de energia renovável, como solar e eólica, para criar sistemas autossuficientes. As baterias armazenam o excesso de energia gerada durante períodos de alta produção e a liberam durante períodos de baixa produção ou alta demanda, garantindo um fornecimento constante e confiável de energia. Em microrredes, os BESS permitem a operação independente da rede principal, proporcionando resiliência e flexibilidade, além de reduzir a dependência de geradores a diesel e outras fontes de energia não renovável.

- **Postos de carregamento de veículos elétricos**

Os sistemas de armazenamento de energia em bateria são cada vez mais utilizados em postos de carregamento de veículos elétricos para otimizar a gestão de energia e reduzir os custos operacionais. Com a crescente adoção de veículos elétricos, a demanda por energia em postos de carregamento pode causar picos de consumo que resultam em tarifas elevadas e sobrecarga da rede elétrica. Os BESS permitem armazenar energia durante períodos de baixa demanda ou quando os preços da eletricidade são mais baixos, e utilizá-la durante o carregamento dos veículos, especialmente nos horários de pico. Isso não só reduz os custos de energia para os operadores do posto, mas também alivia a pressão sobre a rede, contribuindo para uma infraestrutura de carregamento de veículos elétricos mais eficiente e sustentável. Além disso, os BESS podem garantir a continuidade do serviço de carregamento em caso de falhas na rede elétrica, proporcionando uma fonte de energia de backup confiável.

2.4 PROJETOS DE BESS PELO MUNDO

A ISA CTEEP, uma das maiores operadoras de transmissão de energia no Brasil, implementou um sistema de armazenamento de energia em bateria (BESS) de 30 MW/60 MWh na subestação Registro, em São Paulo. Este sistema foi projetado para fornecer energia de

backup durante os picos de demanda, especialmente no verão, quando o consumo de energia atinge seu auge. O BESS ajuda a estabilizar a rede ao fornecer energia armazenada durante os períodos de alta demanda, minimizando o risco de apagões e melhorando a confiabilidade do fornecimento elétrico na região. Este é o primeiro grande projeto de BESS no Brasil e representa um marco importante para a integração de tecnologias de armazenamento de energia no país.

Outro sistema que se destaca no país é o BESS implementado pela Vale no Rio de Janeiro, conhecido como Terminal Integrador de Gusa (TIG), é um exemplo notável de como a tecnologia de armazenamento de energia pode ser utilizada em operações industriais estratégicas. O BESS no TIG permite à Vale gerenciar melhor a demanda de energia, armazenando eletricidade durante períodos de menor consumo e liberando-a durante picos de demanda, o que reduz custos operacionais, chegando até a 20%, e minimiza o impacto de possíveis interrupções no fornecimento de energia. Este projeto demonstra o compromisso da Vale em adotar soluções tecnológicas avançadas para otimizar suas operações e promover um futuro energético mais sustentável.

Dentre as implementações no mundo, podemos destacar o Hornsdale Power Reserve, localizado na Austrália do Sul, é um dos sistemas BESS mais conhecidos e avançados do mundo, equipado com baterias Tesla. Com uma capacidade inicial de 100 MW/129 MWh, ampliada posteriormente para 150 MW/193,5 MWh, este sistema desempenha um papel crucial na estabilização da rede elétrica, fornecendo serviços de regulação de frequência e reserva de energia. O Hornsdale Power Reserve ajuda a equilibrar a oferta e a demanda de energia, especialmente em uma região com alta penetração de energia eólica. Este projeto ganhou destaque por sua capacidade de responder rapidamente a flutuações na rede e por reduzir os custos de energia para os consumidores locais.

Considerado o maior sistema BESS do mundo, com uma capacidade de 400 MW/1.600 MWh, o Moss Landing Energy Storage Facility, localizado na Califórnia, é um sistema desenvolvido para fornecer serviços de backup e estabilização para a rede elétrica da Califórnia, uma das mais dinâmicas e complexas do mundo. O Moss Landing BESS é capaz de fornecer energia durante períodos prolongados de alta demanda, garantindo a confiabilidade do fornecimento e ajudando a integrar grandes quantidades de energia renovável, como solar e eólica, na rede. Além disso, o sistema oferece suporte crítico em caso de falhas na rede, demonstrando o potencial das soluções de armazenamento em larga escala para transformar o setor elétrico.

Esses grandes projetos de sistemas de armazenamento de energia em bateria (BESS), tanto no Brasil quanto ao redor do mundo, são pioneiros na demonstração do potencial transformador dessa tecnologia para o setor elétrico. Ao enfrentarem desafios como a estabilização da rede, a integração de energias renováveis e a garantia de segurança energética, esses projetos não apenas fornecem soluções práticas e imediatas, mas também pavimentam o caminho para a adoção mais ampla de BESS em escala global. Como líderes na implementação dessas tecnologias, eles estabelecem padrões e oferecem lições valiosas para futuros desenvolvimentos, incentivando a inovação e contribuindo para um sistema energético mais resiliente, eficiente e sustentável. A expansão desses projetos serve como catalisador para o crescimento do BESS, impulsionando avanços tecnológicos e abrindo novas possibilidades para a gestão energética em um mundo cada vez mais dependente de fontes de energia limpas e renováveis.

2.5 CIÊNCIA DE DADOS

Ciência de dados ou Data Science é uma área de estudos multidisciplinar que engloba conhecimentos de estatística, computação e matemática e que visa estudar as informações, seu processo de captura, transformação, geração e análise, buscando conhecimento a partir de dados (GRUS, 2016).

A ciência de dados, quando aplicada ao setor elétrico, adquire uma relevância ainda maior ao ser associada aos Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria. Esses sistemas, que permitem o armazenamento de energia para uso posterior, são essenciais para a integração eficaz de fontes de energia renovável, como solar e eólica, que são naturalmente intermitentes. A ciência de dados possibilita a otimização do uso dos BESS ao prever padrões de geração e consumo, determinando os melhores momentos para armazenar ou liberar energia, o que maximiza a eficiência e a vida útil das baterias. Além disso, a análise de dados pode prever o desgaste das baterias e sugerir manutenção preventiva, garantindo a confiabilidade do sistema. Dessa forma, a combinação de ciência de dados com BESS não apenas melhora a estabilidade e resiliência da rede elétrica, mas também promove uma transição mais suave para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

O desenvolvimento de projetos de *Data Science* se inicia com o planejamento e entendimento do problema, seguido da coleta e tratamento dos dados. Em seguida, é realizada a exploração dos dados, a fim de compreender as informações e aplicar técnicas de análise de dados. O desenvolvimento de um projeto de Data Science é finalizado com a coleta e

visualização dos resultados. Esse esquema de desenvolvimento é apresentado na Figura 13. A partir do exposto, podemos constatar que o desenvolvimento de projetos de ciência de dados geralmente possui *feedback* e são projetos cíclicos, em que as análises são testadas e os resultados são melhorados continuamente.

Figura 13 - Diagrama do ciclo de vida da ciência de dados.



Fonte: Gonçalves (2018).

No campo da ciência de dados, existem quatro tipos principais de análise que desempenham papéis distintos, mas complementares, na extração de valor a partir dos dados: análise descritiva, diagnóstica, preditiva e prescritiva.

- 1. Análise Descritiva:** Este é o ponto de partida da maioria das análises de dados e se concentra em responder à pergunta "O que aconteceu?". A análise descritiva resume e organiza os dados históricos para identificar padrões, tendências e anomalias. Por exemplo, no setor elétrico, pode-se usar essa análise para entender o consumo de energia ao longo do tempo ou identificar variações sazonais na demanda.
- 2. Análise Diagnóstica:** Após a análise descritiva, a análise diagnóstica busca responder "Por que isso aconteceu?". Ela explora as causas subjacentes dos padrões ou eventos observados nos dados, utilizando técnicas como correlação, análise de variância e mineração de dados. No setor elétrico, a análise diagnóstica pode ser usada para investigar as causas de quedas de energia ou picos de demanda, identificando fatores como falhas técnicas ou condições climáticas adversas.

3. **Análise Preditiva:** A análise preditiva vai além do que aconteceu e por quê, para responder à pergunta "O que provavelmente acontecerá?". Utilizando técnicas estatísticas, algoritmos de aprendizado de máquina e modelos preditivos, esta análise estima futuros cenários com base em dados históricos e padrões identificados. No contexto do setor elétrico, a análise preditiva é crucial para prever a demanda de energia, antecipar falhas em equipamentos e otimizar o uso de recursos como BESS.
4. **Análise Prescritiva:** Finalmente, a análise prescritiva responde à pergunta "O que deve ser feito?". Ela não apenas prevê o que pode acontecer, mas também recomenda ações para alcançar o melhor resultado possível. Isso é feito combinando modelos preditivos com regras de negócio, simulações e otimizações. No setor elétrico, a análise prescritiva pode sugerir as melhores estratégias para operar uma rede elétrica, decidir quando ativar os BESS, ou escolher entre diferentes opções de geração de energia, levando em conta tanto os objetivos de custo quanto os de sustentabilidade.

Esses quatro tipos de análise, quando usados em conjunto, oferecem uma visão poderosa e abrangente, permitindo que as organizações não apenas entendam o passado e presente, mas também planejem e otimizem o futuro com maior precisão e eficiência.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis e eficientes tem impulsionado uma significativa expansão nas pesquisas sobre Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria. Os estudos são fundamentais para enfrentar os desafios associados à integração de fontes renováveis, à estabilização das redes elétricas e à melhoria da segurança energética em diversas aplicações. A pesquisa contínua sobre BESS não só aprimora a tecnologia existente, mas também abre novas possibilidades para a inovação, desenvolvendo soluções que são cruciais para a transição global para um sistema energético mais resiliente e de baixo carbono. Dessa forma, a literatura existente desempenha um papel vital ao fornecer as bases teóricas e práticas necessárias para a implementação eficaz desses sistemas em larga escala, refletindo sua importância crescente no cenário energético global.

Luiz, Pablo (2018) aborda em sua dissertação de mestrado estudos sobre a integração de sistemas de armazenamento de energia (ESS) em redes elétricas, com foco especial na

aplicação desses sistemas para suavização de potência gerada por fontes eólicas. Diversas tecnologias de armazenamento, como baterias de íons de lítio, baterias de fluxo e supercapacitores, são exploradas, destacando-se por sua capacidade de mitigar as flutuações inerentes à geração eólica intermitente. Estudos prévios demonstram que a utilização de ESSs em conjunto com sistemas de previsão, como Redes Neurais Artificiais (RNA), e técnicas de controle, como a inferência *fuzzy*, pode melhorar significativamente a qualidade da energia fornecida, reduzindo a variabilidade da potência e aumentando a confiabilidade do sistema elétrico. As pesquisas também enfatizam a importância do correto dimensionamento e da análise da vida útil das baterias para garantir a eficiência e a viabilidade econômica desses sistemas.

No contexto de sistemas de geração de energia em áreas remotas, a integração de fontes de energia renovável com sistemas de armazenamento de energia de baterias (BESS) tem se mostrado uma solução eficaz para reduzir a dependência de geradores a diesel e minimizar os custos operacionais e ambientais. Conforme discutido por Baghta et al. (2020), o dimensionamento otimizado de sistemas fotovoltaicos (PV) acoplados a BESS é essencial para maximizar a penetração de energias renováveis e garantir a estabilidade do fornecimento de energia, especialmente em regiões com infraestrutura elétrica limitada. O estudo destaca o uso do software HOMER para determinar a configuração ideal desses sistemas, levando em consideração fatores econômicos e a previsível redução nos custos de instalação de PV e BESS. Este enfoque não apenas oferece uma alternativa mais sustentável, mas também se alinha às tendências globais de redução de emissões de carbono e de promoção de energia limpa, demonstrando uma viabilidade crescente para a aplicação em contextos similares.

O trabalho de Severino, Elizaldo (2023) tem como objetivo explorar o papel dos Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) no contexto da transição energética, especialmente em relação à integração de fontes de energia renovável variável, como a solar e a eólica. Este estudo aborda a evolução histórica das tecnologias de baterias, suas principais aplicações no setor elétrico, e os desafios técnicos, econômicos e regulatórios que envolvem sua implementação. Além disso, o trabalho propõe uma análise prática da viabilidade de instalação de um sistema BESS em uma usina de geração renovável no Nordeste do Brasil, destacando a importância desses sistemas para melhorar a confiabilidade e a eficiência das redes elétricas em um cenário de crescente penetração de energias renováveis.

O uso de Sistemas de Armazenamento de Energia de Bateria (BESS) para suporte de frequência em redes elétricas tem ganhado atenção como uma solução eficaz para manter a estabilidade da frequência, especialmente diante de desequilíbrios entre geração de energia e demanda. Segundo Wu e Tang (2018), o BESS oferece resposta rápida e capacidade de fornecer potência ativa instantânea, sendo crucial para a regulação de frequência em sistemas elétricos. O estudo destaca as vantagens e desafios das diferentes tecnologias de baterias, como íon de lítio e chumbo-ácido, em termos de custo de capital, vida útil e capacidade de resposta. Além disso, a análise de mercados internacionais, como o *Firm Frequency Response* (FFR) no Reino Unido e o *Frequency Control Ancillary Services* (FCAS) na Austrália, fornece insights sobre a viabilidade econômica e operacional do BESS para serviços ancilares de controle de frequência, ressaltando sua crescente importância na integração de fontes renováveis e na melhoria da estabilidade da rede elétrica.

João Henrique (2015) aborda em sua dissertação de mestrado a evolução e aplicação de sistemas de armazenamento de energia, com foco especial em sistemas baseados em baterias, que têm ganhado destaque na integração com fontes de energia renovável, como a solar fotovoltaica. Estudos anteriores destacam a importância de sistemas de controle avançados para gerenciar os processos de carga e descarga das baterias, garantindo maior eficiência e estabilidade no fornecimento de energia, especialmente em cenários de alta variabilidade da produção renovável. A literatura revisada também enfatiza as funções críticas que esses sistemas de controle devem desempenhar, como o *peak shaving*, a arbitragem de energia, e o controle da taxa de variação da produção, para mitigar os impactos das flutuações e intermitências inerentes às energias renováveis. Além disso, o uso de ferramentas de simulação, como o Matlab/Simulink, é amplamente reconhecido como essencial para validar a eficácia dos controladores propostos antes da implementação em sistemas reais, permitindo ajustes finos e uma melhor compreensão do comportamento dinâmico desses sistemas complexos.

Neves, Vitor et al. (2022) explora a implementação de um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias de chumbo-ácido, projetado para operar em paralelo com a rede elétrica. O estudo detalha a modelagem matemática e o controle dos conversores bidirecionais necessários para gerenciar os processos de carga e descarga das baterias, além de fornecer serviços ancilares à rede. Utilizando um protótipo de 10 kVA, os autores apresentam os resultados experimentais, destacando o comportamento do sistema em diferentes condições de operação, incluindo o fornecimento de potência ativa e reativa. A pesquisa comprova que o sistema é capaz de melhorar a estabilidade da rede e a qualidade da energia, atendendo aos

padrões estabelecidos pela NBR 16149:2013 e as normativas do INMETRO. O trabalho oferece uma contribuição significativa para o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia que suportam a integração de fontes renováveis na matriz elétrica, garantindo um fornecimento de energia mais confiável e eficiente.

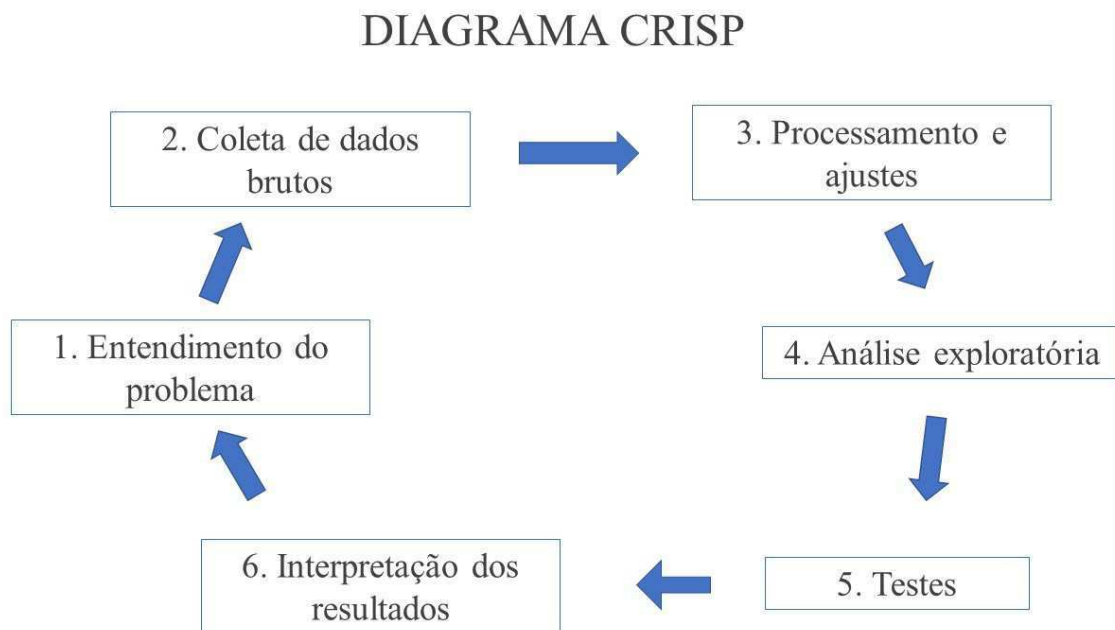
A literatura revisada evidencia uma ampla gama de abordagens sobre o papel dos Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS) na modernização das redes elétricas e na promoção de um sistema energético mais sustentável. Luiz e Pablo (2018) focam na suavização da potência gerada por fontes eólicas, destacando a importância do controle avançado com técnicas como RNA e inferência fuzzy para mitigar a variabilidade da geração. Em contraste, Baghta et al. (2020) exploraram o uso do BESS para áreas remotas, enfatizando o dimensionamento otimizado para maximizar o uso de energia renovável e reduzir a dependência de geradores a diesel. Severino (2023) amplia essa discussão ao abordar a importância do BESS para a transição energética e a estabilidade das redes em contextos de alta abertura renovável, com análise prática de previsão. Wu e Tang (2018), por sua vez, focam no suporte de frequência, enfatizando o papel do BESS na resposta rápida para regulação em sistemas de alta variabilidade. Já João Henrique (2015) explora os benefícios de sistemas de controle para gerenciar a carga e descarga de baterias, mudanças de estabilidade e eficiência energética. Finalmente, Neves et al. (2022) apresentam uma aplicação prática de BESS com baterias de chumbo-ácido, validando seu potencial para melhorar a qualidade e estabilidade da rede em diferentes condições de operação. Essas pesquisas juntas enfatizam as especificidades e a importância crescente do BESS, não apenas para integração renovável, mas também para oferecer suporte à rede em diferentes contextos.

Diversas outras pesquisas abordam o desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia em baterias desempenhando um papel crucial na modernização e na sustentabilidade do setor elétrico, especialmente à medida que a integração de fontes de energia renovável. Essas pesquisas são essenciais para viabilizar a transição energética em direção a uma matriz mais limpa e renovável. Ao resolver os desafios técnicos e otimizar a operação dos sistemas de armazenamento, as pesquisas ajudam a garantir que as redes elétricas possam integrar grandes quantidades de energia renovável, mantendo a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia, o que é crucial para o desenvolvimento sustentável e a mitigação das mudanças climáticas.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo será descrita a metodologia planejada para obtenção dos resultados da pesquisa, será utilizado o diagrama CRISP (Cross-Industry Standard Process) que se divide em 6 etapas: entendimento do problema, coleta dos dados, processamento e ajustes, análise exploratória dos dados, testes e, por último, a interpretação dos resultados. Todas as etapas estão apresentadas no fluxograma da Figura 12 e serão descritas detalhadamente a seguir. Essas fases não são lineares, mas iterativas, permitindo que os analistas revisitem etapas anteriores conforme novos insights surgem durante o processo. O diagrama destaca a natureza cíclica e adaptativa da metodologia, onde o aprendizado contínuo e o refinamento dos modelos são incentivados. Ao proporcionar uma visão clara e estruturada do fluxo de trabalho, o diagrama CRISP serve como um guia prático para a ciência de dados, ajudando a organizar e gerenciar projetos complexos de forma eficiente e direcionada ao objetivo final.

Figura 14 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Próprio autor

4.1 ENTENDIMENTO DO PROBLEMA E COLETA DE DADOS BRUTOS

Nesta etapa inicial, o objetivo é compreender profundamente o comportamento e a eficiência operacional de um sistema BESS (Battery Energy Storage System) real, utilizando

todo embasamento teórico desenvolvido e um banco de dados existente. O sistema BESS é fundamental para o armazenamento de energia elétrica em aplicações que variam desde a estabilização de redes elétricas até o suporte a fontes de energia renovável. A análise proposta visa identificar padrões de operação, eficiência, capacidade de armazenamento, ciclos de carga e descarga, e o impacto de diferentes variáveis no desempenho do sistema. A definição clara do problema inclui a identificação dos parâmetros críticos que serão analisados, como a temperatura da bateria, a taxa de descarga, o estado de carga (SOC), a potência de saída, entre outros.

Com base no entendimento do problema, a etapa da coleta de dados brutos envolve a preparação e a organização do banco de dados que contém registros históricos do sistema BESS em estudo. Foram coletadas as principais medições realizadas em um sistema de armazenamento de energia por baterias real, conectado a uma microgeração de energia solar, a rede da distribuidora de energia e a sua carga. Os dados disponíveis, que podem incluir leituras de sensores, dados de operação do sistema, medições de energia armazenada e fornecida, entre outros, serão coletados e organizados de forma sistemática para análise. A coleta também considera a verificação da integridade dos dados, identificando e documentando possíveis inconsistências, lacunas ou erros nos registros. Neste contexto, o uso de ferramentas como Excel será essencial para uma triagem inicial e para o armazenamento estruturado dos dados brutos, esta etapa é de suma importância para conhecer cada atributo do banco de dados

4.2 PROCESSAMENTO E AJUSTES DOS DADOS

Após a coleta, os dados passarão por um processo de limpeza e pré-processamento, fundamental para garantir a qualidade da análise subsequente. Devido a erros de medição, desligamento de equipamentos ou falta de informações, o banco de dados pode possuir dados faltantes ou incorretos que, caso permaneçam, prejudicam as análises. Para evitar esse problema, os atributos são avaliados para identificar e corrigir esses erros. Esta fase pode envolver o uso de scripts em Python para automatizar a limpeza e a transformação dos dados, ou o uso de ferramentas avançadas de Excel para aplicar filtros, funções de tratamento e agrupamento.

Durante as etapas de preparação dos dados, os dados brutos são transformados e ajustados para corrigir inconsistências, remover dados duplicados, lidar com valores ausentes ou anômalos (como leituras fora dos intervalos esperados), o que facilita a extração de padrões significativos e insights precisos. A preparação adequada nesta etapa garante que os dados

estejam prontos para a análise exploratória detalhada, minimizando a introdução de vieses ou erros.

4.3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA

A análise exploratória de dados é uma etapa essencial na metodologia CRISP, pois permite aos analistas entenderem a estrutura, as características e os padrões subjacentes dos dados antes de avançar para os testes. Como nosso objetivo é analisar o funcionamento do BESS e verificar o comportamento das principais grandezas elétricas durante o processo, será utilizado na análise apenas um dia de operação do sistema. Durante a análise, são utilizadas técnicas estatísticas e visuais para identificar média, valor máximo e mínimo, desvio padrão, relações, tendências, distribuições e possíveis anomalias nos dados. Para realizar essa análise, será utilizado ferramentas como Python ou Excel, que são ótimas para trabalhar com grande número de dados e na visualização do comportamento temporal das variáveis.

Esta etapa ajuda a detectar problemas, como outliers ou dados ausentes, que poderiam comprometer a qualidade dos modelos preditivos. Além disso, orienta na escolha das técnicas de modelagem mais adequadas e na definição das variáveis que terão maior impacto na análise, proporcionando uma base sólida para o sucesso das etapas subsequentes do processo CRISP. Portanto, a análise exploratória é vital para garantir que os modelos sejam construídos sobre uma compreensão profunda e clara dos dados, aumentando a precisão e a confiabilidade dos testes gerados.

4.4 TESTES

Tendo como objetivo principal do projeto avaliar o desempenho de um sistema de armazenamento de energia por baterias, será aplicado a análise descritiva, com intuito de identificar padrões, tendências e anomalias, ou seja, será possível analisar o funcionamento do BESS a partir dos históricos dos dados, além do comportamento de vários atributos do banco de dados no decorrer das aplicações do sistema, quando está sendo carregado pela geração fotovoltaica, pela rede ou quando o BESS estiver fornecendo energia. Por exemplo, estudar as relações entre diferentes parâmetros, como o Soh e o SoC , durante os ciclos de carga e descarga das baterias, assim como a associação da temperatura das baterias durante esse processo, entre outras análises que o autor julgue relevante. Associada a análise descritiva, também poderá ser feita uma análise diagnóstica de algum possível evento, observar a eficiência do sistema diariamente ou até mesmo uma falha de atuação do sistema.

4.5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A última etapa envolve a interpretação dos resultados obtidos e a avaliação de sua relevância para o contexto específico do sistema BESS analisado. Aqui, os resultados das análises e dos testes são revisados para entender como as variáveis estudadas afetam a operação e a eficiência do sistema. Após concluir as etapas anteriores espera-se ter desenvolvido uma análise dos principais componentes elétricos, estudados anteriormente, para diferentes comportamentos de um BESS real. Com isso, será possível validar nossos observar as principais aplicações do sistema em estudo e consolidar os conhecimentos a respeito do armazenamento de energia com baterias, justificando o motivo de ser escolhido como umas das principais soluções para ajudar na transição energética do mundo.

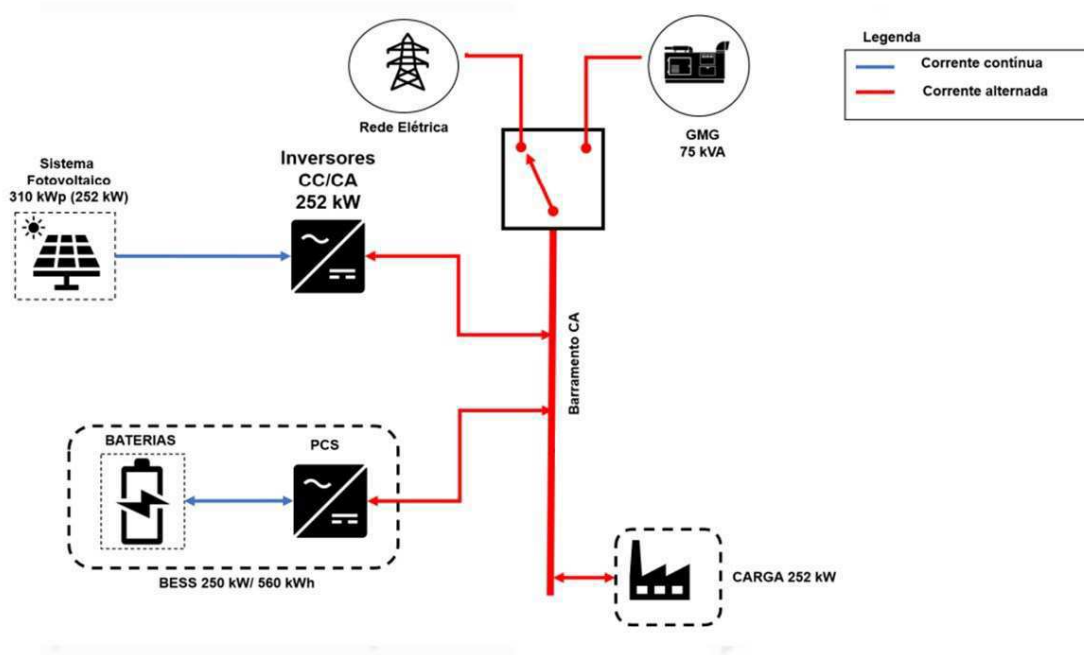
5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados do estudo de caso real do sistema de armazenamento de energia por baterias, que serão conduzidas a partir das etapas do diagrama CRISP, descritas na metodologia. Para uma melhor organização, essa seção será dividida em dois momentos, o primeiro se refere as quatro primeiras etapas do diagrama, e o segundo, contará com os resultados obtidos e suas devidas análises.

5.1 ENTENDIMENTO, COLETA DE DADOS, PROCESSAMENTO E ANÁLISE EXPLORATÓRIA

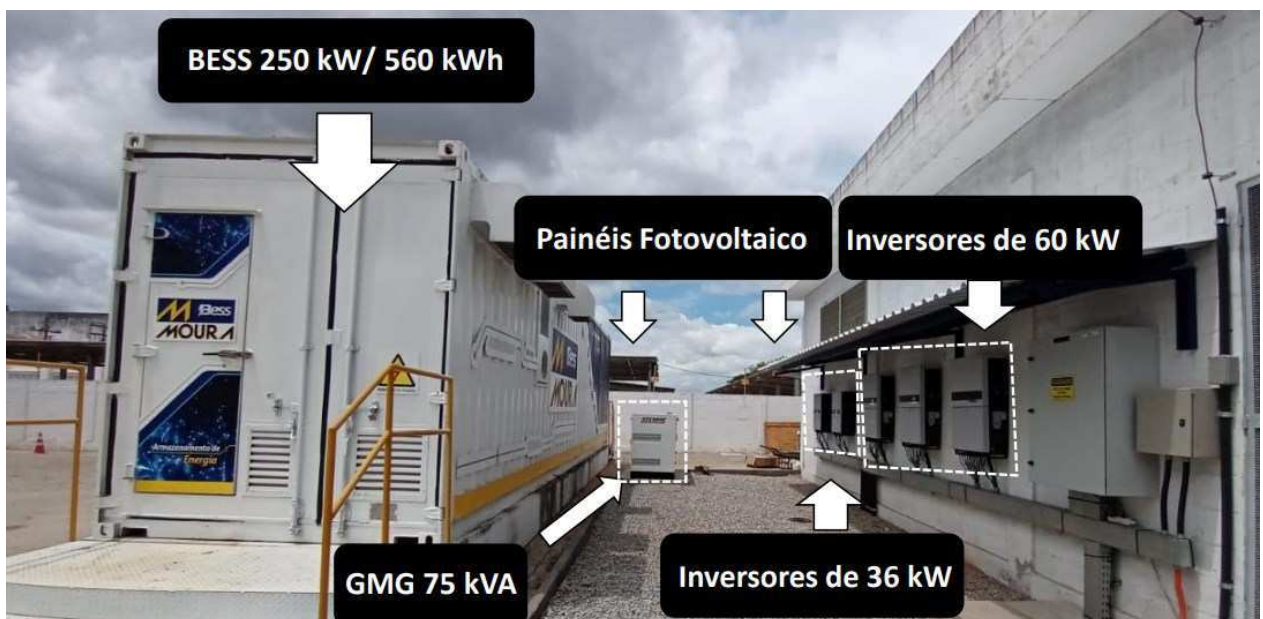
O banco de dados utilizado neste projeto é formado por informações extraídas de relatórios de operação do BESS do ITEM, em Belo Jardim, Pernambuco, Brasil. O sistema apresenta a seguinte topologia: conectado ao barramento CA temos um sistema fotovoltaico de 310 kWp, um BESS 250 kW/560 kWh, um gerador de 75 kVA e uma carga, como é mostrado na Figura 15 e 16.

Figura 15 - Topologia do BESS do ITEM



Fonte: Acervo da Moura

Figura 16 - BESS ITEM



Fonte: Acervo da Moura

Após entender a topologia do sistema do ITEM e com o conhecimento apresentado na fundamentação teórica, partimos para coleta dos dados de monitoramento dos principais equipamentos do sistema e suas medições de operação, que formam os bancos de dados, que podem ser usados para análise e estudo do BESS. O sistema em estudo possui quatro base de

dados: geração FV, BMS, PCS e sensores. Os atributos presentes nos relatórios foram medidos durante o período de 2 meses. A seguir, nas Tabelas de 1 a 4, é apresentado os principais atributos de cada base de dados, que é formada pela medição desses atributos a cada 1 minuto.

Tabela 1 – Atributos da geração FV

Base de dados com 5 inversores
Energia diária e total
Potência ativa (valor médio)

Fonte: Próprio autor

Tabela 2 - Atributos do BMS

Tensão: max, min e med
Temperatura: max, min e med
Corrente (valor médio)
Soh
SoC
Carga e descarga de energia (valor médio)

Fonte: Próprio autor

Tabela 3 – Atributos do PCS

Temperatura
DC: tensão e corrente (valor médio)
AC: tensão e corrente (saídas A, B e C)
AC: Potência (ativa, reativa e aparente)
Frequência on grid e off grid

Fonte: Próprio autor

Tabela 4 - Atributos dos sensores

H2O: temperatura e concentração
H2SO: temperatura e concentração
Hygro: temperatura e humidade

Fonte: Próprio autor

Como descrito anteriormente, os bancos de dados do BESS, com todas as medições dos atributos, foram processados utilizando a biblioteca Pandas, da linguagem de programação Python. Além disso, foram realizadas as devidas correções de erros e substituição de dados faltantes por interpolação de dados. Após o tratamento inicial, é possível fazer uma análise exploratória e descritiva, detalhando os bancos de dados e conhecendo melhor o sistema em estudo. Para realizar a análise e o estudo da operação do sistema, foi selecionado o dia 15 de maio de 2024. A seguir, na Tabela 5, é exposta a análise dos atributos do BMS, onde é possível visualizar estatísticas resumidas, como média, desvio padrão, mínimo e máximo da bateria.

Tabela 5 - Análise dos atributos do BMS

	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
TENSÃO GLOBAL	613,52 V	36,98 V	558,50 V	671,50 V
TENSÃO MAX. (CÉLULA)	2,22 V	0,14 V	2,02 V	2,60 V
TENSÃO MIN. (CÉLULA)	2,14 V	0,11 V	1,95 V	2,30 V
TEMPERATURA MAX.	33,35 °C	1,90 °C	30 °C	37 °C
TEMPERATURA MIN.	24,04 °C	1,38 °C	22 °C	28 °C
SoC	75,26 %	15,68 %	35,79 %	99,99 %
DESCARGA	2549,33 Ah	119,70 Ah	2495,13 Ah	2750,40 Ah
CARGA	3117,32 Ah	182,08 Ah	2559,72 Ah	3375,00 Ah

Fonte: Próprio autor

A partir da análise, é possível constatar que a tensão global está relativamente estável, com variações de aproximadamente 36 V, ou seja, o sistema opera dentro de uma faixa

previsível, sendo um indicador positivo para a saúde do sistema. Podemos comprovar esse fato quando analisamos a tensão máxima e mínima de cada célula da bateria, o intervalo de variação é estreito, indicando que estão funcionando de forma consistente. Outro ponto importante nesta análise é a temperatura máxima e mínima, ambas permanecem dentro de uma faixa segura, o que sugere que o sistema de controle térmico está funcionando bem, evitando extremos que possam comprometer o desempenho ou a durabilidade das baterias.

Como o estudo feito é de apenas um dia de operação, o estado de saúde das baterias está fixo em 97%, indicando que as baterias ainda estão em boas condições. O estado de carga varia de aproximadamente 36% a 100%, o que indica uma operação cíclica normal. As variações de SoC são esperadas, mas o monitoramento é importante para evitar descargas profundas que possam impactar a vida útil das baterias.

O valor de carga em Ah também mostra variações significativas, o que indica que o sistema está sendo carregado regularmente para compensar o uso de energia. A energia descarregada em Ah também varia, mas está dentro de uma faixa relativamente controlada. Esse comportamento indica que o sistema está sendo usado de maneira regular para descarregar energia, possivelmente para equilibrar a oferta e a demanda.

A próxima análise exploratória é da base de dados referente ao PCS. Na Tabela 6, está presente as informações mais relevantes sobre potência ativa, reativa e aparente, tensões de fase e a frequência.

Tabela 6 - Análise dos atributos do PCS

	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
POTÊNCIA ATIVA	-8,76 kW	48,37 kW	-119,59 kW	116,9 kW
POTÊNCIA REATIVA	45,50 kvar	7,52 kvar	31,00 kvar	68,50 kvar
POTÊNCIA APARENTE	63,47 kVA	22,69 kVA	31,89 kVA	136,50 kVA
TENSÃO A	221,33 V	6,32 V	215,21 V	227,10 V
TENSÃO B	219,01 V	2,26 V	211,40 V	225,19 V
TENSÃO C	222,13 V	2,18 V	214,80 V	228.1 V
FREQUÊNCIA	59,95 Hz	1,61 Hz	59,94 Hz	60,09 Hz

Fonte: Próprio autor

A potência ativa média foi de -8,76 kW, com um desvio padrão de 48,37 kW. A potência mínima foi de -119,59 kW e a máxima de 103,99 kW, o valor negativo indica que, em média, o sistema PCS está em modo de descarga, fornecendo energia para a rede. A potência aparente média foi de 63,47 kVA, esse valor reflete a potência total no sistema, que inclui tanto a potência ativa quanto a reativa, com um desvio padrão de 22,69 kVA, o desvio padrão nos mostra a dispersão ou variabilidade em relação à média de um conjunto de dados, onde podemos observar o comportamento e a confiabilidade de algumas grandezas. As tensões de saída médias nas fases A, B e C são 221,33 V, 219,01 V e 222,13 V, respectivamente, essas tensões estão dentro dos limites operacionais típicos para sistemas trifásicos. A frequência também está dentro dos limites especificados pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) no Brasil.

A seguir, é exposto a análise exploratória da base de dados referente aos sensores HVAC. Na Tabela 7, está presente as informações mais relevantes sobre a temperatura e a concentração de H₂O e H₂SO.

Tabela 7 - Análise dos atributos dos sensores do HVAC

	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
H₂O TEMPERATURA	28,95 °C	2,37 °C	25,40 °C	34,72 °C
H₂SO TEMPERATURA	28,96 °C	2,37 °C	25,5 °C	34,72 °C
H₂O CONCENTRAÇÃO	3,70	1,12	2,00	8,56
H₂SO CONCENTRAÇÃO	30,93	19,95	4,40	107,8

Fonte: Próprio autor

A temperatura média registrada pelos sensores H₂O e H₂SO foi de cerca de 28°C, com uma variação de aproximadamente 2,37°C. Isso indica que o sistema opera em uma faixa de temperatura controlada, com valores mínimos em torno de 25°C e máximos de 35°C. A umidade também foi analisada, a média registrada pelo sensor 1 foi de 61,59%, enquanto o sensor 2 apresentou uma média de 53,15%, esses valores mostram que o ambiente tem uma

umidade relativamente alta, o que pode ser relevante para o funcionamento e segurança do sistema.

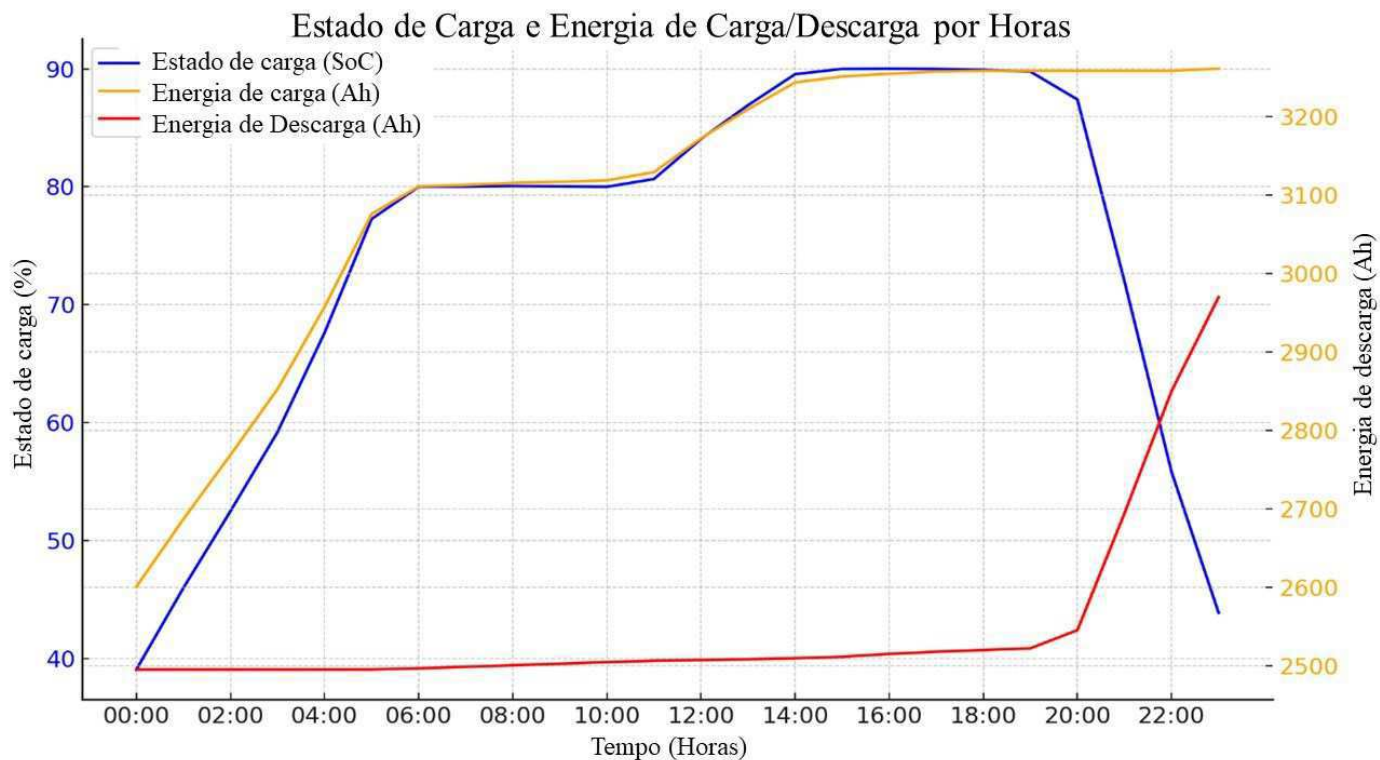
Por fim, a análise exploratória do sistema fotovoltaico, que possui 5 inversores, como já foi mostrada anteriormente, entretanto a média de geração do inversor 1 é significativa, 783,96 kWh, com desvio padrão alto, indicando que a geração pode ser afetada por condições climáticas, como a presença de nuvens ou chuva. Enquanto os inversores 2 e 5 possuem médias de 82,32 kWh e 212,05 kWh, respectivamente, e os outros dois tem uma geração consideravelmente menor. A potência ativa indica que, durante os períodos de pico, o sistema consegue gerar potência significativa, chegando a 257,38 kW, que pode ser utilizada para carregar o BESS ou alimentar as cargas diretamente.

Os dados indicam que a geração solar está, de fato, integrando-se bem com o BESS, permitindo uma utilização eficiente da energia gerada durante o dia e contribuindo para o carregamento das baterias. Essa é uma estratégia eficaz para maximizar a eficiência e reduzir custos com energia da rede. Desta forma, finalizamos a análise exploratória do banco de dados que estamos trabalhando e partimos para a última etapa, a plotagem de gráficos que mostram o funcionamento do sistema durante um dia de operação.

5.2 TESTES E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Após todo estudo do funcionamento, dos equipamentos do BESS e do comportamento dos principais atributos que compõem o banco de dados da operação do sistema, iniciamos a etapa de testes e interpretação dos resultados obtidos. Como já foi explicado anteriormente, estamos analisando a operação do sistema no dia 15 de maio de 2024. O BESS do ITEM tem a finalidade de prestar alguns serviços, dentre estes, o principal que vamos analisar é a arbitragem. Na Figura 17, é possível observar o funcionamento de carga e descarga da bateria, juntamente com o estado de carga da bateria (SoC).

Figura 17 – Carga e descarga da bateria x SoC



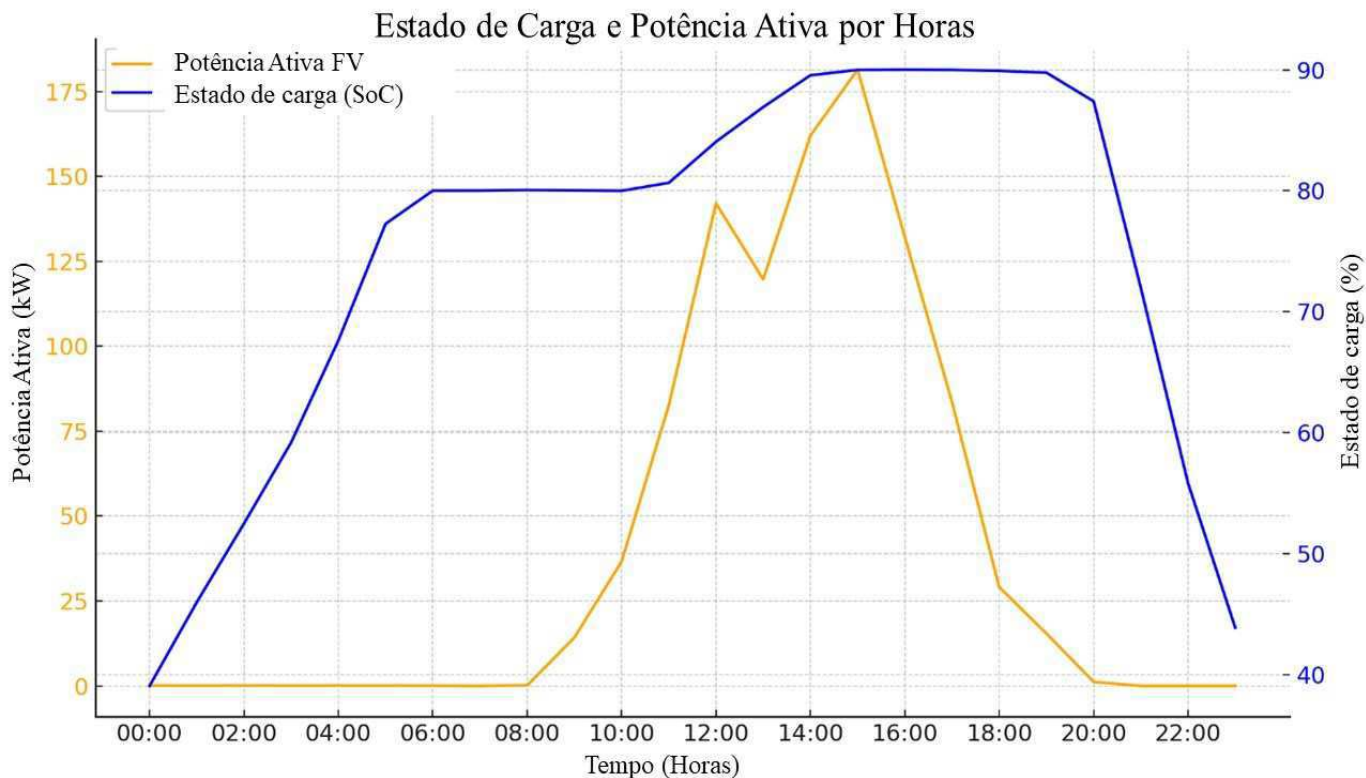
Fonte: Próprio autor

O gráfico da Figura 17 representa a quantidade de energia, que foi carregada no BESS, a curva azul, que aumenta quando a bateria está sendo carregada, e, de forma análoga, a curva laranja representa a energia que foi descarregada no BESS, que se eleva quando a bateria está sendo descarregada. O SoC é a representação percentual da carga da bateria, um SoC mais alto indica que a bateria está mais carregada, enquanto um SoC mais baixo indica que a bateria está mais descarregada.

Desta forma, podemos observar que quando o BESS começa a ser descarregado (ou seja, quando a energia é retirada do sistema), o SoC diminui, refletindo a energia que está sendo usada. Ao mesmo tempo, a energia de descarga deve aumentar, pois, mais energia está sendo extraída do sistema BESS. No entanto, a energia de carga não deve necessariamente cair durante a descarga, pois representa o total de energia que foi carregada na bateria até aquele ponto, e essa quantidade não deve ser afetada pela descarga atual, é uma medida acumulativa. Podemos observar que o BESS começa a ser descarregado em um momento específico, a partir das 17:30h, que é quando inicia o horário de ponta, onde o preço da energia é mais caro. Assim, o sistema de armazenamento assume o papel de provedor de energia para a carga no lugar da rede da concessionária de energia, fazendo com que o cliente economize neste período.

Sabemos que o BESS do ITEM possui um sistema fotovoltaico conectado. Na Figura 18, podemos observar a influência do sistema de geração no processo de carregamento das baterias.

Figura 18 - Geração fotovoltaica x SoC



Fonte: Próprio autor

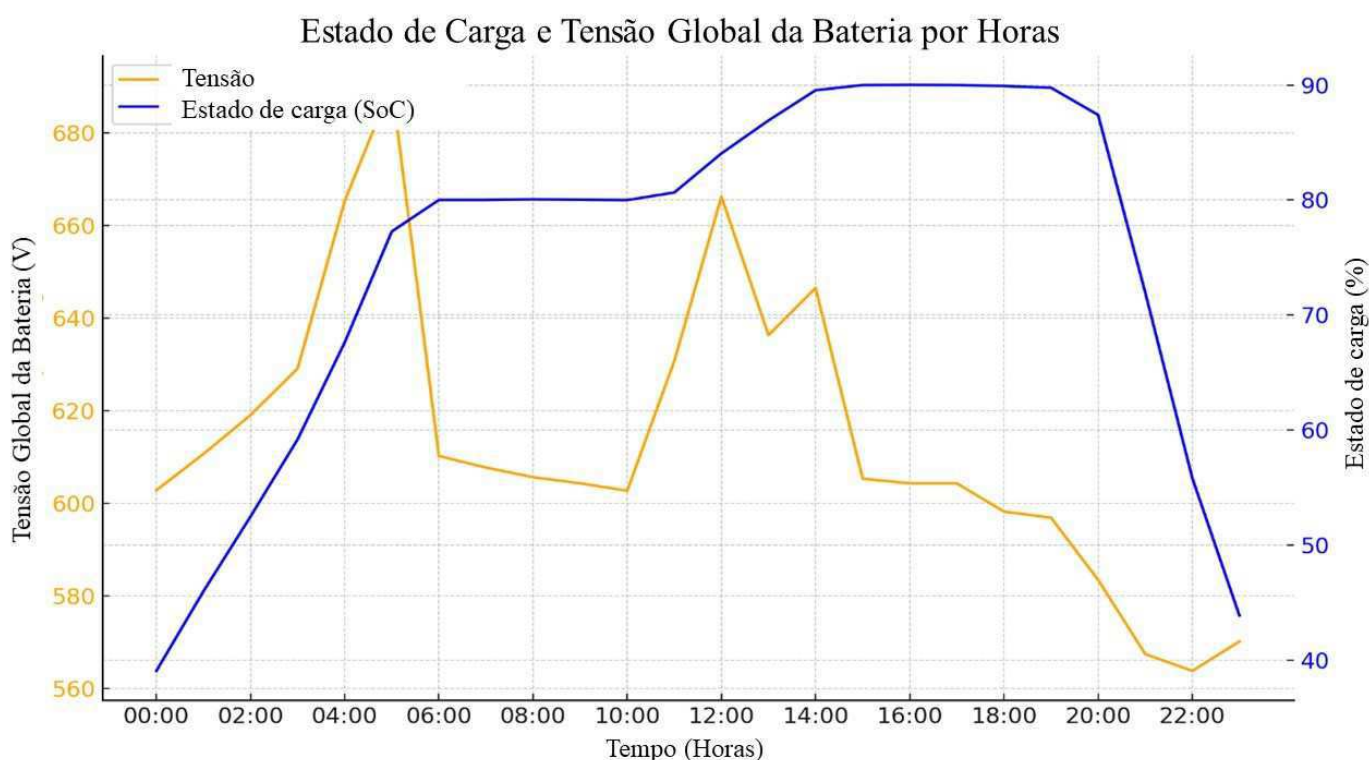
A partir deste gráfico, podemos observar que no momento em que o sistema fotovoltaico está gerando mais energia, o gráfico mostra um aumento no processo de carregamento da bateria, por volta das 11 horas. Isso significa que a energia gerada pelo sistema solar está sendo usada para carregar o BESS. O gráfico evidencia como a sinergia entre o sistema fotovoltaico e o BESS permite maximizar o uso de energia renovável e minimizar os custos de eletricidade da rede, especialmente durante os picos de geração solar. Este é o comportamento ideal em um cenário de gerenciamento energético e arbitragem de energia.

Observamos também, que após o uso do BESS, o sistema não espera o dia seguinte para carregar as baterias com a energia solar, efetua um carregamento considerável durante a madrugada usando a energia da rede. Um dos motivos estar associado a redução da vida útil das baterias por deixar descarregada por longos períodos, algumas tecnologias de baterias, como íons de lítio, são sensíveis a descargas muito profundas e podem sofrer degradação prematura se mantidas com carga baixa por muito tempo. Outro fator é a intermitência da

energia solar, não há garantias de que o sol estará disponível no dia seguinte, seja por condições climáticas desfavoráveis (como dias nublados ou chuvosos) ou por outros fatores, ao carregar o BESS à noite, o sistema se protege contra essa incerteza, garantindo que a bateria tenha energia suficiente para ser usada no dia seguinte, mesmo que a geração solar seja insuficiente.

Outra importante correlação realizada é a tensão da bateria durante a operação do BESS, na Figura 19, podemos observar o comportamento da tensão no carregamento e descarregamento do BESS.

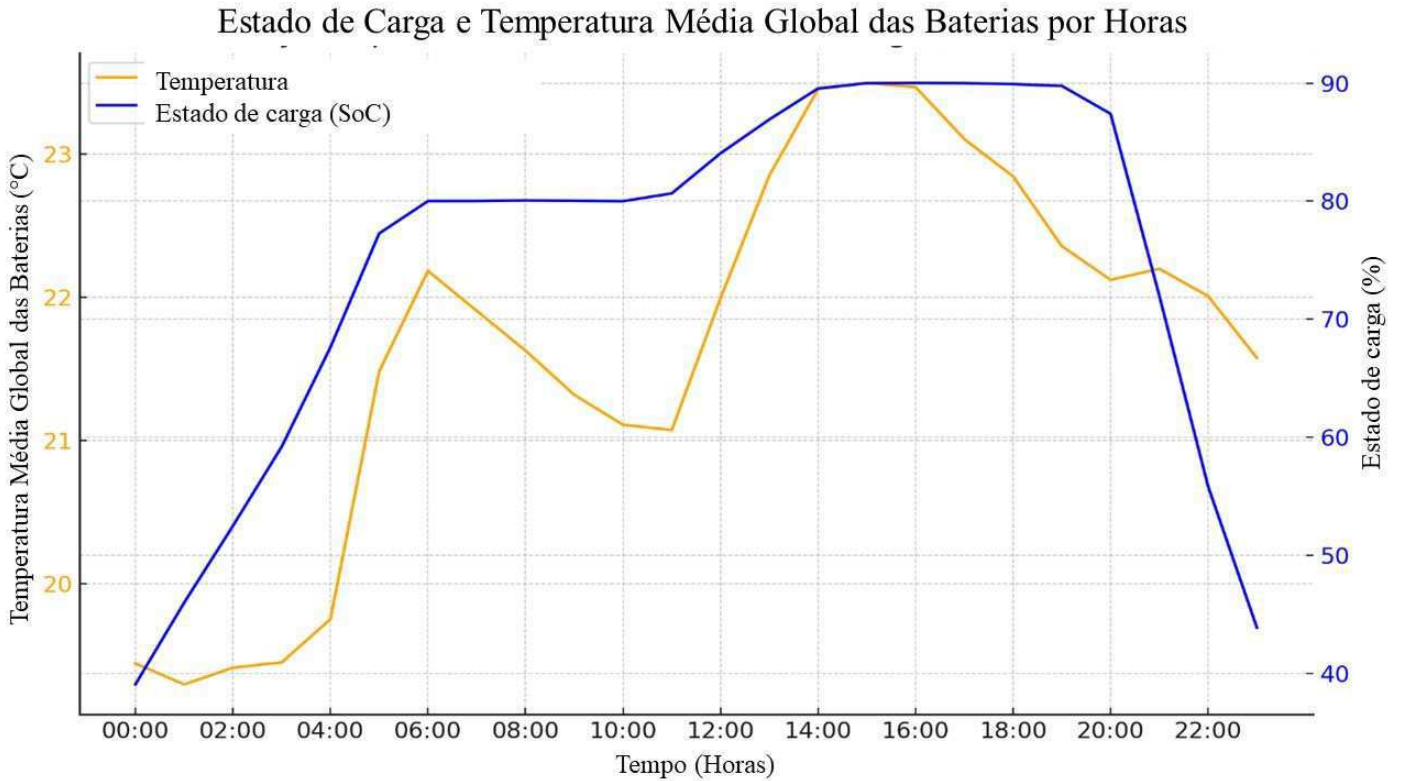
Figura 19 – Tensão da bateria x SoC



Fonte: Próprio autor

A tensão da bateria reflete o nível de carga da bateria, a tensão tende a aumentar conforme a bateria é carregada e a diminuir conforme é descarregada. Esse gráfico destaca a correlação direta entre o SoC e a tensão da bateria, com ambos os parâmetros se ajustando conforme o ciclo de carga e descarga do BESS. Com as alterações da tensão e da corrente da bateria durante sua operação, é de suma importância averiguar o comportamento da temperatura das baterias, uma medida de segurança crítica do sistema. Na Figura 20, temos a relação do estado de carga e da temperatura média das baterias.

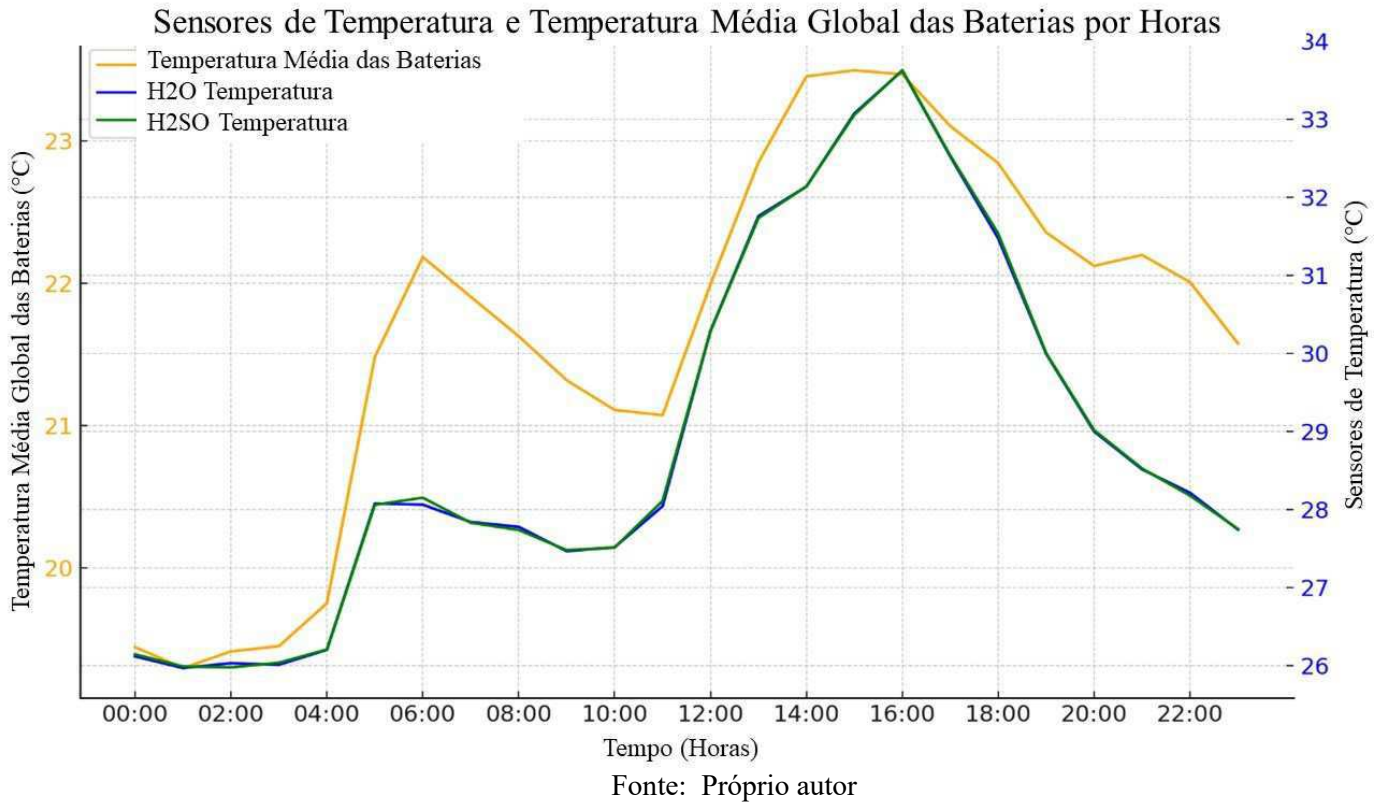
Figura 20 – Temperatura das baterias x SoC



Fonte: Próprio autor

Notamos que quando o SoC aumenta (carregamento), há uma tendência leve de aumento na temperatura. Isso é esperado, pois o processo de carregamento de uma bateria envolve a movimentação de íons, gerando calor. A temperatura tende a se estabilizar ou diminuir levemente quando o SoC está caindo (descarregamento). Isso pode ser devido ao fato de que, durante a descarga, o sistema está liberando energia, mas sem gerar tanto calor como no processo de carga. Observamos que a temperatura possui pequenas variações, como foi mostrado na análise exploratória, no Figura 21 é possível entender o comportamento do sistema HVAC.

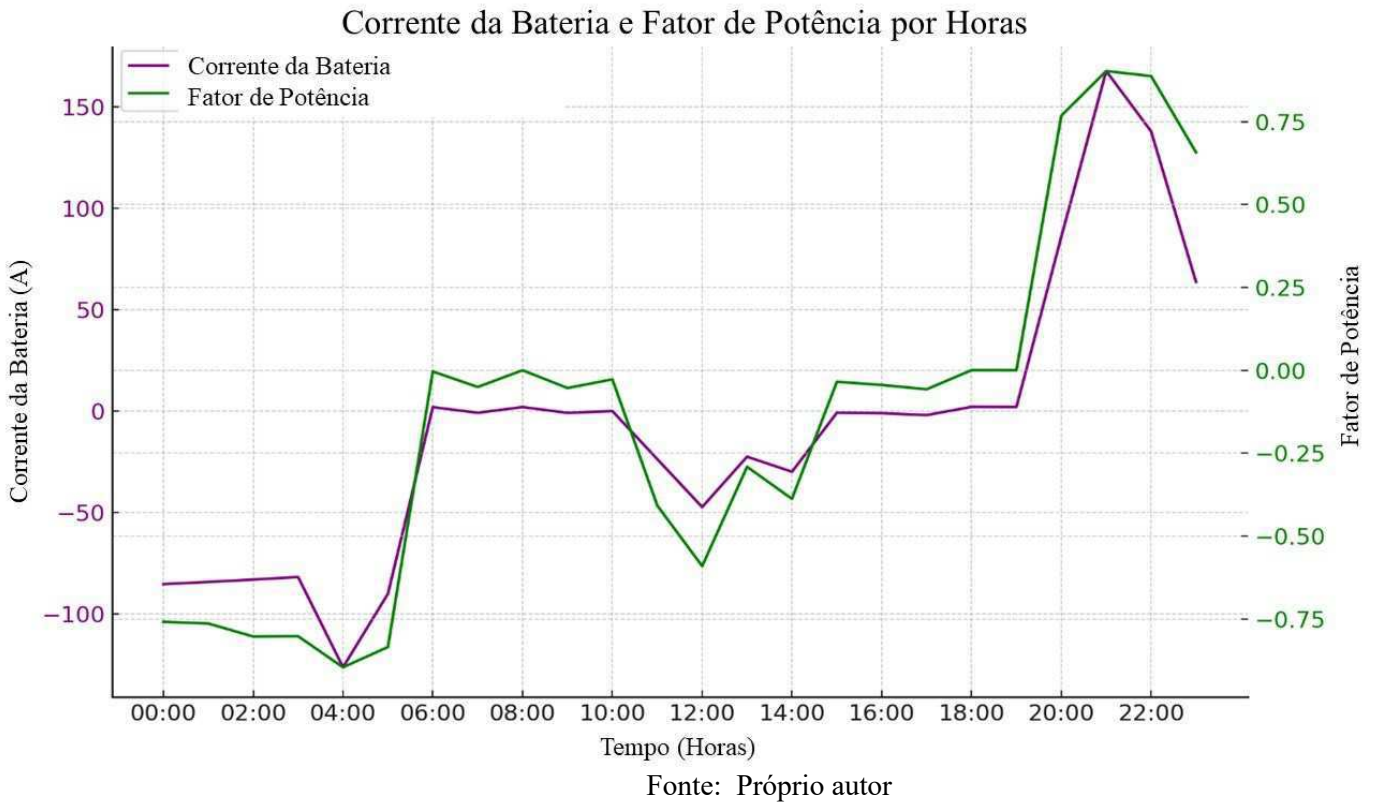
Figura 21 – Atuação dos sensores do BESS



A leitura desses sensores indica a atuação do sistema de resfriamento. Se a grandeza medida pelos sensores aumenta conforme a temperatura da bateria aumenta, é sinal de que o sistema de resfriamento está respondendo ao aquecimento das baterias. Este gráfico permite visualizar como o sistema de resfriamento reage ao aquecimento das baterias, o que é crucial para garantir a segurança e o desempenho do BESS.

O BESS do ITEM apresenta outra importante função, o controle de potência reativa e estabilidade das tensões de fase. Desta forma, analisamos o fator de potência, da potência reativa e das tensões de fase, com objetivo de compreender o comportamento dessas grandezas durante o processo de carga e descarga do sistema. A Figura 22 mostra a relação entre a corrente da bateria, indicando os processos de carga e descarga, e o fator de potência ao longo do tempo. Essa análise é fundamental para entender como o BESS opera não apenas como uma fonte de energia, mas também como um estabilizador da rede, auxiliando na compensação de potência reativa.

Figura 22 – Corrente da bateria x fator de potência



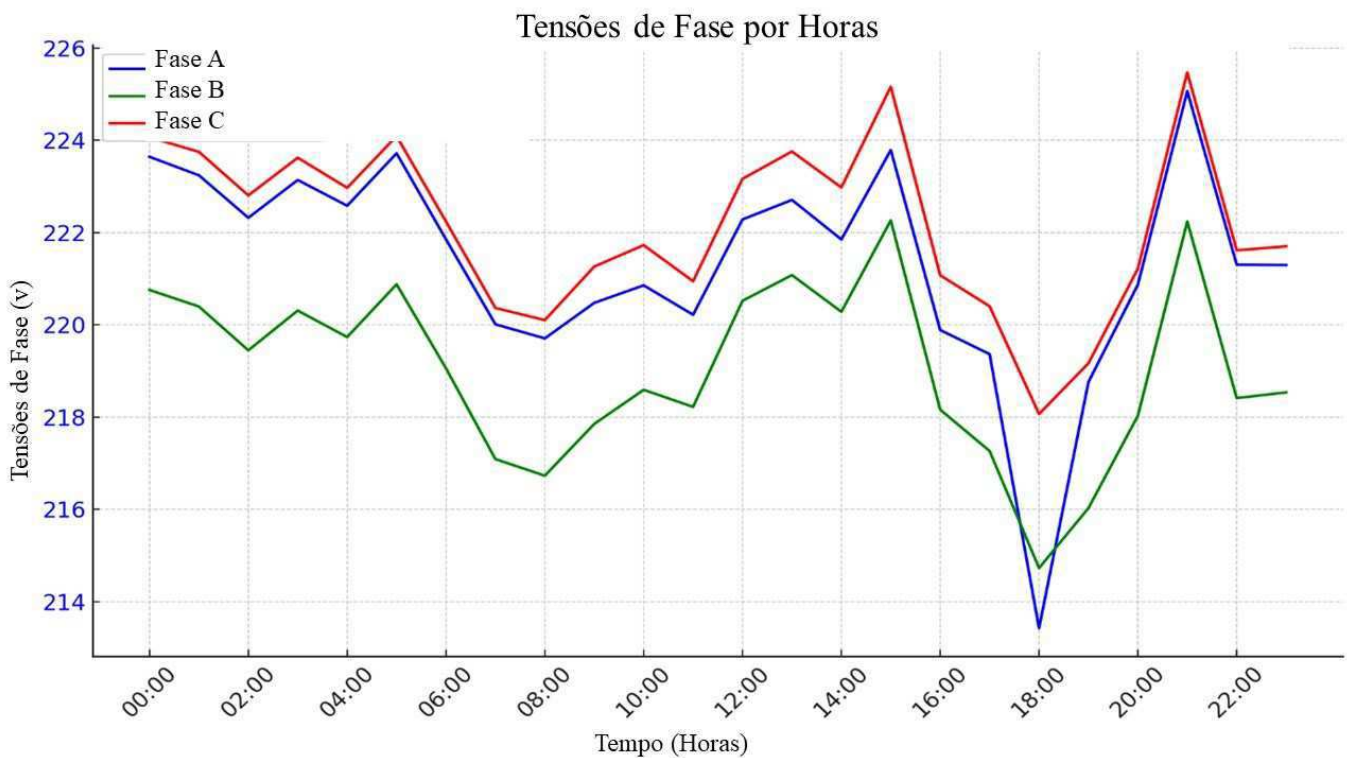
A corrente da bateria reflete diretamente os processos de carga e descarga do BESS. Corrente positiva indica que o BESS está em modo de descarga, ou seja, atuando como uma fonte de energia, fornecendo energia para a rede ou para as cargas conectadas. Já a corrente negativa indica o inverso, o BESS está em modo de carga, absorvendo energia da rede ou de uma fonte de geração.

Durante os períodos de descarga do BESS, a corrente da bateria é positiva, e o fator de potência tende a permanecer positivo, próximo de 1, indicando uma operação eficiente, onde a maior parte da energia fornecida é utilizada diretamente como potência ativa. O BESS está contribuindo de forma positiva para a rede, com pouca necessidade de compensação de reativos, ou seja, está atuando como uma fonte de energia eficiente.

Já nos momentos de carga, o fator de potência tende a cair, refletindo a necessidade de compensação de reativos. Nessa condição, o BESS pode estar atuando como um compensador de potência reativa, ajustando a tensão da rede ao injetar ou absorver potência reativa. Isso é essencial para manter a estabilidade da rede, especialmente em cenários onde há variações de carga ou produção de energia, como em sistemas fotovoltaicos intermitentes.

Quando o BESS não está realizando o processo de carga ou descarga, a corrente da bateria é próxima de zero, isso significa que não há fluxo de potência ativa. Nesse momento, o fator de potência pode cair para zero porque não há energia ativa sendo utilizada, apenas energia reativa, ou simplesmente porque o sistema está inativo sem realizar compensação de reativos. Entretanto, mesmo sem corrente de carga ou descarga, o BESS pode estar atuando para compensar potência reativa. Isso significa que, apesar de não estar movimentando potência ativa, ele ainda pode estar equilibrando os reativos na rede, ajustando tensões e estabilizando o sistema. Agora, nas Figuras 23 e 24, vamos observar o comportamento das tensões de fase durante este dia de operação e a ação na potência reativa em uma das fases.

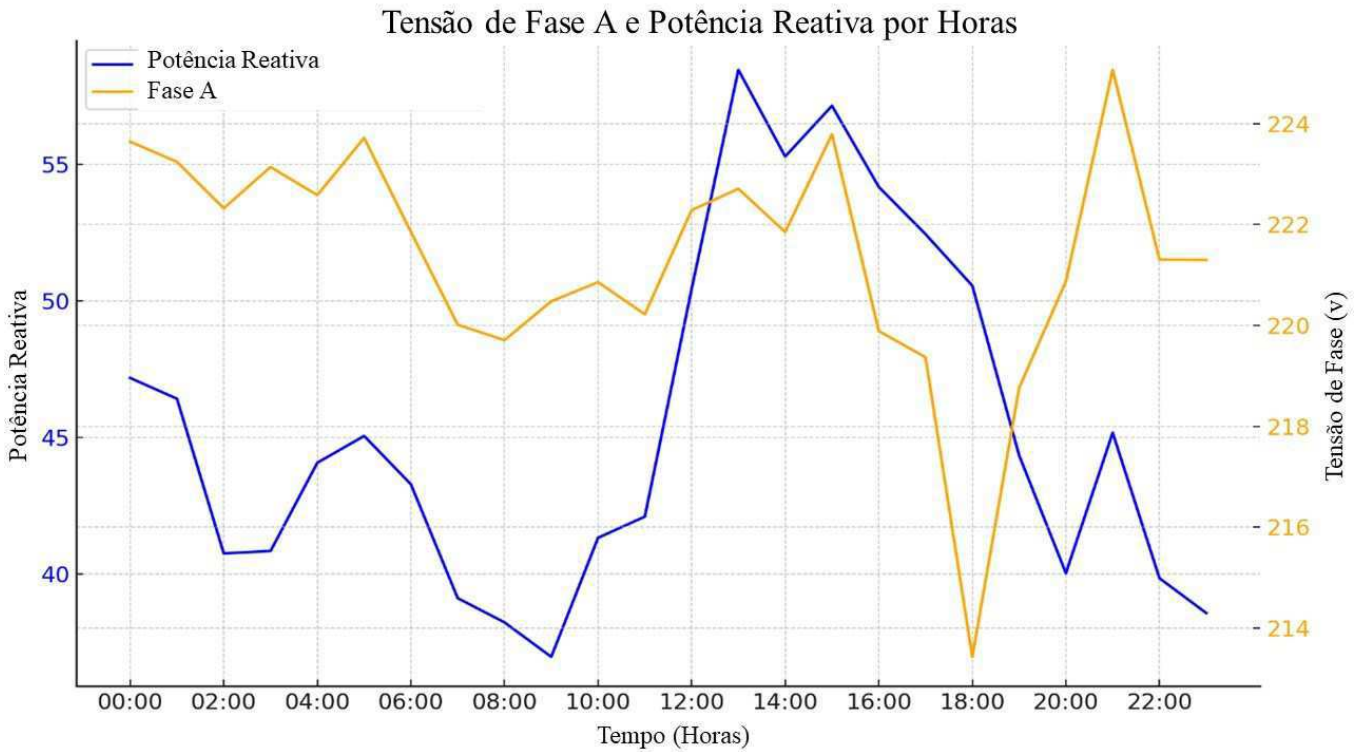
Figura 23 – Tensões de fase



Fonte: Próprio autor

As tensões das fases A, B e C estão próximas e com pouca variação, sugerindo que as cargas estão sendo distribuídas de maneira uniforme entre as fases, logo, o sistema está balanceado. As flutuações são normais, podemos observar que todas as fases se alteram de maneira parecida, sendo considerado normal, além do fato de estarem dentro do padrão de qualidade de energia PRODIGIT, onde o limite de variação de tensão é de $\pm 5\%$. Na Figura 24, é possível observar a atuação do BESS na compensação de reativos e seu impacto na tensão de fase A.

Figura 24 – Tensão fase A x Potência reativa



Fonte: Próprio autor

A tensão da fase reflete diretamente a condição da rede, podendo flutuar com a demanda e a oferta de energia, e uma variação na tensão pode indicar desequilíbrios na rede, como excesso de carga ou baixa oferta de energia. Flutuações na tensão podem ser indicativas de problemas de estabilidade, e é aqui que o BESS pode intervir, ajustando a potência reativa para manter a tensão dentro de uma faixa ideal. Quando o BESS injeta ou absorve potência reativa, ele está compensando desequilíbrios na rede, com o objetivo de estabilizar as tensões e melhorar o fator de potência. Analisando o gráfico, ao comparar o comportamento da potência reativa com as flutuações na tensão de fase A, podemos identificar momentos em que o BESS está ativamente corrigindo o fator de potência e estabilizando a tensão.

Outra importante atuação deste BESS, que não foi possível observar neste dia de análise, é a atuação do sistema quando a carga ultrapassa a demanda contratada, o que iria gerar multas altíssimas, o BESS atua neste cenário, permitindo que o cliente continue sua operação sem pagar multa a concessionária.

6 CONCLUSÃO

O estudo da operação de um Sistema de Armazenamento de Energia com Baterias em um ambiente real evidencia o potencial desta tecnologia para enfrentar os desafios associados à integração de fontes renováveis no sistema elétrico. A expansão de energias renováveis, como solar e eólica, tem impulsionado a necessidade de soluções que garantam a confiabilidade e estabilidade da rede. Nesse contexto, o BESS surge como uma ferramenta essencial, capaz de equilibrar a oferta e a demanda de eletricidade, atenuando a intermitência e proporcionando um fornecimento mais previsível e controlado.

Além das aplicações técnicas, os BESS também oferecem benefícios econômicos significativos. A capacidade de realizar arbitragem de energia, armazenando eletricidade durante períodos de baixa demanda e liberando-a durante os picos de consumo, possibilita não apenas uma economia de custos, mas também a criação de oportunidades de receita para as operadoras de energia.

Desta forma, para aplicações em grandes parques de geração de energia elétrica, nas linhas de transmissão sobrecarregadas e em sistemas isolados, o BESS possui um investimento viável, uma vez que substituir uma linha de transmissão ou construir uma para um sistema isolado, que muitas vezes não é permitido pelos órgãos de prevenção ambiental, se torna bem mais caro. Entretanto, para o cliente final, o investimento para implementação do BESS é mais caro que alternativas que já estão no mercado, como os geradores, mas, com o aperfeiçoamento das tecnologias e o barateamento das baterias, o sistema BESS poderá se tornar ainda mais viável para esses consumidores.

Em termos de sustentabilidade, os BESS contribuem para a descarbonização do setor elétrico ao permitir que as energias renováveis sejam utilizadas de forma mais eficiente, reduzindo a dependência de fontes fósseis e diminuindo as emissões de gases de efeito estufa. Com o avanço da ciência de dados e a aplicação de técnicas de análise preditiva, a operação dos BESS pode ser ainda mais otimizada, identificando padrões e antecipando necessidades de manutenção, o que melhora o desempenho geral do sistema e minimiza os riscos de falhas.

O sistema de armazenamento de energia por baterias do ITEMME desempenha importantes funções para o cliente final, garantindo segurança, eficiência e economia. Com o estudo realizado, conseguimos entender a importância dos sistemas de armazenamento de energia no cenário atual, estudando as diferentes tecnologias presente na engenharia, e

aperfeiçoamos nossos conhecimentos no BESS, compreendendo o funcionamento de todos os componentes que compõem o sistema e observar, no estudo de caso, algumas das principais aplicações para o cliente final, a arbitragem, a estabilização da rede e a compensação de reativos.

Por fim, os resultados obtidos reforçam que os BESS são uma tecnologia essencial para a transição energética, atendendo às demandas de um sistema elétrico moderno, sustentável e resiliente. O estudo conduzido demonstra que, com a implementação de metodologias adequadas de análise de dados e monitoramento contínuo, é possível maximizar a eficiência e a longevidade dos BESS, garantindo um papel cada vez mais relevante desses sistemas na matriz elétrica global. Assim, à medida que os desafios energéticos evoluem, os BESS se consolidam como uma resposta tecnológica de ponta, promovendo um futuro energético mais seguro e sustentável.

REFERÊNCIAS

1. **O sistema em números – ONS.** Disponível em <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em 25 jun. 2024.
2. **Acervo da Moura.** Acesso em 28 jun. 2024.
3. BUTURACHE, A.-N.; STANCU, S. **The use of artificial neural networks and big data infrastructure for predictive analytics in solar energy.** Proceedings of the International Conference on Business Excellence, v. 15, n. 1, p. 292–301, 1 dez. 2021.
4. CHEN, Haisheng. et al. **Progress in electrical energy storage system: A critical review.** Progress in Natural Science, v. 19, p. 291-312, 10 mar 2009.
5. Marcos Aurélio. **Sistema de armazenamento de energia.** Profissionais do Futuro: Competências para a Economia Verde, 2023.
6. GRUS, J. **Data science do zero: primeiras regras com o Python.** 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016.
7. **O que é uma bateria de chumbo-ácido? Construção, operação e carga/descarga.** Disponível em <https://electricalacademia.com/batteries/lead-acid-battery-construction-working-charging/>. Acesso em 21 jul. 2024.
8. **Baterias de chumbo-ácido: Exemplos e usos.** Disponível em <https://www.batteryskills.com/lead-acid-batteries-examples-and-uses/>. Acesso em 21 jul. 2024.
9. João Henrique. **Desenvolvimento, implementação e simulação de um controlador para sistemas de armazenamento de energia com baterias.** Dissertação de mestrado FEUP, 2015.
Sistema de tecnologia aplicada (STA). **Baterias de lítio – íon.** Disponível em <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/baterias-de-litio-ion-principais-desafios-para-veiculos-eletricos>. Acesso em 02 ago. 2024.
10. Sistema de tecnologia aplicada (STA). **Balanceamento de baterias passivo versus ativo.** Disponível em <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/packs-de-baterias/balanceamento-de-baterias-passivo-versus-ativo>. Acesso em 02 ago. 2024.

11. Xavier, Lucas. et al. **Conversores de energia para sistemas de armazenamento de energia de bateria conectados a sistemas de média tensão: uma revisão abrangente.** BMC Energia, 16 jul. 2019.
12. Oliver. **Sistemas de conversão de energia (PCS) em contêineres de sistemas de armazenamento de energia de bateria (BESS): uma visão geral abrangente.** Disponível em <https://www.tls-containers.com/tls-blog/power-conversion-systems-pcs-in-battery-energy-storage-systems-bess-containers-a-comprehensive-overview>. Acesso em 05 ago. 2024.
13. MORNSUN. **Power Solution for Energy Storage System.** Disponível em <https://www.mornsun-power.com/html/support-detail/630.html>. Acesso em 05 ago. 2024.
14. Lypskyi, Yevhenii. **Soluções de software de gerenciamento de energia: soluções prontas vs. soluções personalizadas.** Disponível em <https://tech-stack.com/blog/energy-management-system/>. Acesso em: 06 ago. 2024.
15. Nashvinder Singh; Jigeesha Upadhaya. **Benefícios do BESS: Como os sistemas de armazenamento de energia em bateria dão suporte à rede.** Disponível em <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-support-grid>. Acesso em: 06 ago. 2024.
16. Florides, Michalis, et al. **Enabling rising penetration and added value of photovoltaic generation by implementation of advanced storage systems (Erigeneia).** 9th Solar Integration Workshop, 2019.
17. FIKE. **Segurança de Vida e Proteção de Ativos Críticos.** Disponível em <https://www.fike.com/>. Acesso em: 06 ago. 2024.
18. Balaraman, Kavya. **Pesquisa destaca problemas de detecção e supressão de incêndio em sistemas de armazenamento de baterias.** Disponível em <https://www.pv-magazine.com/2024/02/16/survey-highlights-fire-detection-suppression-issues-in-battery-storage-systems/>. Acesso em: Acesso em: 06 ago. 2024.
19. Fitzgerald, Garrett, et al. **The economics of battery energy storage.** Disponível em: www.rmi.org/electricity_battery_value. Acesso em 07 ago. 2024.
20. Luiz, Pablo. **Sistema de armazenamento de energia utilizando bateria com aplicação para suavização de potência.** Dissertação de mestrado, UFPE, 2018.

21. Ini, Luis. **Primeira bateria de grande porte do Brasil entra em operação.** Disponível em <https://www.pv-magazine.com/2022/12/01/brazils-first-large-scale-battery-goes-online/>. Acesso em 10 ago. 2024.
22. Vale. **Vale inova ao usar bateria para reduzir consumo e custo de energia elétrica em terminal de minério.** Disponível em <https://vale.com/pt/w/vale-inova-ao-usar-bateria-para-reduzir-consumo-e-custo-de-energia-el%C3%A9trica-em-terminal-de-min%C3%A9rio>. Acesso em 10 ago. 2024.
23. OICS – Observatório de inovação para cidades sustentáveis. **Sistema de armazenamento no Sul da Austrália (Hornsedale Power Reserve – HPR).** Disponível em https://oics.cgee.org.br/estudos/-/estudo-de-caso/article/sistema-de-armazenamento-no-sul-da-australia-hornsedale-power-reserve-hpr-_5d604b3d338ffa6826a81d92/como-replicar. Acesso em 10 ago. 2024.
24. Vistra Corp. **A Vistra conclui a expansão do sistema de armazenamento de energia de bateria em sua principal instalação na Califórnia.** Disponível em <https://investor.vistracorp.com/2021-08-19-Vistra-Completes-Expansion-of-Battery-Energy-Storage-System-at-its-Flagship-California-Facility>. Acesso em 10 ago. 2024.
25. Baghta et al. **Optimization of Battery Energy Storage System (BESS) sizing for solar power plant at remote área.** 2nd International Conference on Green Energy and Environment (ICoGEE), 2020.
26. GONÇALVES, Pollyanna. **Afinal como se desenvolve um projeto de Data Science?** Medium. Disponível em: <https://medium.com/techbloghotmart/afinal-comose-desenvolve-um-projeto-de-data-science-233472996c34>. 2018. Acesso em 20 ago. 2024.
27. Wu e Tang. **Frequency Support by BESS – Review and Analysis.** 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE), 2018.
28. Severino, Elizaldo. **Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias: Histórico, Aplicações e Desafios.** TCC, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, (2023).
29. Neves, Vitor et al. **Desenvolvimento de um Sistema de Armazenamento de Energia Operando em Paralelo com a Rede.** IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, 2022.