



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

DIEGO HENRIQUE DO AMARAL
RAFAEL YASSUO SINOHARA

Estudo de Caso do Banco de Baterias LiFePO₄ 250kW/500kWh instalada na UHE
Sérgio Motta Rosana-SP

Rosana - SP
2022

**DIEGO HENRIQUE DO AMARAL
RAFAEL YASSUO SINOHORA**

**Estudo de Caso do Banco de Baterias LiFePO_4 250kW/500kWh instalada na UHE
Sérgio Motta Rosana-SP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria de Curso de Engenharia de
Energia do Campus de Rosana, Universidade
Estadual Paulista, como parte dos requisitos
para obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia de Energia.

Orientador(a): Prof. Dr. José Francisco
Resende da Silva

Rosana - SP
2022

A485e	Amaral, Diego Henrique Estudo de Caso do Banco de Baterias LiFePO4 250kW/500kWh instalada na UHE Sérgio Motta Rosana-SP / Diego Henrique Amaral. -- , 2022 65 p. Trabalho de conclusão de curso (-) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana, Orientador: José Francisco Resende Silva 1. Banco de baterias. 2. Sistema elétrico de potência. 3. Pesquisa e desenvolvimento. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

S617e	Sinohara, Rafael Yassuo Estudo de Caso do Banco de Baterias LiFePO4 250kW/500kWh instalada na UHE Sérgio Motta Rosana-SP / Rafael Yassuo Sinohara. -- , 2022 65 p. Trabalho de conclusão de curso (-) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana, Orientador: José Francisco Resende Silva 1. Banco de baterias. 2. Sistema elétrico de potência. 3. Pesquisa e desenvolvimento. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

DIEGO HENRIQUE DO AMARAL
RAFAEL YASSUO SINOHARA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Francisco Resende da Silva
Orientador/UNESP-Rosana

Prof. Dr. Lucas Teles de Faria
UNESP-Rosana

Prof. Dr. Kleber Rocha de Oliveira
UNESP-Rosana

Dezembro 2022

Dedico este trabalho de modo especial, à
minha família, amigos e a todos que nos apoiaram, de forma
direta ou indireta, durante essa jornada.

“Hey you, you’re finally awake...”

Ralof.

RESUMO

Este estudo aborda aspectos fundamentais que envolvem uma análise do uso de baterias no mundo, desde baterias de equipamentos portáteis como computadores e celulares até banco de baterias utilizados em larga escala no sistema elétrico de potência. Com intuito de exemplificar a aplicação de potência, este trabalho descreve o banco de baterias do Projeto de Pesquisa e desenvolvimento da ANEEL na chamada 21, o PD-00061-0054/2016 na UHE Sérgio Motta no município de Rosana, São Paulo. O banco de baterias está instalado no serviço auxiliar da hidroelétrica e tem potência nominal de 250 kW com uma capacidade de 500 kWh ao longo de duas horas, faz uso de baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO_4) da OptimunNano, um inversor bidirecional com base em IGBT da Growatt que se comunica diretamente a um supervisório online fornecido pela empresa do inversor. O supervisório em questão compila os dados e disponibiliza no supervisório do P&D, estes dados tiveram funcionam primordial nas manutenções corretivas dos equipamentos, as quais estão explanados neste estudo. As baterias são controladas pelo inversor supracitado e pelo sistema de controle chamado BMS (Battery Management System).

PALAVRAS-CHAVE: Banco de Baterias. Sistema Elétrico de Potência. Pesquisa e Desenvolvimento.

ABSTRACT

This study approaches fundamental aspects that involve an analysis of the use of batteries in the world, from batteries in portable equipment such as computers and cell phones to a bank of batteries used on a large scale in the electrical power system. In order to exemplify the application of power, this work describes the battery bank of the Research and Development Project of ANEEL in call 21, the PD-00061-0054/2016 at UHE Sérgio Motta in the municipality of Rosana, São Paulo. The battery bank is installed in the auxiliary service of the hydroelectric plant and has a nominal power of 250 kW with a capacity of 500 kWh over two hours, uses Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) batteries from OptimunNano, a bidirectional inverter based on Growatt IGBT that communicates directly with an online supervisor provided by the inverter company. The supervisory in question compiles the data and makes it available in the supervisory of the R&D, these data had a primordial function in the corrective maintenance of the equipment, as explained in this document. The batteries are controlled by the aforementioned inverter and the control system called BMS (Battery Management System).

KEYWORDS: Battery Energy Storage System. Electrical Power Sytem. Research and Development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Suprimento mundial de energia primária entre os anos de 1971 e 2016	16
Figura 2- Energia elétrica mundo gerada entre os anos de 1973 e 2019	17
Figura 3- Matriz energética brasileira	18
Figura 4- Matriz Elétrica brasileira	19
Figura 5- Histórico de consumo de elétrico no Brasil e previsão de demanda até 2050	20
Figura 6- Industria Global de baterias, demanda por aplicação.	21
Figura 7- Banco de Bateria UHE Itumbiara	24
Figura 8- Banco de baterias ventiladas, UHE – Itumbiara/Araporã.	26
Figura 9- Banco de Baterias VRL, UHE ITUMBIARA	27
Figura 10- Banco de baterias de Sódio-Enxofre	29
Figura 11- Baterias de íons de lítio utilizada em celulares	31
Figura 12- Bateria de Níquel	36
Figura 13- Regulação de frequência com banco de bateria	39
Figura 14- Energy Time Shift:	40
Figura 15- Peak Shaving:	42
Figura 16- Perfil de carregamento de célula de lítio-íon	45
Figura 17- Setor de armazenamento do P&D da UHE Sérgio Motta: Banco de baterias, célula a combustível, eletrolisador e Tanque de Hidrogênio	47
Figura 18- Transformador do BESS 350kVA, 460/380 V.	50
Figura 19- Layout Organizacional do container do BESS	50
Figura 20- Área das baterias	51
Figura 21- Layout externo do Growatt PCS250	52
Figura 22- Célula utilizada no BESS do projeto de P&D	54
Figura 23- Diagrama unifilar das conexões do pack de bateria	54
Figura 24- Diagrama unifilar das conexões das baterias no interior do pack	55
Figura 25- Diagrama unifilar de comunicação BMU/BMS Slave	57
Figura 26- Diagrama unifilar de comunicação BMU/BMS Slave/BMS Master	57
Figura 27- Diagrama unifilar de comunicação dos equipamentos do BESS	59
Figura 28- Tensão das células do Pack 02 da String 02	61
Figura 29- Tensão das células do Pack 04 da string 02	61
Figura 30- Tensão das células da String 06	63
Figura 31- Pack de Bateria Aberto/Célula danificada	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens das baterias de chumbo ácido	28
Tabela 2- Vantagens e desvantagens das baterias de sódio fundido	30
Tabela 3- Tipos de baterias de íons de lítio	32
Tabela 4- Vantagens e desvantagens das baterias de íons de lítio.	33
Tabela 5- Vantagens e desvantagens das baterias de níquel-cádmio	35
Tabela 6- Vantagens e desvantagens de baterias de Níquel Hidreto Metálico	36
Tabela 7- Especificação do PCS	52
Tabela 8- Composição química da célula do banco de baterias	53

Sumário

1. ANÁLISE ENERGÉTICA	15
1.1. SITUAÇÃO ENERGÉTICA NO MUNDO	15
1.2. SITUAÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL	17
1.3. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS	20
1.4. OBJETIVOS	21
1.5. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	21
2. BATERIAS, TIPOS E APLICAÇÕES	23
2.1. BANCO DE BATERIAS E MEIO AMBIENTE	24
2.2. PRINCIPAIS TIPOS DE BATERIAS.....	25
2.2.1 CHUMBO ÁCIDO	26
2.2.2 SÓDIO-ENXOFRE	29
2.2.3 ÍONS DE LÍTIO	30
2.2.4 NÍQUEL-CÁDMIO	34
2.2.5 NÍQUEL HIDRETO METÁLICO	35
3. APLICAÇÕES DE BANCOS DE BATERIAS	37
3.1. REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA.....	37
3.2. CONTROLE POR RAMPA	38
3.3. ENERGY TIME-SHIFT	39
3.4. PEAK SHAVING	41
3.5. UTILIDADE E CONGESTIONAMENTO	42
3.6. QUALIDADE DE ENERGIA	43
3.7. RESERVA GIRANTE.....	43
3.8. CARREGAMENTO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO	44
4. DESCRITIVO DO BANCO DE BATERIA.....	Erro! Indicador não definido.
4.1. PROJETO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO ANEEL, PD-00061-0054/2016	47
4.2. DESCRITIVO DO BANCO DE BATERIAS	49
4.2.1 TRANSFORMADOR ISOLADOR E LAYOUT DO CONTAINER	49
4.2.2 POWER CONVERSION SYSTEM – PCS	51
4.2.3 SISTEMA DE BATERIAS	53
4.2.4 SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO E REFRIGERAÇÃO	58
4.2.5 SUPERVISÓRIO – SHINE MASTER	59
4.3. MANUTENÇÕES CORRETIVAS	60
5. CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS	65

1. ANÁLISE ENERGÉTICA

Desde o século passado o consumo mundial de energia cresce exponencialmente, tendendo a manter este comportamento nos próximos anos. Para manter este ritmo de crescimento e continuar fornecendo a energia necessária para todas as atividades desempenhadas no mundo, é necessário rever as fontes de abastecimento energético, visto que em sua maioria são fontes não renováveis.

A matriz energética atual baseada em combustíveis fósseis, além de ser finita, trabalha como um catalisador do aquecimento global, emitindo grandes quantidades de gás carbônico na atmosfera. Neste cenário as energias renováveis aparecem como uma solução para o quadro geral, visto que resolvem ambos os problemas: têm reservas ilimitadas e são livres de emissão de dióxido de carbono.

Quase todas as energias renováveis são derivadas da energia solar: o vento, a radiação solar e a força da água são produtos diretos ou indiretos da atividade solar. Apenas a energia geotérmica escapa desse inventário. O sol envia cada ano para a superfície da Terra cerca de 10.000 vezes mais energia do que o planeta consome. Uma forma de aproveitamento direto da energia solar é através da geração fotovoltaica, baseada na conversão da radiação eletromagnética solar em eletricidade, que é cada vez mais reconhecida como uma fonte potencial de energia.

Mediante a demanda de amenizar a intermitência das fontes de energias renováveis, o armazenamento de energia em baterias deve aumentar exponencialmente, segundo a Bloomberg (2022), a capacidade instalada nos EUA de energia solar deve triplicar entre 2021 e 2030, impulsionando a capacidade instalada de armazenamento em baterias nos EUA de 5,7 GW (2021) para 107 GW em 2030.

A seguir será mostrado o panorama da situação energética no Brasil e no mundo, assim como um parecer a respeito do desenvolvimento do armazenamento eletroquímico em banco de baterias.

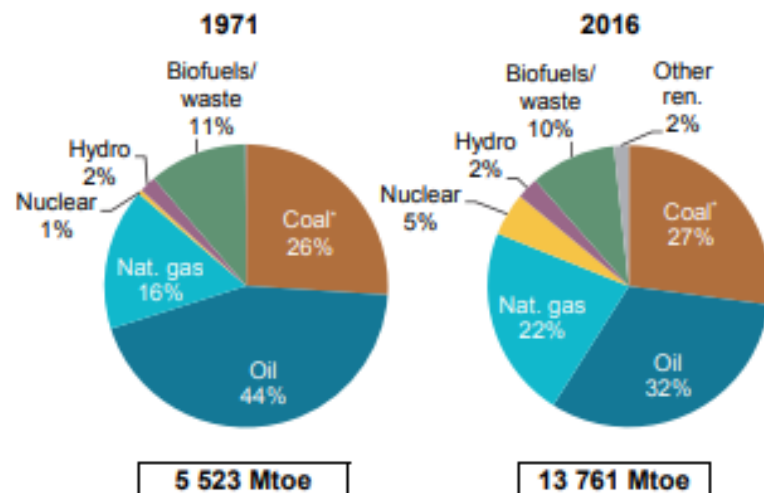
1.1. SITUAÇÃO ENERGÉTICA NO MUNDO

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2007), denomina-se fonte de energia primária aquela em que o produto energético utilizado descende diretamente da natureza, como o carvão mineral, petróleo, gás natural, energia solar, eólica, entre outros. Por sua vez, as fontes de energia secundárias utilizam meios energéticos resultantes de diversos processos de

transformação, tendo como exemplo a gasolina, óleo diesel, carvão vegetal, álcool etílico e a própria eletricidade.

O suprimento mundial de energia primária está exposto na Figura 1 e é possível verificar que, desde o ano de 1971 até 2016, houve um aumento de 149,15%, de 5.523 Mtep (megatoneladas equivalentes de petróleo) para 13.761 Mtep, segundo IEA (2018, p.7). Isto corresponde a um aumento médio de 3,31% ao ano, no período analisado. Nota-se, ainda, que a matriz energética mundial é composta fundamentalmente por fontes não renováveis, com destaque para o petróleo e o carvão mineral.

Figura 1- Suprimento mundial de energia primária entre os anos de 1971 e 2016



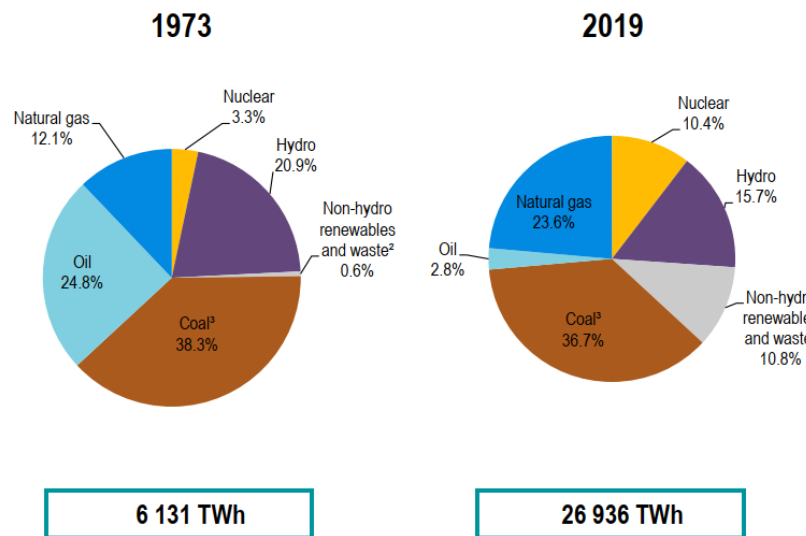
Fonte: Internacional Energy Agency (2021)

Percebe-se que durante os anos analisados houve uma transição na participação de cada matriz energética. Entretanto, o petróleo e o carvão mineral ainda dominam a maior parcela, assim como o gás natural, que ganhou destaque no montante de energia. Quanto às energias renováveis, nota-se que tiveram diferenças mínimas, visto que a participação dos biocombustíveis diminuiu ligeiramente, suprida pelo aumento de outras fontes renováveis, como eólica e solar. Já a matriz hidráulica permaneceu inalterada.

Analisando apenas a geração de eletricidade mundial, Figura 2, em um período próximo ao supracitado, constata-se que houve um salto de 6.161 TWh em 1973, para 26.936 TWh em 2019, contabilizando um aumento de 437%. Conforme o gráfico, a fonte energética predominante em ambos os casos foi o carvão mineral, mantendo uma participação de cerca de 36%. A parcela oriunda do petróleo diminuiu significativamente, com uma queda percentual de 22% no período analisado, enquanto a fração ocupada pelo gás natural subiu, de 12,1% para

23,6%. Quanto a energia nuclear, houve um aumento em sua contribuição em 7%, enquanto nas fontes hidráulicas houve uma redução de 5,2%, e nas fontes renováveis não hidráulicas (geotermal, solar, eólica, ondas/oceanos, biocombustíveis calor), houve um crescimento acima dos 10%, segundo IEA (2021, p.30).

Figura 2- Energia elétrica no mundo gerada entre os anos de 1973 e 2019



Fonte: Internacional Energy Agency (2021)

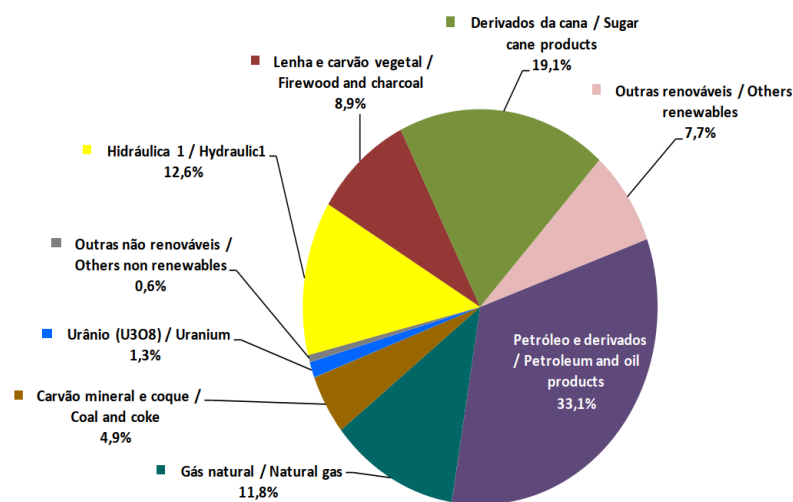
Como pode-se perceber, tanto o suprimento de energia primária quanto a geração de energia elétrica baseiam-se em combustíveis fósseis. Isso acarreta graves impactos climáticos, como descrito no último relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), o texto científico mais importante sobre mudança climática, o qual indicou que as emissões globais de gases de efeito estufa estavam, em 2016, em cerca de 52 GtCO₂e (gigatoneladas de CO₂ equivalente), com uma previsão de 52 a 58 GtCO₂e para 2030, IPCC (2016, p53-55).

Ainda de acordo com IRENA, (2021), para limitar o aquecimento global neste século a 1,5°C, como estabelecido em 2015 no Acordo de Paris, será preciso reduzir pela metade as emissões anuais em 2030, a taxas entre 25 e 30 GtCO₂e. Para tal, são necessárias transformações imediatas, dentre elas, a reestruturação da matriz energética elétrica mundial, até 2050, deverá ser composta de 70 a 85% por fontes de energia renováveis.

1.2.SITUAÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

De forma análoga, pode-se analisar a matriz energética brasileira. Como exposto na Figura 3, percebe-se que o quadro brasileiro, diferente do mundial, possui uma participação maior das fontes renováveis de energia, totalizando 48,3% em 2017 (MME, 2021). Tal característica é de suma importância, visto que quando analisada a emissão de gases de efeito estufa per capita no Brasil, percebe-se que o índice é menor que na maioria dos outros países, segundo Ministério de Minas e Energia (2021, p. 14-26).

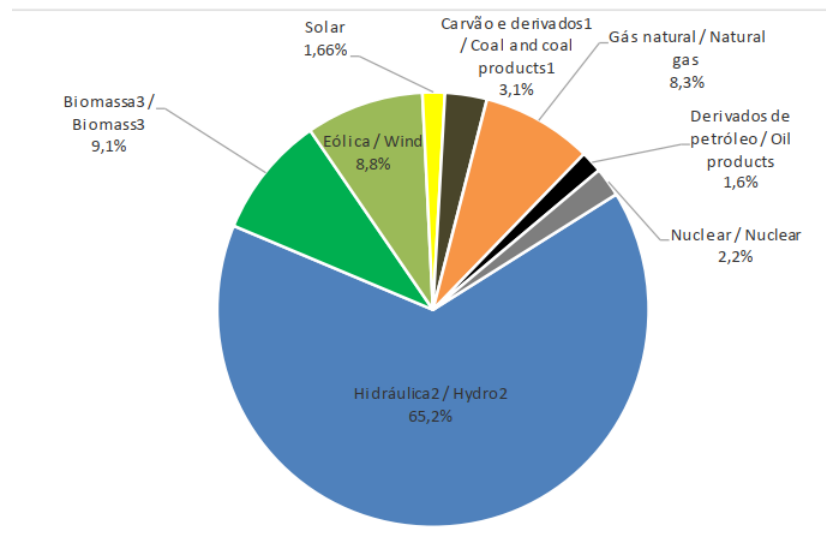
Figura 3- Matriz energética brasileira



Fonte: Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética (2021)

Tratando-se apenas da geração de eletricidade no Brasil, observa-se que esta apresenta um sistema essencialmente hidrotérmico, ou seja, com forte presença de hidrelétricas e termelétricas, como ilustrado na Figura 4. Em agosto de 2022, foi atingida a marca de 185 GW de potência instalada, com a região nordeste respondendo por 59% da capacidade instalado adicional no ano, segundo ANEEL (2022). A geração de energia elétrica no Brasil atingiu 621,2 TWh em 2020, com um resultado 0,8% menor ao de 2019, segundo o Ministério de Minas e Energia (2021, p. 14-26).

Figura 4- Matriz Elétrica brasileira



Fonte: Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética (2021)

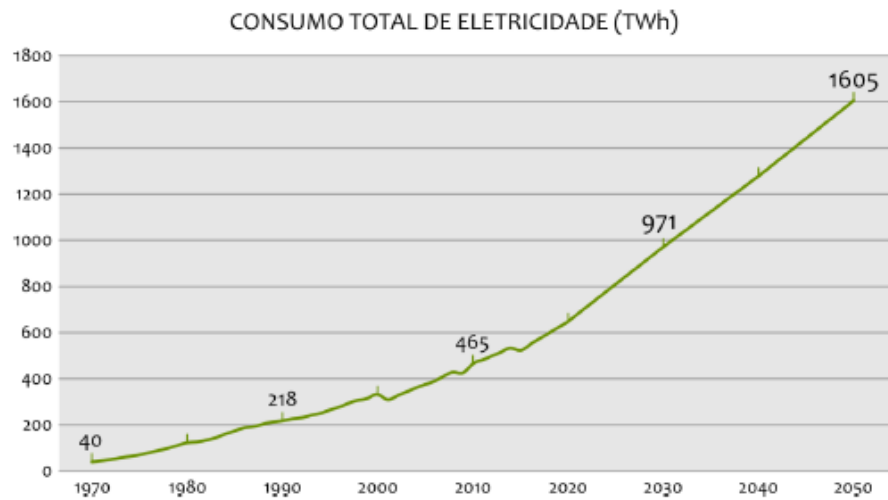
O Brasil possui uma matriz elétrica majoritariamente composto por fontes renováveis de energia, visto que elas constituem aproximadamente 84,8% da eletricidade gerada (EPE, 2021). Entretanto, de toda essa geração, a maioria é proveniente de hidrelétricas, 65,2%, que, embora utilize um meio renovável, acarreta uma série de impactos socioambientais.

De acordo com F. Emílio (2010, p. 3-5) problemas ambientais, como a grande área de desmatamento com consequente perda de fauna, flora, e sociais, como a transferência de diversas famílias e o prejuízo econômico causado a elas, não são incluídos no custo total dos projetos de hidrelétricas. Ainda, as mudanças climáticas e consequente decaimento na oferta hídrica também são deixados de lado, comprometendo a geração futura das unidades construídas.

Somados a isto F. Emílio (2010, p. 3-5) afirma também que os custos advindos da remoção das barragens, quando passada sua vida útil, são altíssimos, e não são inclusos no orçamento total da construção. Outro problema surge a partir da construção da hidrelétrica: o processo de apodrecimento causado pela inundação resulta em uma grande emissão de metano, que se comparado ao gás carbônico, tem impacto 21 vezes maior sobre o aquecimento global.

A demanda de energia elétrica no Brasil tende a crescer demasiadamente nos próximos anos, como aponta a Figura 5, que ilustra o consumo histórico a partir de 1970, assim como uma previsão de demanda até 2050 de PEREIRA et. al. (2019, p. 14). Somando às desvantagens da implantação de novas hidrelétricas, citadas anteriormente, resultam em um quadro em que é necessário diversificar as fontes de energia que compõem a matriz elétrica brasileira, sendo ideal usufruir das que causem o menor impacto ambiental possível.

Figura 5- Histórico de consumo de elétrico no Brasil e previsão de demanda até 2050



Fonte: PEREIRA et al, (2019)

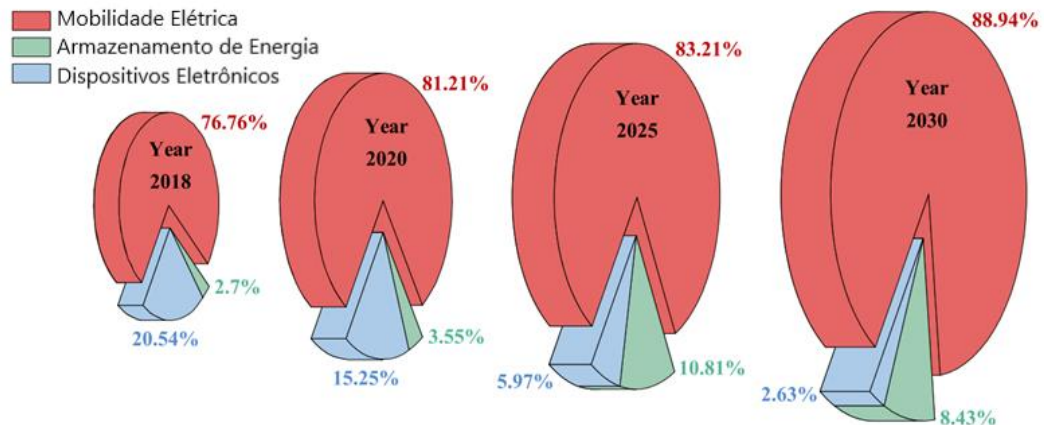
1.3.ARMazenamento de energia em baterias

Com o vasto consumo de combustíveis fósseis, conforme supracitado, e aumento de emissões de gases de efeito estufa, que podem elevar a temperatura global acima de 1,5 °C até 2050, segundo o IRENA (2022, p. 33), trazem impactos ambientais drásticos que levou a um aumento da demanda global para o desenvolvimento de métodos de armazenar energia de forma sustentável. No entanto, a eletricidade produzida a partir dessas fontes renováveis, como a solar e eólica, pode ser armazenada de forma eficiente para abastecer o mundo com energia sob demanda Yang Z et. al. (2011, p. 3577-3580). Entre os vários dispositivos de armazenamento de energia, as baterias, atualmente utilizadas em eletrônicos de consumo, representam a principal tecnologia de armazenamento de energia eletroquímica devido à alta densidade energética, principalmente do Lítio, e acessibilidade gama de variabilidade química.

Com a deterioração ambiental cada vez maior, o armazenamento de energia eletroquímico também pode ser utilizado em veículos elétricos, estão sendo estrategicamente desenvolvidos para um contexto mais sustentável e menos dependente do petróleo e derivados.

Além do uso estacionário e em veículos elétricos, as baterias, principalmente à lítio, dominaram dispositivos portáteis como celulares, notebooks, relógios e afins. A figura 6 classifica, nos anos de 2018 e 2022, a demanda por aplicação de baterias em três principais tipos, mobilidade elétrica, armazenamento de energia, e uso em eletrônicos, além de estimar cenário do percentual de uso das baterias para 2025 e 2030, Wei Liu et al. (2022, p. 5)

Figura 6- Indústria Global de baterias, demanda por aplicação.



Fonte: WEI L et al (2022)

1.4.OBJETIVOS

Considerado o contexto descrito, este estudo visa especificar o banco de baterias implementado na planta piloto de armazenamento de energia do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, o PD-00061-0054/2016 na UHE Sérgio Motta e documentar experiência na operação de modernas tecnologias de armazenamento eletroquímico de modo a obter expertise em armazenamento de energia, bem como identificar insuficiências a serem enfrentadas para que seja possível efetivamente explorar tais tecnologias no contexto brasileiro, como por exemplo manutenção corretiva deste tipo de sistema.

O presente estudo justifica-se no cenário energético atual brasileiro, visando implementar, adquirir conhecimento deste tipo de tecnologia para aplicação em larga escala. Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento como o PD-00061-0054/2016 na UHE Sérgio Motta e o P&D ANEEL PD-0394-1606/2016 na UHE Itumbiara (Furnas) permitem com quem a tecnologia amadureça e viabilize aplicações em larga escala, visando benefício para o consumidor e o setor elétrico, como por exemplo o Projeto da ISA CTEEP que implementou 30 MW/60MWh de sistema de baterias com o intuito de fornecer energia para até 2 milhões de pessoas no litoral Sul Paulista durante o verão, Valor Econômico (2022).

1.5.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O documento está dividido em cinco capítulos, conforme descrito a seguir.

O capítulo 1 apresenta o cenário energético mundial e brasileiro e uma introdução das aplicações armazenamento de energia eletroquímico, assim como os objetivos principais do presente trabalho.

O capítulo 2 aborda diferentes tipos de baterias, mostrando algumas características e aplicações no mercado.

O capítulo 3 descreve técnica de uso e vantagens da utilização de bancos de baterias em sistemas elétricos de potências.

O capítulo 4 é focado no sistema de armazenamento de energia utilizado no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, além de abordar experiência de manutenção e operação do sistema.

E, por fim, o capítulo 5 denota a conclusão do presente trabalho.

2. BATERIAS, TIPOS E APLICAÇÕES

Com o intuito de amenizar problemas ambientais globais, as energias renováveis, como a energia solar e eólica serão amplamente utilizadas e isto significa que o futuro do fornecimento de energia será influenciado pela intermitência das fontes renováveis de energia e a produção de eletricidade seguirá o clima e o excedente e déficit de energia produzidos precisam ser equilibrados, segundo IEC (2009, p11-22).

Qualquer déficit deve ser compensado para satisfazer a demanda da rede e a demanda de energia. Estas compensações poderiam ser obtidas por fontes fósseis, no entanto, estas não são as únicas maneiras de compensar o déficit.

Melhoria do sistema de armazenamento de energia pode levar a usar menos combustível fóssil. Além disso, a produção de energia excedente pode ser desperdiçada quando não é necessária no lado da demanda. Portanto, energia valiosa pode ser efetivamente usada armazenando o excedente de eletricidade em bancos de baterias.

Além disso, devido ao rápido crescimento das energias renováveis, a comercialização de energia renovável está se tornando cada vez mais importante, isso significa uma previsão da variação da oferta e demanda de energia.

A longa distância entre a geração e o consumo da energia pode causar a instabilidade no fornecimento de energia da rede, que deve ser equilibrada. A previsão da variação da demanda e o equilíbrio com a energia de armazenamento pode ajudar a garantir a estabilidade da rede.

O armazenamento de energia elétrica em banco de baterias pode ser usado para melhorar a confiabilidade e a qualidade da fonte de alimentação, frequência e tensão IEC (2009, p11-22). Os sistemas de armazenamento de energia também podem suportar falhas de rede de energia devido a desastres naturais.

Os avanços na rede elétrica devem manter um sistema de fornecimento de eletricidade robusto e resiliente, e o armazenamento de energia pode desempenhar um papel significativo no atendimento desses desafios, melhorando as capacidades operacionais da rede, diminuindo custos e garantindo alta confiabilidade, além de adiar e reduzir a infraestrutura.

Finalmente, o armazenamento de energia em banco de baterias pode ser fundamental para a preparação para emergências, devido à sua capacidade de fornecer energia de reserva, bem como serviços de estabilização de rede.

2.1.BANCO DE BATERIAS E MEIO AMBIENTE

A geração de energia elétrica está mudando dramaticamente em todo o mundo devido à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e introduzir fontes de energia mistas. A rede de energia enfrenta grandes desafios em transmissão e distribuição para atender à demanda com variações diárias e sazonais imprevisíveis.

O Armazenamento de Energia Elétrica é reconhecido como uma tecnologia de suporte para ter um grande potencial em enfrentar esses desafios, em que a energia é armazenada em um determinado estado, de acordo com a tecnologia usada, e convertida em energia elétrica quando necessário, LUO et al. (2015, p. 37-40). Como por exemplo, a UHE de Itumbiara/Araporã que utiliza um banco de baterias, Figura 7, para excitar um dos geradores da hidrelétrica em caso de desligamento de todo ou parte do SIN (Sistema Interligado Nacional).

Figura 7- Banco de Bateria UHE Itumbiara



Fonte: Autoria própria.

O armazenamento de energia em banco de baterias tornar-se-á indispensável para mercados com grande expansão de energias renováveis, os quais buscam a redução do CO₂ e a implementação das redes inteligentes, IEC (2009, p11-22).

A bateria funciona limpa e permanece razoavelmente fria, sendo que a maioria das células seladas não tem aberturas, funciona silenciosamente e não vibra. Mesmo em baterias com materiais pesados, como o chumbo nas baterias de chumbo-ácido, componentes das baterias

podem ser devidamente descartados e reciclados. Isto está em forte contraste com as grandes células de combustível usadas em fontes fósseis (WOHLMUTH et al, 2014).

2.2.PRINCIPAIS TIPOS DE BATERIAS

Antes de se analisar as particularidades de cada tipo de bateria, é importante conhecer os termos técnicos que as descrevem. Esta seção tem o intuito de explicar os principais termos técnicos usados nas baterias.

Autodescarga é um processo espontâneo que ocorre nas baterias quando não estão em uso, que ocasiona descarga gradual causada por perdas internas devido a processos químicos das baterias. A autodescarga é uma taxa expressa em porcentagem da potência nominal da bateria que é perdida a cada mês.

Célula é a unidade eletroquímica básica da bateria, responsável por gerar uma tensão característica a qual depende dos materiais usados. A célula é formada por dois eletrodos (um cátodo e um ânodo) e o eletrólito

Densidade de carga é a capacidade nominal da bateria normalizada pelo volume (Wh/L) ou pela massa (wh/Kg).

Eletrodos são os materiais da célula eletroquímica dotados da capacidade de conduzir elétrons e pode atuar na sustentação estrutural para o material ativo e uma zona reacional rica em material eletroquimicamente ativo

Eletrólito é o meio de propagação que proporciona o transporte de íons entre cátodo e o ânodo.

Flutuação é o nome dado ao processo de manter as baterias carregadas ou próximo da carga total para evitar danos à bateria.

Material ativo é parte da célula de energia e é responsável direto na reação de carga e descarga da bateria.

Profundidade de descarga mensura percentualmente quanto da capacidade nominal da bateria foi retirada a partir do estado de carga total.

Separador é um material eletricamente isolante, micro poroso e permeável ao fluxo de íon, usado para evitar o contato direto entre as placas que formam a célula.

Sobre unidades, a quantidade de energia que um sistema consegue armazenar é medido em Watt-hora, a quantidade de energia que está sendo armazenada ou descarregada da bateria é medida em Watt.

As taxas de carga e descarga de uma bateria são regidas pela taxa Coulomb (C). A capacidade de uma bateria é normalmente classificada em 1C, o que significa que uma bateria totalmente carregada avaliada em 1Ah deve fornecer 1A por uma hora. A mesma bateria descarregando a 0.5C deve fornecer 500mA por duas horas, e a 2C ela fornece 2A por 30 minutos.

Perdas em descargas rápidas reduzem o tempo de descarga e essas perdas também afetam os tempos de carga. Algumas baterias de alto desempenho pode ser carregadas e descarregadas acima de 1C com estresse moderado.

2.2.1 Chumbo Ácido

Em 1859 *Gaston Planté* inventou a bateria que revolucionou a tecnologia atual, pela primeira vez tinha-se um processo reversível, ou seja, a partir daquele momento as baterias poderiam ser recarregadas graças a passagem de corrente elétrica reverter nos terminais da bateria.

Capaz de produzir e manter grandes volumes de energia, a bateria de chumbo-ácido, que associada a uma baixa resistência interna, foi capaz de alimentar vários circuitos a partir de uma única bateria.

A bateria de chumbo-ácido é composta basicamente por chumbo que compõem os eletrodos que estão mergulhados em uma solução aquosa, o eletrólito, de ácido sulfúrico. Os eletrodos geralmente têm forma de placas e estão isoladas eletricamente, imersos no eletrólito, em recipientes separados, ROSOLEM (2016, p. 8-12).

Se o eletrólito da bateria de chumbo-ácido for líquido, tal bateria é denominada bateria ventilada, se for imobilizado em gel ou separador de microfibras, é denominada VRLA (Valve Regulated Lead Acid).

Os tipos de bateria ventiladas, Figura 8, tem o eletrodo imerso em uma solução aquosa de ácido sulfúrico e durante o processo de flutuação da bateria ocorre a eletrolise da água gerando assim hidrogênio e oxigênio gasoso. Devido a tal característica, as baterias ventiladas de chumbo-ácido necessitam de manutenção e reposição de água, além disso aconselha-se não instalar este tipo de bateria em lugares com eletrônicos, pois os gases gerados durante a flutuação podem ter partículas de ácido sulfúrico, causando assim, corrosão de equipamentos eletrônicos próximos.

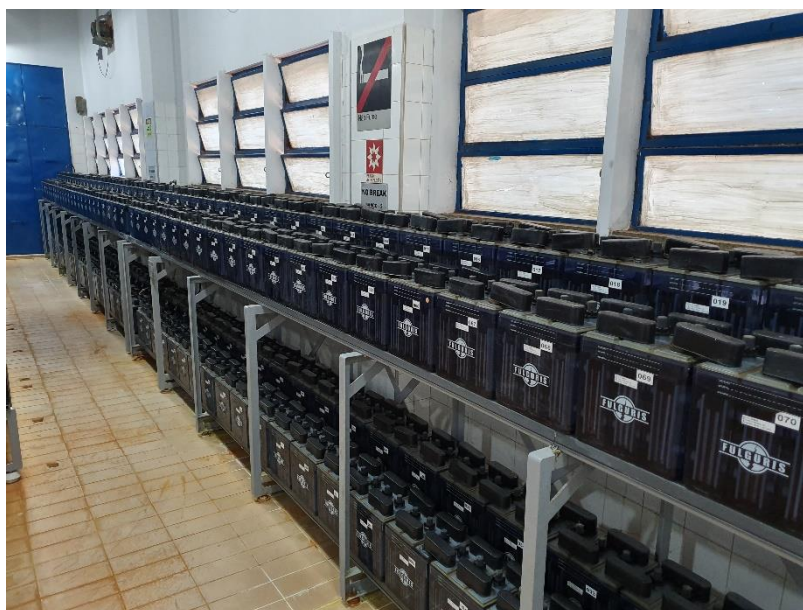
Figura 8- Banco de baterias ventiladas, UHE – Itumbiara/Araporã.



Fonte: Autoria própria

Já a bateria VRLA, Figura 9, é dotada de um eletrólito imóvel, o qual faz com que o oxigênio gasoso gerado migre da placa positiva para a placa negativa e reage novamente com o chumbo. Já o hidrogênio gerado é liberado por uma válvula de pressão para o ambiente. Desta forma a bateria VRLA não necessita de nenhum tipo de manutenção e pode ser instalada perto de materiais eletrônicos já que o hidrogênio não arrasta moléculas do ácido imobilizado, BERNDT (1995, p. 125-129).

Figura 9- Banco de Baterias VRL, UHE ITUMBIARA



Fonte: Autoria Própria

As baterias de chumbo-ácido VRLA são mais sensíveis a temperatura do que as ventiladas, por isso é recomendado que as baterias sejam instaladas em ambientes com temperaturas amenas ou até mesmo com temperatura controlada. O aumento da temperatura nesse tipo de bateria leva a uma perda brusca da vida útil causado pelo fenômeno denominado de avalanche térmica.

A avalanche térmica ocorre quando a geração de calor excede a capacidade da bateria e do ambiente de dissipá-la, e quando esta condição ocorre por muito tempo, a bateria perde uma quantidade significativa de água, ocasionando assim um aumento da corrente de carga (TUDOR, 2017).

O espaço de mercado das baterias de chumbo-ácido deve-se ao fato de serem mais baratas que outros tipos de baterias. A tabela 1 mostra as principais vantagens e desvantagens do uso de baterias de chumbo ácido.

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens das baterias de chumbo ácido

Vantagen	Desvantagem
Permanece por longos períodos em estado de flutuação sem danos	Elevado tempo de recarga, de 8 a 16 horas
Autodescarga de 40% ao ano, uma das melhores taxas do mercado de baterias recarregáveis	Tensões acima de 2,4 volts por célula, gera uma boa eficiência, porém acelera a corrosão da placa positiva
Altas taxas de descarga	Tensões baixas acarretam o acúmulo de sulfato na placa negativa, fazendo com que a bateria perca a capacidade de recarregar
	Descargas completas diminuem a vida útil da bateria
	Menor densidade de energia do mercado
	Baixo desempenho em baixas temperaturas.
	Não sustentável
	Perda brusca da vida útil com o aumento da temperatura

Fonte: Battery University (2022a)

Umas das aplicações das baterias de chumbo-ácido VRLA é em sistemas fotovoltaicos e eólicos. Em sistemas fotovoltaicos conectados ou não a rede elétrica, recomenda-se que possua as seguintes características: elevada capacidade de operar em regimes de ciclos de recarga/descarga, baixa manutenção, boa resistência em operar em condições de temperatura extremas (principalmente elevadas) e que seja segura. Apesar das baterias de chumbo-ácido não atender todas as características citadas, acabam sendo usadas em sistemas menores por serem financeiramente atraentes, BATTERY UNIVERSITY (2022a).

2.2.2. Sódio-enxofre

As primeiras baterias de sódio-enxofre datam a Segunda Guerra Mundial, as quais eram usadas pelo exército alemão principalmente para efetuar disparo de mísseis, pois a bateria permite tanto altíssimas taxas de descargas, como também uso contínuo e gradual.

A Ford instalou baterias de sódio-enxofre em alguns de seus carros em 1967, e atualmente, as principais aplicações são em sistemas de armazenamento energia, principalmente no Japão, em empilhadeiras, submarinos, navios e carros elétricos, BATTERY UNIVERSITY (2022b). A Figura 10 ilustra um banco de baterias de sódio utilizado no sistema elétrico japonês.

Figura 10- Banco de baterias de Sódio-Enxofre



Fonte: PVTECH (2017)

As primeiras baterias de sódio-enxofre ou sódio fundido, operavam em temperaturas entre 400-700 °C, enquanto a segunda geração, as quais são recarregáveis, operam em temperaturas

mais amenas, 245-350° C. A segunda geração de baterias de sódio-enxofre ganhou parte do mercado na década 70, pois o sódio fundido é um bom condutor de energia, possui grande vida útil e aceita altíssimas taxas de descargas.

O tipo mais comum de baterias a base de sódio é bateria cerâmica de sódio fundido, BATTERIES INTERNATIONAL (2018), a qual apresenta duas categorias: sódio-enxofre e a ZEBRA (Zeolite Battery Research Africa posteriormente Zero Emission Battery Research Activity).

Os dois tipos de baterias cerâmicas de enxofre têm a composição química semelhante: eletrólito de beta-alumínio sólido, ânodo é puro sódio fundido, os íons de sódio transitam pelo eletrólito e a temperatura de funcionamento com melhor desempenho é por volta dos 300°C. A diferença entre as duas está no cátodo, na de sódio-enxofre o cátodo é enxofre e na ZEBRA é um halogeneto de sódio-metálico, geralmente o cloreto de níquel. A Tabela 2 elenca as principais características das baterias cerâmicas de sódio fundido são:

Tabela 2- Vantagens e desvantagens das baterias de sódio fundido

Vantagem	Desvantagem
Alta densidade de carga, 200-250 Wh/kg, que se compara com as de íons de lítio;	Autodescarga alta, cerca 18% por dia. A energia para manter a bateria aquecida funciona como uma carga parasita;
4500 ciclos de carga e descarga;	3 a 4 dias para ser resfriada;
Vida útil entre 15 e 25 anos, se resfriada;	Membrana cerâmica que separa o ânodo e o cátodo é da espessura de uma folha de papel podendo acarretar danos durante a operação;
Aceitam cargas rápidas sem danos;	
Componentes não tóxicos e abundantes;	

Fonte: Battery University (2022b)

2.2.3. Íons de Lítio

Experimentos com baterias de íons de lítio começaram em 1912 com Gilbert Newton Lewis, porém apenas na década de 70 as baterias deste tipo começaram a ganhar espaço

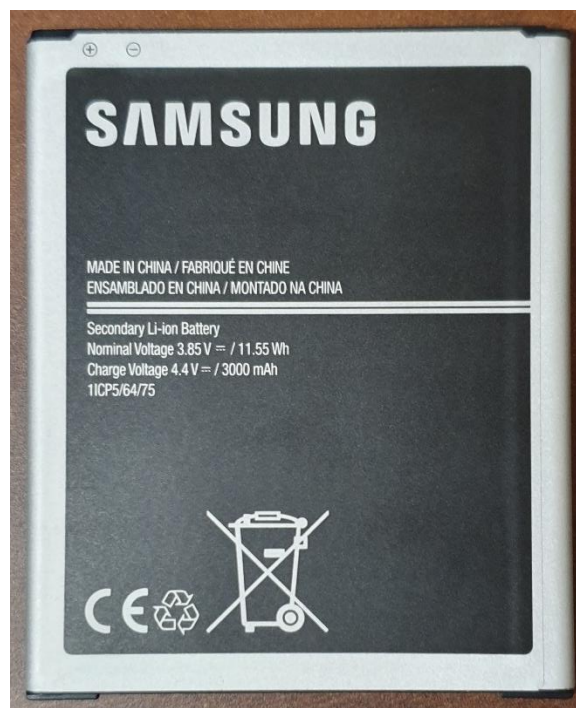
comercial. O lítio apresenta características que sugeririam um ótimo material para baterias, pois apresenta: menor densidade e maior potencial eletroquímico na sua relação energia-peso, baixo peso atômico e pequeno tamanho dos íons que aceleram sua difusão.

As baterias de íons de lítio foram aprimoradas por um pesquisador, Akira Yoshino, no Japão em 1985, que era uma versão recarregável e mais estável que as baterias de lítio presentes na época. Em 1991 a Sony começou a comercializar as baterias de íons de lítio. As baterias de íons de lítio surgiram como uma solução a instabilidade inerente do lítio, o qual comprometia a segurança do uso desse tipo de bateria, principalmente durante o carregamento.

Para resolver os problemas causados pelo metal lítio, os pesquisadores começaram a usar apenas os íons do metal lítio, o qual resultou num controle mais preciso do limite de corrente e tensão produzido.

Esse tipo de bateria necessita de pouca manutenção, a autodescarga é menos da metade de uma bateria a base de níquel, a célula da bateria tem uma voltagem de 3,6 V o que possibilita alimentar telefones, tablets, câmeras digitais sem a necessidade de várias células de energia (BATTERY UNIVERSITY, 2022c). A Figura 11 ilustra uma bateria usada em um smartphone.

Figura 11- Baterias de íons de lítio utilizada em celulares



Fonte: Autoria Própria.

Dentro os vários tipos de baterias de íons de lítio, a figura 4 ilustra o funcionamento de uma bateria de íons de lítio. A bateria usa um cátodo, eletrodo positivo, um ânodo, eletrodo negativo, e o eletrólito como condutor, sendo que o cátodo é óxido metálico e o anodo é carbono poroso. Durante o processo de descarga, o fluxo de íons segue do ânodo para o cátodo através do eletrólito e do separador, já durante a carga os íons seguem a direção inversa, do cátodo para o ânodo.

Durante a descarga, o anodo sofre oxidação, perde elétrons, e o cátodo sofre redução, ganhando elétrons. Durante a carga o processo inverso ocorre, o cátodo sofre oxidação e o ânodo sofre redução.

Há vários tipos de baterias de íons de lítio, porém todas tem em comum os íons de lítio na composição química da bateria. Embora haja semelhança a partir do nome, a composição dos materiais ativos varia bastante, conferindo assim, a cada tipo de bateria de íons de lítio uma especificidade. A tabela 3 mostra as diversas variações de baterias de lítio e as especificidades características, BATTERY UNIVERSITY (2022d).

Tabela 3- Tipos de baterias de íons de lítio

Composição	Lítio e óxido cobalto	Lítio e óxido de Manganês	Lítio Níquel e Manganês	Lítio Ferro Fosfato	Lítio Níquel Cobalto e óxido de Alumínio	Titanato de Lítio
Densidade de Carga (Wh/Kg)	150-200	100-150	150-220	90-120	200-260	70-80
Taxa de carregamento (C)	0,7-1	0,7-1	0,7-1	1	1	1 até 5
Taxa de descarrega (C)	1C	1C, até 10	1 - 2	1C, com pulso de até 25	1C	Até 10C
Número de ciclos	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3000-7000
Avalanche Térmica (°C)	150	250	210	270	150	-
Aplicações	Mobiles em geral e câmeras.	Ferramentas elétricas, aparelhos médicos.	Bicicletas elétricas, aparelhos médicos, indústria e veículos elétricos.	Uso estacionário com altas correntes.	Aparelhos médicos e industriais e veículos elétricos (TESLA)	Veículos Elétricos, iluminação solar.

Fonte: Battery University (2022d)

Por exemplo, a bateria original da Sony utilizada um material derivado do carvão no ânodo, em 1997 passou a utilizar o grafite e atualmente tem como promessa o uso do grafeno na bateria para melhorar significativamente o desempenho das baterias de íons de lítio.

Apesar das variações dos elementos ativos, as baterias de íon de lítio possuem um projeto similar: cátodo de óxido metálico revestido por um coletor de corrente de alumínio, ânodo feito de grafite com um coletor de corrente de cobre, um separador e eletrólito feito de sal de lítio e um solvente orgânico. A tabela 4 elenca as vantagens e desvantagens das baterias de íons de lítio.

Tabela 4- Vantagens e desvantagens das baterias de íons de lítio.

Vantagem	Desvantagem
Energia específica elevada;	Necessita de circuitos de proteção em cada uma das células;
Alta capacidade de carga nas células de energia;	Perde eficiência em altas temperaturas e em alta voltagem;
Alto número de ciclos e grande vida útil;	Carregamento lento a partir para temperaturas inferiores a 0°C;
Pouca ou nenhuma manutenção;	Cuidados ao se transportar grandes quantidades;
Alta capacidade de suprimento de cargas;	Preço elevado;
Baixa resistência interna;	
Alta eficiência de Coulomb (relação entre a energia armazenada e a energia disponível nos terminais da bateria);	
Estabilidade durante o carregamento;	
Tempo de recarga razoavelmente pequeno;	
Taxa de autodescarga relativamente baixa em comparação com as baterias de níquel;	

Fonte: Battery University (2022c)

Do ponto de vista de armazenamento de energia renovável, as baterias de íons de lítio se estabeleceram por serem mais resistentes ao comportamento cíclico de carga e descarga do que as de chumbo-ácido e não por não precisar estar totalmente carregado. Aliás, baterias de íons de lítio sofrem menos estresse químico quando recebem com carga parcial. Mas o Lítio-íon tem um custo mais elevado do que chumbo-ácido em termos de compra do sistema, BATTERY UNIVERSITY (2021c).

As baterias de chumbo-ácido para armazenamento de energia renováveis intermitente possuem inúmeras limitações, principalmente o ciclismo excessivo quando a bateria é carregada durante o dia e descarregada à noite. As baterias de chumbo ácido têm uma contagem de ciclo limitada e sofre de sulfatação quando não está completamente carregado periodicamente.

Além disso, uma carga totalmente saturada leva 16 horas e nenhum sistema solar pode fornecer energia por tanto tempo. Outro ponto negativo é o consumo elétrico das baterias tende a aumentar com o tempo, enquanto os painéis solares reduzem sua produção devido ao acúmulo de sujeira e ao envelhecimento, o que pode acarretar carga insuficiente nas baterias de chumbo-ácido.

2.2.4. Níquel-Cádmio

A primeira bateria alcalina foi inventada na Suécia em 1899 pelo cientista sueco Waldemar Jungner, o qual desenvolveu a bateria de níquel-cádmio recarregável dotada de eletrodos de níquel e cádmio numa solução de hidróxido de potássio. Começou a ser comercializada na Suécia em 1910 e em 1946 chegou ao mercado inglês. Os modelos apesar de caros, tinha uma melhor densidade de energia em relação ao chumbo-ácido e eram mais robustos.

Por anos a bateria de níquel-cádmio foi a preferida nos setores de saúde emergencial, setor audiovisual e ferramentas elétricas. O setor de aviação ainda utiliza baterias de níquel-cádmio por serem as mais resistentes e tolerantes no mercado, porém sobre este tipo de bateria demanda certos cuidados para que a bateria não perca vida útil através do efeito de memória, BATTERY UNIVERSITY (2021a).

Para evitar efeito de memória nesse tipo de bateria, o que pode gerar perda da capacidade, deve-se descarregar por completo a bateria de forma periódica e evitar sobre cargas na bateria. A bateria parece lembrar a rotina de carga anterior e não é capaz reestabelecer a rotina de carga nominal.

O efeito de memória ocorre devido a cristalização dos terminais do ânodo, que diminuem a quantidade de matéria ativa e área de contato do eletrodo, diminuindo assim, a performance da bateria. O efeito de memória pode ser desfeito através de pulsos elétricos nos terminais da bateria, BATTERY UNIVERSITY (2021). A Tabela 4.5 elenca as principais vantagens e desvantagens das baterias de níquel cádmio.

Tabela 5- Vantagens e desvantagens das baterias de níquel-cádmio

Vantagem	Desvantagem
Grande número de ciclos com manutenção adequada;	Energia específica baixa se comparada as novas tecnologias;
Aceita carregamentos ultrarrápidos sem sofrer grandes danos;	Efeito de memória;
Vida útil longa;	Voltagem da célula baixa: 1,2 V;
Pode ser armazenada em estado de descarga;	
Armazenagem e transporte simples;	
Alumínio;	
Boa performance em baixa temperaturas;	
Menor custo em relação ao número de ciclos;	
Disponível em ampla gama de tamanho e potências no mercado;	

Fonte: Battery University (2021a)

2.2.5. Níquel Hidreto Metálico

Uma outra variação das baterias de níquel é a hidreto metálica (NiMH), a qual entrou no mercado por volta de 1989, como uma bateria que tem uma vida útil maior e é menos tóxica que as baterias de cádmio. As baterias de níquel-hidrogênio começaram a ser usadas na década

de 70 em satélites de comunicação e as baterias de níquel hidreto metálico se consagraram no mercado com aplicações menores.

Um dos grandes problemas das baterias de níquel hidreto metálico era a autodescarga, principalmente para equipamento de uso periódicos, como por exemplo lanternas. Para resolver tal situação a Panasonic foi a primeira indústria do mercado capaz de reduzir a autodescarga em até seis vezes, através das baterias alcalinas de níquel hidreto metálico, BATTERY UNIVERSITY (2021a). A Figura 12 ilustra uma bateria da Panasonic disponível ao consumidor.

Figura 12- Bateria de Níquel



Fonte: BATTERY UNIVERSITY (2021a)

Há outras variações de baterias de níquel no mercado, como por exemplo a Níquel-Ferro que surgiu como uma alternativa a Níquel-Cádmio e a níquel-Zinco que também é similar a níquel-cádmio, porém com um eletrodo alcalino e maior tensão em relação às baterias de níquel BATTERY UNIVERSITY (2021a). A Tabela 6 elenca as principais vantagens e desvantagens das baterias de níquel hidreto metálico.

Tabela 6- Vantagens e desvantagens de baterias de Níquel Hidreto Metálico

Vantagem	Desvantagem
30 a 40% maior capacidade do que as Níquel-Cádmio	Vida útil reduzida para situações de grandes descargas
Menos propensa a efeito de memória em relação a de Níquel-Cádmio	Instabilidade durante o carregamento
Armazenagem e transporte simples	Sensível a sobrecargas
Não contém elementos tão tóxicos quanto o cádmio	Gera muito calor em cargas rápidas e em descargas rápidas
Reciclagem rentável	Alta taxa de autodescarga
Grande faixa de temperatura de operação	Eficiência de Coulomb de 65%, enquanto as de íons de lítio tem 99%

Fonte: Battery University, (2021a)

3. APLICAÇÕES DE BANCOS DE BATERIAS

A integração de sistemas de armazenamento de energia com a energia renovável torna a rede mais dinâmica e confiável do ponto de vista da geração e transmissão. Os bancos de baterias podem ser amplamente usados em diferentes aplicações.

As estratégias de gerenciamento de energia são uma alternativa para uso de energias renováveis e intermitentes, como a solar e a eólica, possibilitando um melhor aproveitamento da energia gerada, visando aumentar o autoconsumo e diminuir a demanda de energia por parte do sistema. Tais estratégias juntamente com os sistemas de armazenamento fotovoltaico e de energia terão um papel importante no futuro sistema, RANAWEERA (2014, p. 62).

Outro benefício das estratégias de gerenciamento de energia é aumentar o autoconsumo que pode ser definido como a medida de kWh de energia solar consumida das imediações do sistema fotovoltaico que gera essa energia. O autoconsumo depende diretamente do tamanho do sistema fotovoltaico e das perdas causadas pelo cabeamento e outros componentes.

O consumo de eletricidade necessário para fornecer energia para a carga que contém geração fotovoltaica deve ser comprado da rede durante a noite e caso contrário, a energia pode ser armazenada pelo carregamento em bancos de baterias durante o dia e descarregada durante a noite visando aumentar o autoconsumo.

3.1. REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA

Uma aplicação essencial para banco de baterias é a capacidade de manter tensão de alimentação e a frequência dentro da tolerância. A frequência é controlada e ajustando a saída dos geradores de energia, IEC (2009, p11-22).

Os bancos de baterias podem fornecer funções de controle de frequência carregando e descarregando em resposta a um aumento ou diminuição, respectivamente, da frequência da rede.

A vantagem de fornecer energia de reserva por meio do armazenamento é que os bancos de baterias permitem uma resposta de potência ativa mais precisa à perturbação de frequência, RESERVE (2017, p. 1-22).

Esta abordagem de regulação de frequências é uma opção particularmente atraente devido ao seu tempo de resposta rápido e operação livre de emissões de gases derivados de combustíveis fósseis, KJERPESET (2017, p 1-8). Mantendo o controle sobre a frequência da

rede juntamente com o da potência ativa a tensão mantém-se dentro dos limites pré-estabelecidos pelo sistema.

3.2. CONTROLE POR RAMPA

Em dias ensolarados, os módulos fotovoltaicos produzem um arco suave de produção de energia que atinge o pico ao meio-dia e a produção de energia muda de forma relativamente lenta e dentro da especificação da taxa de rampa da rede elétrica. Em dias nublados, a produção de energia não é suave e pode mudar rapidamente, de modo que as taxas de energia excedem as especificações da concessionária, PANAGIOTOU (2017, p. 4).

Flutuações rápidas na potência ativa de uma usina fotovoltaica causada por nuvens opacas e compactas podem gerar flutuações de tensão na rede, cujo impacto e magnitude locais dependem de parâmetros como o tamanho relativo do sistema fotovoltaico, da capacidade de hospedagem da rede de distribuição e a distância entre o ponto de interligação e a subestação, Chatzivasileiadi et. al. (2013, p. 2-5).

Mudanças grandes e rápidas na potência resultam em problemas de regulação de tensão e frequência. O impacto dessas irregularidades de energia é maior com plantas maiores ou com alta penetração fotovoltaica em relação ao tamanho do sistema de distribuição.

Quando as nuvens deixam de fazer sombra sobre os módulos fotovoltaicos, ajustar a taxa de rampa de energia do inversor fotovoltaico pode controlar o surto de energia de forma a carregar as baterias com excedente de energia, mas isso não ajudará a falta de energia quando as nuvens sombreiam os módulos fotovoltaicos (SCAINI, 2012).

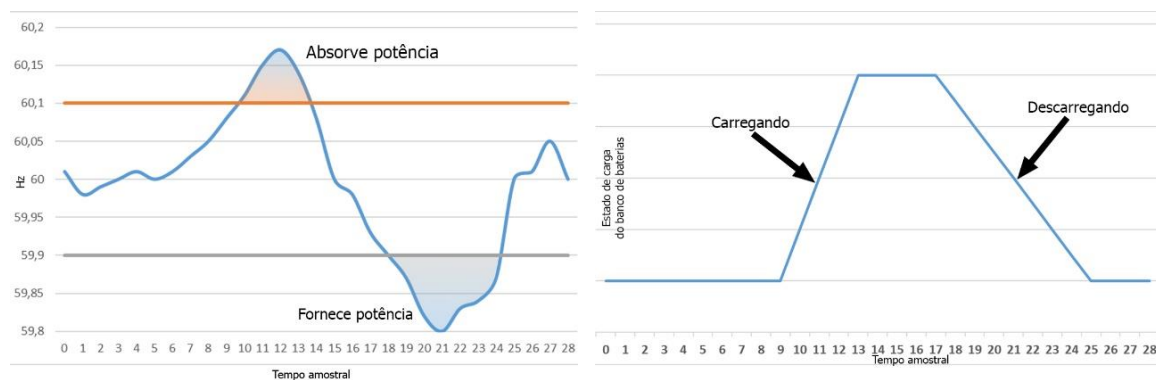
O inversor fotovoltaico ainda pode atuar nos momentos de sombreamento fornecendo potência do banco baterias ao sistema, ajudando assim, a controlar a frequência do sistema. O suporte de tensão e frequência dos bancos de baterias demandam relativamente uma pequena quantidade de energia oriunda do banco de baterias, MARRA et al. (2012, p. 1-7).

A figura 13(a) ilustra o funcionamento do sistema de controle por rampa, quando a frequência ultrapassa o limite permitido (60,1 Hz) estabelecido pelo PRODIST – Módulo 8, o banco de bateria atua visando absorver o excedente de potência do sistema para diminuir a frequência, ao passo que, quando a frequência sofre uma queda abaixo do limite permitido (59,9 Hz), o banco de baterias injeta potência no sistema para aumentar a frequência do sistema.

Figura 13- Regulação de frequência com banco de bateria

(a) Frequência do sistema de distribuição ao longo do tempo.

(b) Estado de carga de baterias a partir da variação de frequência.



Fonte: Autoria própria

O tempo utilizado na Figura 13(a)(b) é uma amostragem de tempo genérica utilizado para demonstrar a simultaneidade dos eventos, no instante que a bateria está absorvendo potência para diminuir a frequência, a bateria está sendo carregada com o excedente de energia e enquanto banco de bateria está fornecendo potência para elevar a frequência do sistema, o banco de baterias está descarregando.

3.3. ENERGY TIME-SHIFT

O energy time-shift é uma estratégia de armazenamento de energia para corresponder à oferta e demanda de energia. As concessionárias precisam constantemente preparar a capacidade de fornecimento e as linhas de transmissão e distribuição para lidar com o aumento anual da demanda de pico e, conseqüentemente, desenvolver a linha de estações de geração para produzir eletricidade a partir da energia primária. Para algumas concessionárias, o custo de geração pode ser reduzido com o armazenamento de eletricidade fora dos horários de pico, por exemplo, à noite, e descarregando nos horários de pico. Se a diferença na demanda entre o pico e o pico for grande, o benefício de armazenar eletricidade se torna ainda maior. Usar o armazenamento para diminuir a diferença entre o tempo diurno e o tempo noturno pode permitir

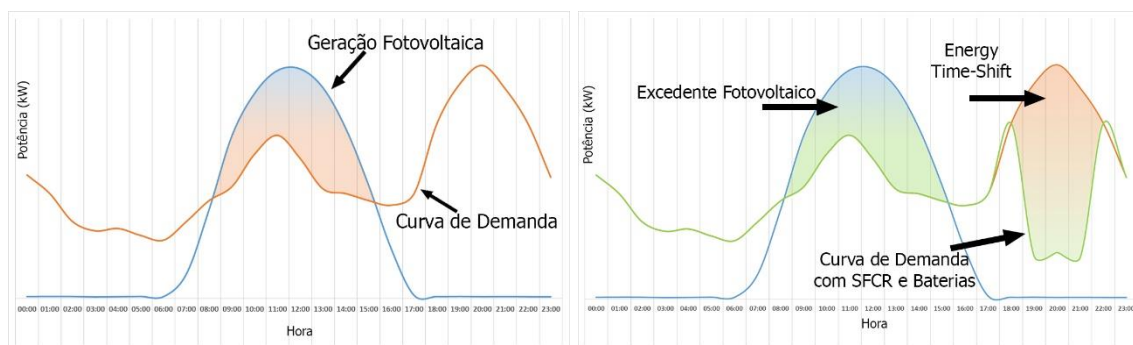
que a geração se torne mais plana, o que leva a uma melhoria na eficiência operacional e redução de custos no combustível, IEC (2009, p11-12).

A estratégia de gerenciamento de demanda energy time-shift consiste no armazenamento de energia nos períodos de baixa demanda e/ou baixo custo da energia da rede elétrica, para utilização nos períodos de alta demanda e/ou alto custo da energia elétrica. Em unidades consumidoras que possuem Sistema Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) com banco de baterias e tarifa horosazonal, o excedente de energia produzido pelos módulos fotovoltaicos pode ser armazenado nos bancos de baterias e consumido em momentos mais convenientes do ponto de visto econômico.

A figura 14(a)(b) retrata como a estratégia do energy time shift funciona, nos instantes em que a produção de energia fotovoltaica supera o consumo, o excedente de energia é armazenado no banco de baterias para que possa ser usado em outro momento. Na Figura 14(b) a energia sobressalente é utilizada para compensar o pico de consumo que ocorre no horário de ponta, no exemplo em questão, das 18 às 21 horas. O horário de ponta pode variar de acordo com concessionária e com a região, por exemplo, em cidades litorâneas, ou em grandes polos indústrias.

Figura 14- Energy Time Shift:

- (a) SFCR sem bateria, curva diária de geração dos módulos fotovoltaicos e curva diária de demanda
- (b) SFCR com bateria, energy time-shift aplicado para redução do consumo e demanda no horário de ponta.



Fonte: Autoria Própria

A estratégia é recomendada para compensar o preço de tarifas horosazonais, por minimizar a dependência da carga em relação a rede em momentos de alto preço do kWh, como ocorre nas tarifas branca, verde e azul. Outra vantagem da estratégia é o aumento do autoconsumo,

pois, a energia sobressalente é armazenada nos bancos de baterias ao invés de ser vendida a rede de distribuição.

Vale notar também que o excedente da energia vendido a rede de distribuição seria vendido no horário fora de ponta, e depois a energia que seria comprada durante o momento alta demanda seria no horário de ponta, ou seja, entrega-se energia de baixo custo a rede de distribuição, para posteriormente comprar energia de alto custo.

Tecnologias de larga escala, incluindo íons de lítio, enxofre de sódio, ácido-chumbo, flywheels e baterias de fluxo são melhores para realizar controle de rampa devido ao menor tempo de resposta. As tecnologias com uma taxa de tempo mais alta são mais adequadas para a aplicação de modelagem e redução do consumo de energia, IEC (2009, p11-22). (SCAINI, 2012).

3.4. PEAK SHAVING

A alta penetração fotovoltaica pode causar uma superprodução de energia, especialmente durante dias claros de verão por volta do meio-dia. Esses picos de produção são prejudiciais para a estabilidade da rede elétrica, por aumentar a frequência e a tensão do sistema. Esses picos podem ser controlados através do peak shaving deslocando cargas para esses períodos.

O peak shaving é o nivelamento de carga, com o objetivo principal de reduzir picos de demanda de cargas variáveis e gerar economia. As instalações que praticam peak shaving são, em suma maioria, consumidores e não concessionárias.

Dentre as vantagens do peak shaving estão: redução do valor da conta de energia, devido a diminuição da demanda máxima contratada, redução do custo operacional de geração de energia durante períodos de pico, reduzindo a necessidade de unidades para momentos de pico e o retardo do investimento em infraestrutura devido a cargas mais planas e com picos menores, KJERPESET (2017, p 1-8).

Durante períodos de alta demanda do ano, a demanda pode ser gerenciada através de deslocamento de carga, redução de carga ou outra resposta do lado da demanda. O peak shaving é literalmente a remoção dos picos de demanda, convencionalmente considerada como sendo aplicável em um ponto da rede de distribuição com grande volume de carga, MATAILLANAS (2011, p2338-2348).

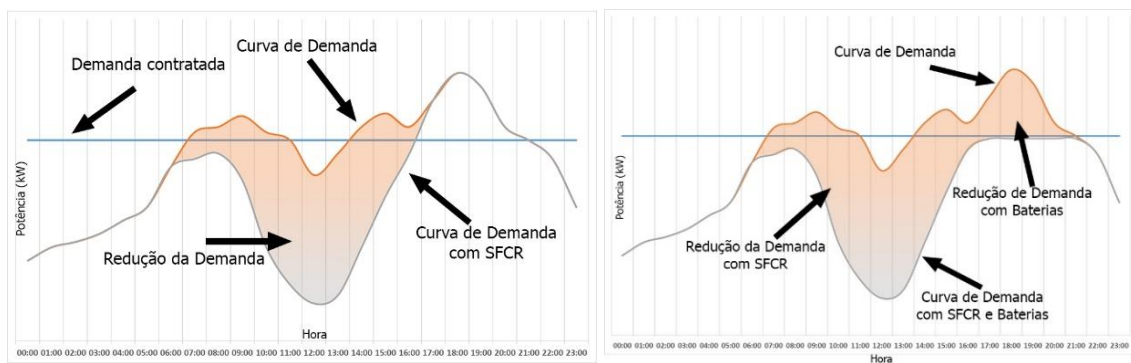
A figura 15(a)(b) ilustra a atuação do peak shaving em um sistema SFCR, a carga supera a curva de demanda em vários momentos ao longo do dia de forma a aumentar a fatura de energia. Na figura 15(a) o SFCR reduz drasticamente a curva de demanda da carga,

principalmente por volta do meio-dia, momento onde há elevada produção energia. Porém a carga ainda ultrapassa a demanda contratada por volta das 17:00, horário a partir do qual a produção de energia fotovoltaica começa a tender a zero.

Figura 15- Peak Shaving:

(a) Redução da demanda a partir da inserção de um SFCR.

(b) Redução da demanda a partir da inserção de um SFCR e Banco de bateria



Fonte: Autoria Própria

Na figura 15(b), a carga conta com um banco de bateria, o qual atua juntamente com um SFCR de forma a regular a demanda da carga para que não se ultrapasse a demanda contratada em nenhum momento ao longo dia, evitando dessa forma cobranças adicionais na fatura de energia.

3.5. UTILIDADE E CONGESTIONAMENTO

O congestionamento da rede ocorre quando a eletricidade é incapaz de fluir onde é necessária devido a problemas físicos como, por exemplo, a capacidade insuficiente do sistema ou contratuais, toda energia está reservada a um dado consumidor. O congestionamento é uma falta de capacidade de transmissão para abastecer um mercado em espera, e a condição é marcada por sistemas funcionando com capacidade total e eficiência adequada que não podem atender a todos os clientes em espera.

Quando o congestionamento ocorre em um mercado competitivo, há um risco de distorção de preços de concessionárias que controlam os serviços de transmissão. As operadoras de rede estão cientes desse risco, e a maioria das jurisdições criaram garantias em seus regulamentos de livre mercado para garantir que preços abusivos não ocorram e que os custos de energia relacionados ao congestionamento aumentem razoavelmente os custos extras incorridos para aliviar a condição.

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), tenta prever o congestionamento futuro e evitar a sobrecarga, por exemplo, despachando a produção dos geradores ou, em última instância, construindo novas rotas de transmissão. A única maneira de amplificar o sistema é aumentar sua capacidade de geração e transmissão, e desta forma, aliviar o congestionamento. Os bancos de baterias podem mitigar o congestionamento através do armazenando de eletricidade em subestações mais próximas as cargas, de formas a evitar que grandes linhas de transmissão se congestionem em momentos de grande demanda.

Os bancos de baterias ainda podem ser usados para controlar a potência intermitente e variável de uma usina renovável. O sistema de armazenamento de energia atua de forma a suavizar a saída e eliminar oscilações rápidas de tensão e potência da rede elétrica, KJERPESET (2017, p 1-8).

3.6. QUALIDADE DE ENERGIA

Segundo KJERPESET (2017, p. 1-8). Em aplicações de qualidade de energia, um sistema de armazenamento de energia ajuda a proteger cargas a jusante contra eventos de curta duração que afetam a qualidade da energia fornecida. As baterias podem ajudar o operador do sistema a gerenciar flutuações na demanda, regulando a frequência de entrega de uma maneira menos dispendiosa do que as atualizações da linha de transmissão IEC (2009, p11-22).

Bancos de baterias conectados na média tensão podem ajudar a regular parâmetros técnicos, como o controle da tensão evitando variações de tensão, suporte dinâmico da rede em casos de queda bruscas de tensão, limitar a potência ativa para evitar aumento da frequência e fornecer potência reativa.

3.7. RESERVA GIRANTE

A reserva girante é a capacidade de geração extra disponível nos grupos geradores que estão sincronizados ao sistema de energia. Um gerador ou um grupo de geradores deve ser capaz de acomodar a perda do maior gerador do sistema com fluxo de energia e variação de frequência. Isso geralmente significa que todos os geradores do sistema devem ter alguns por cento da capacidade de reserva imediata associada à sua inércia rotacional e sua energia primária, ESA (2022).

Para fornecer uma reserva efetiva, o sistema de armazenamento de energia é mantido em um nível de carga pronto para responder a uma interrupção de geração ou transmissão. Dependendo da aplicação, o sistema pode responder dentro de milissegundos ou minutos e

fornecer energia para manter a continuidade da rede enquanto o gerador de reestabelecimento é iniciado e colocado em funcionamento. Isso permite que os geradores trabalhem na saída de potência ideal sem a necessidade de manter a capacidade ociosa de reservas girantes. Também pode eliminar a necessidade de ter geradores de reestabelecimento operando inativos, KJERPESET (2017, p 1-8).

3.8. CARREGAMENTO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTO

Mediante o vasto uso de baterias de íons de lítio e as inúmeras aplicações, desde grandes sistemas de energia até dispositivos portáteis, entender o processo de carregamento é fundamental para otimizar as aplicações.

Carregar baterias de íons de lítio é mais simples do que os sistemas baseados em níquel. O circuito de carga é direto; limitações de tensão e corrente são mais fáceis de acomodar do que analisar assinaturas de tensão complexas, que mudam conforme a bateria envelhece.

O processo de carga pode ser intermitente e o Lítio-íon não precisa de saturação como é o caso do ácido de chumbo. O carregamento das baterias de íons de lítio é mais vantajoso em relação das baterias de chumbo-ácido, pois recomenda-se realizar o carregamento das baterias de chumbo-ácido em etapas, com o intuito de maximizar a vida útil das baterias.

Tais etapas consistem em aumentar a tensão para que a corrente inicial seja específica para uma carga através de um carregador equalizador, sendo que a corrente tem o valor igual a décima parte do valor da carga, SAAD (2016, p.7). O processo de carregamento das baterias de chumbo-ácido pode levar até 16 horas, porém os módulos solares não fornecem energia por tanto tempo

As características das baterias de íons de lítio oferecem uma grande vantagem para o armazenamento de energia renovável, pois um painel solar e uma turbina eólica não conseguem fornecer energia constante para carregar totalmente a bateria.

O carregador de baterias de íons de lítio é um dispositivo limitador de tensão semelhante ao carregador de baterias de chumbo-ácido. As diferenças com o lítio-íon residem em uma voltagem mais alta por célula, tolerâncias de tensão mais rígidas e ausência de carga lenta ou flutuante com carga total.

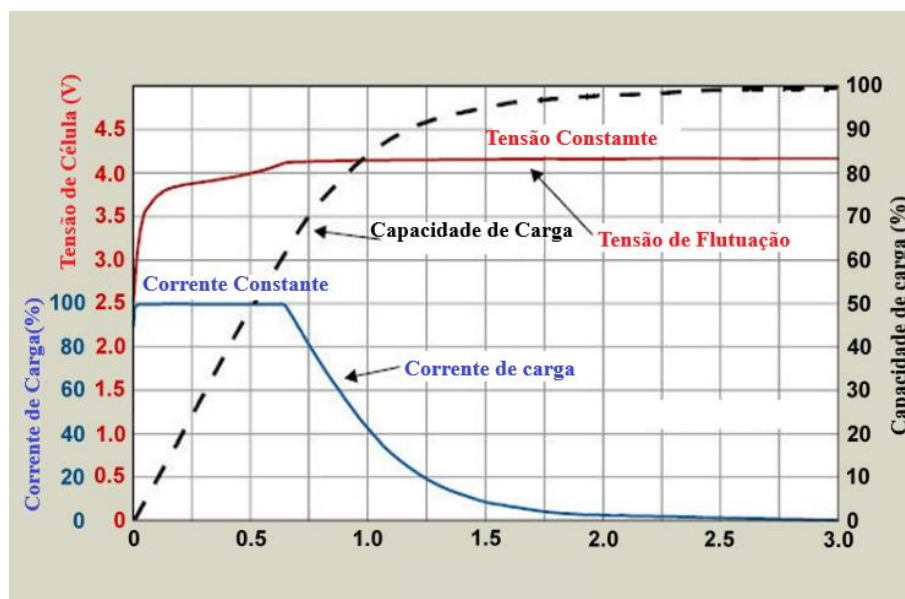
A taxa de carregamento aconselhada para células de lítio-íons está entre 0,5 C à 1 C, com um tempo total de carga de cerca de 2 a 3 horas. Alguns fabricantes não recomendam ultrapassar a taxa de carregamento de 0,8 C, porém a maioria das células de lítio-íons suportam

cargas altas sem sofrer nenhum estresse, além disso, as células têm uma eficiência de carga de cerca 99% e permanecem frias durante a carga

As baterias de íons de lítio quando estão totalmente carregadas têm um aumento natural de temperatura na casa dos 5 °C, podendo chegar até os 10°C, sendo que, para valores maiores de aumento de temperatura, recomenda-se desligar o carregamento. Além disso, quando a carga está completa, as baterias alcançam um limiar de tensão, resultando numa diminuição da corrente de carga para 3% da corrente nominal da bateria, ETACHERI et. al. (2011, p. 5).

O carregamento das baterias de íon lítio tem dois estágios, conforme a Figura 16, o Estágio 1 consiste na aplicação de uma corrente de carga constante até que a célula de lítio-íon alcance tensão nominal. O Estágio 2 ou carga de saturação, consiste na aplicação de uma tensão constante até a corrente de carga se aproxime de zero.

Figura 16- Perfil de carregamento de célula de lítio-íon



Fonte: BATTERY UNIVERSITY (2021b)

Aumentar a corrente de carga não acarreta aumento significativo do estado de carga total, mesmo que a bateria atinja a tensão nominal mais rapidamente, a carga de saturação será mais demorada. Com uma corrente mais alta, o Estágio 1 é mais curto, mas a saturação durante o Estágio 2 levará mais tempo. Uma carga de alta corrente, no entanto, rapidamente encherá a bateria para cerca de 70%, BATTERY UNIVERSITY (2021b).

Uma das características mais importantes para baterias de íons de lítio é que não precisam ser totalmente carregadas, como as baterias de chumbo ácido. Além disso, é recomendado não carregar totalmente as baterias de íons de lítio, pois a alta tensão gera um estresse na bateria.

Escolher um limite de tensão mais baixo ou eliminar a carga de saturação total ajuda a prolongar a vida útil desse tipo de baterias, porém reduz o tempo de atuação da bateria, pois tem menos energia armazenada além disso, baterias que receberam uma carga totalmente saturada manterão a tensão elevada por mais tempo do que aquelas que não receberam uma carga de saturação.

Uma bateria de lítio-íon quando inicia a carga de saturação, em média, encontra-se com 85% de estado de carga, que pode ser suficiente para o perfil de uso do consumidor.

A bateria de lítio-íon opera com segurança dentro das tensões de operação designadas, no entanto, a bateria se torna instável se for carregada em uma voltagem maior que a especificada.

Caso ocorra sobrecarga da bateria, o cátodo torna-se um agente oxidante perdendo a estabilidade e produzindo dióxido de carbono (CO_2). Caso a carga ainda continue, a pressão no interior da célula aumenta e o dispositivo de interrupção de corrente de carga falhará. Caso a pressão no interior da célula continue aumentando, a membrana de segurança se rompe e durante o rompimento pode ocorrer chamas.

4. BANCO DE BATERIA LiFePO₄ CESP

Este estudo visa especificar o sistema de armazenamento de energia eletroquímico utilizado no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL na chamada 21, o PD-00061-0054/2016. O Sistema de Armazenamento de Energia Eletroquímica consiste em acumuladores de energia ou baterias estacionárias que usam células eletroquímicas recarregáveis compostas de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄). As unidades de armazenamento energia de baterias estacionárias com todos os equipamentos auxiliares associados são abrigados em um contêiner marítimo, com uma estrutura de sistema modular para armazenamento de energia.

A bateria é conectada eletricamente aos outros componentes, como transformadores, através de um barramento de alimentação trifásica, o qual, faz parte das instalações dos serviços auxiliares da UHE Porto Primavera. Toda a energia excedente gerada será injetada na rede interna da UHE ou, quando necessário o consumo, a energia é obtida da mesma rede.

4.1. PROJETO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO ANEEL, PD-00061-0054/2016

O projeto consiste na pesquisa de aplicação de tecnologias de armazenamento de energia e análise dos respectivos desempenhos de recuperação sob a forma de eletricidade, em estágio comercial, avaliação de soluções e a economicidade da operação de sistemas de armazenamento de energia e junto a usinas hidrelétricas, visando sua aplicação como coadjuvantes na operação destas usinas, no contexto de maior participação de fontes renováveis intermitentes conectadas ao SIN (Sistema Interligado Nacional). A Figura 17 mostra o Banco de Bateria, Célula a Combustível, Eletrolisador e Tanque de Hidrogênio instalado nesse projeto.

Figura 17- Setor de armazenamento do P&D da UHE Sérgio Motta: Banco de baterias, célula a combustível, eletrolisador e Tanque de Hidrogênio



Fonte: Autoria Própria

O objetivo principal do projeto piloto é Planejar, Projetar, Especificar, Construir, Montar, Comissionar, Operar e Documentar o fornecimento e a operação da planta piloto de armazenamento com tecnologias em baterias e hidrogênio em escala comercial. Busca-se adquirir experiência na operação de modernas tecnologias de armazenamento de modo a obter expertise e dados que permitam explorar as sinergias entre estas emergentes tecnologias de armazenamento e ativos de hidrelétricas, eólicas e plantas fotovoltaicas, bem como identificar insuficiências a serem enfrentadas para que seja possível efetivamente explorar tais tecnologias no contexto brasileiro. Associados ao objetivo principal destacam-se os seguintes objetivos específicos correlatos:

(i) Ensaiar, modelar, comparar e estabelecer as condições da utilização em larga escala das duas tecnologias de armazenamento consideradas como de maior potencial de redução de custos e aumento de escala a curto prazo, como estratégias de armazenamento de energias sazonais e intermitentes em aproveitamentos hidrelétricos, em usinas fotovoltaicas e eólicas;

(ii) Contribuir para o desenvolvimento da indústria nacional de acumuladores eletroquímicos de alto desempenho, através do desenvolvimento de um protótipo otimizado para as condições do sistema elétrico brasileiro;

(iii) Contribuir para o planejamento eletroenergético e para o aperfeiçoamento da operação, por meio de estudos sobre a modelagem e inserção das estratégias alternativas de armazenamento de energia em larga escala como elemento novo no planejamento da expansão da oferta de energia;

(iv) Análise de recursos (hidrelétrico, solar, eólico) em Porto Primavera, de modo a potencializar sinergias entre eles e na utilização conjunta com tecnologias de armazenamento elétrico (baterias e hidrogênio).

(v) Contribuir para o aperfeiçoamento da regulação econômica do armazenamento de energia no Brasil, levando em conta a experiência internacional e formas de incluir o armazenamento, tendo em vista especificidades do Sistema Elétrico Brasileiro.

(vii) Avaliar tecnologias, planejar, projetar, integrar e realizar ensaios com modelos de engenharia em desenvolvimento e implantação de redes de medidores de parâmetros de qualidade de energia aplicáveis em sistemas de armazenamento de energia.

(viii) Contribuir para o planejamento eletroenergético gerando avaliação de viabilidade técnica de implantação de sistemas de armazenamento com a descrição dos locais mais adequados nas diversas localidades brasileiras, considerando potencial de fornecimento de

insumos, ponto de conexão na rede, condições climáticas, impactos ambientais, aspectos tributários, viabilidade logística, entre outros, conforme chamada 21 ANEEL.

4.2. DESCRITIVO DO BANCO DE BATERIAS

O banco de baterias é uma solução de armazenamento de energia em container modular de forma garantir flexibilidade de instalação em áreas diversas, o sistema foi elaborado pela empresa OptimunNano e instalado pela equipe You.On Energia e Base Engenharia Sustentável no pátio de P&D da UHE Engenheiro Sérgio Motta no município de Rosana, São Paulo.

O sistema de armazenamento de energia em baterias, BESS em inglês, tem a capacidade de 250kW de potência nominal podendo operar por duas horas consecutivas em potência nominal fornecendo até 500kWh à carga, neste projeto, o serviço auxiliar da hidroelétrica. As células são compostas de lítio ferro fosfato (LiFePO_4), foram dimensionadas para operar com uma profundidade de descarga de 80% e possui uma eficiência global de 88% durante a carga a descarga, valor este medido como resultado do Projeto de P&D.

Este sistema tem como vantagem a elevada eficiência por ciclo, respostas instantâneas a comandos na rede, variação de potência e inversão do sentido do fluxo de potência (carga/descarga). O Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS, em inglês) instalado na UHE Sérgio Motta é indicado para armazenar energia em curto períodos, como dias ou semanas, pois apesar das baterias terem uma taxa de autodescarga menor que 3% ao mês, o sistema de refrigeração da bateria permanece ligado quando as baterias não estão em operação de forma que a eficiência do sistema global do sistema diminua significativamente, porque há consumo significativo de energia para manter as baterias nas condições de temperatura e umidade ideais.

O BESS é um sistema composto por um transformador isolador, o container que abriga os equipamentos de potência, o conversor tipo IGBT, o PCS (Power Conversion System), o sistema de baterias, sistema de detecção de incêndio e refrigeração e o supervisor, o Shine Master.

4.2.1. Transformador Isolador e Layout do Container

O transformador é um transformador 460/380V trifásico seco, 350 kVA, 60 Hz, delta/estrela aterrada com neutro não acessível, IP55, refrigerado a ar natural, resinado com Epóxi. O transformador fica fora do container, no entanto, abrigado em alvenaria próximo ao container. O transformador tem como função adequar o nível de tensão da bateria com o nível

de tensão do barramento auxiliar da UHE Sérgio Motta e promover isolamento galvânica ao BESS de forma a evitar perturbação na rede acessem a eletrônica do sistema. O transformador desenergizado instalado para o BESS é mostrado na Figura 18.

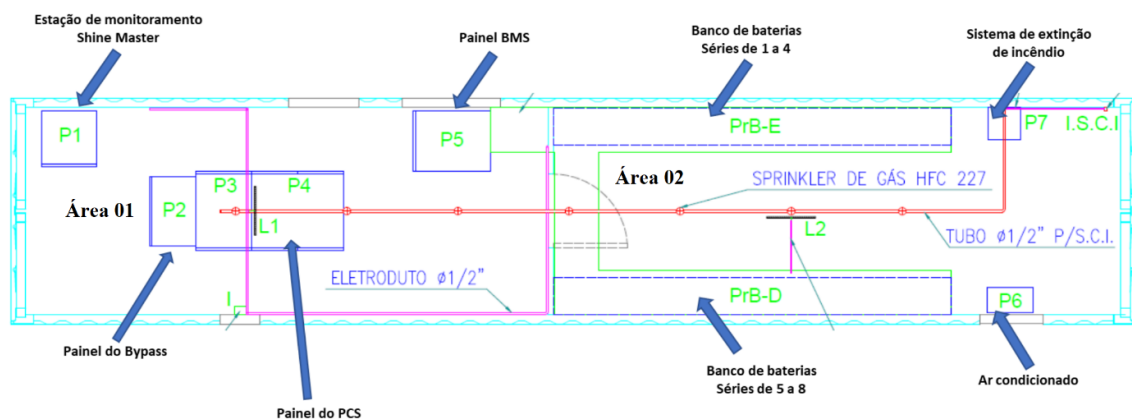
Figura 18- Transformador do BESS 350kVA, 460/380 V.



Fonte: Autoria Própria

Todos os equipamentos que compõe o BESS, exceto o transformador, estão abrigados dentro de um container marítimo de 40 pés, 12,04x2,34x2,69m (CxLxA), Tara 4.150 Kg, com capacidade máxima de 26.300 Kg, manufaturado para comportar os cubículos e baterias do BESS, a Figura 19 ilustra o organizacional do container.

Figura 19- Layout Organizacional do container do BESS



Fonte: Projeto You.On Energia (2018)

O container pode ser dividido em duas partes, a área 01, na qual estão, Shine Master

(supervisório), o cubículo de ByPass (disjuntores de entrada), PCS e o Pannel do BMS (Battery Management System), o qual é parte do sistema de controle e supervisão das baterias.

Na área 02 estão os racks de baterias, separados em duas partes, o rack do 01 ao 04 e do 05 ao 08, o ar-condicionado e o sistema de extinção de incêndio. A passagem dos cabos de potência, controle e comando é feita por eletrocalhas e eletrodutos no teto do container. A Figura 20 mostra a área 02 com as baterias. O contêiner tem porta dos dois lados, para facilitar a evacuação em um eventual incêndio

Figura 20- Área das baterias



Fonte: Autoria Própria

4.2.2. Power Conversion System – PCS

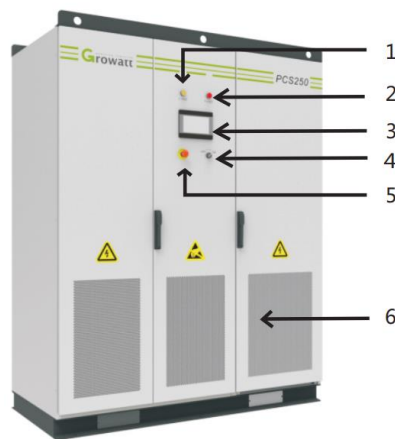
O PCS, sigla para Power Conversion System, é um inversor de bateria bidirecional com base em IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada, em português) fornecido pela Growatt, o modelo PCS250 foi projetado para sistema de armazenamento de energia, converte a corrente CC gerada pelo banco de baterias em corrente CA e alimenta a carga/rede, também pode receber energia do inversor solar ou rede para carregar a bateria.

O inversor de bateria bidirecional converte a corrente CC gerada pela bateria em corrente CA e em seguida, a corrente CA passa por filtros de corrente de onda senoidal e alimentada na rede por meio de um transformador de isolamento de baixa tensão. Ele também pode converter a energia CA da rede em CC para carregar a bateria.

A figura 21 mostra o layout externo do PCS e as respectivas interfaces de operação do sistema. O Item 01 é Indicador da alimentação do sistema, quando o há tensão, o indicador liga o LED amarelo, o Item 02 é o alarme de erro de operação, quando há alguma falha impeditiva de operação, o LED vermelho permanece ligado. Item 03 é o IHM de operação do sistema, no

qual é possível operar e parametrizar proteções CA/CC do sistema. O item 04 é um switch de ativação do lado CA do sistema, o switch deve permanecer em ON para que seja possível operar o sistema. O item 05 é o botão de emergência, quando pressionado desliga todo o sistema e abre todas as chaves e disjuntores motorizados do sistema. O item 06 são as entradas de ar para exaustão do sistema.

Figura 21- Layout externo do Growatt PCS250



Fonte: Manual de Manutenção Growatt (2018).

A tabela 7 mostra as especificações do inversor Growatt PCS 250 do lado CA e CC. A tensão mais alta positiva ou negativa da bateria não deve exceder 1000V, caso contrário, o equipamento estará em proteção de sobretensão e não poderá funcionar normalmente. O PCS inspecionará continuamente se a rede atende às condições limite do equipamento, inclusive se é uma rede trifásica.

Tabela 7- Especificação do PCS

Modelo Growatt PCS 250		
Entrada CC		
Tensão máxima		1000 V _{cc}
Tensão CC operacional		500-820 V _{cc}
Corrente máxima de operação		550 A
Corrente de curto		550 A
Entrada CA		
Tensão máxima		400 V _{ca}
Corrente CA máxima		361 A
Frequência		60 Hz
Potência Máxima		250 kW
Fator de Potência		0,9 indutivo/capacitivo
Peso da unidade		1465 Kg
Fator de proteção		IP20
Categoria		Indoor
Isolação Elétrica		Classe 01

Manual de Manutenção Growatt (2018).

O PCS tem função fundamental nas proteções das baterias, e os limites de proteção precisam ser definido para garantir a operação segura da bateria, os seguintes parâmetros são configuráveis: quantidade da bateria, corrente de carga, corrente de descarga, proteção contra subtensão e sobretensão, nível de isolamento, comunicação entre o PCS/BMS/Shine Master. A configuração do parâmetro das baterias precisa ser feita por um profissional habilitado e estes parâmetros não podem ser alterados pelo cliente/operador do sistema.

4.2.3. Sistema de Baterias

A menor unidade de um banco de bateria é a célula, e elas são divididas em dois grupos, as células primárias, as quais não podem ser facilmente carregadas após o uso, e as células secundárias que podem ser eletricamente recarregadas a um nível de carga da condição original antes de ter ocorrido a descarga.

As células do BESS da UHE Sérgio Motta são de secundárias e com as seguintes características: é 3.2 V/6Ah, 19,2Wh, com resistência interna menor que $8\text{m}\Omega$, autodescarga menor que 5% mensal a 25 °C, vida útil de 8000 ciclos a 25°C, 0,25C e 85% de profundidade de descarga. A Tabela 8 indica a composição química da célula, conforme o informe do cliente.

Tabela 8- Composição química da célula do banco de baterias

Composição	Peso (%)
Lítio Ferro Fosfato	27,04
Ferro	23,52
Solvente Orgânico	13,44
Grafite	12,78
Cobre	9,22
Alumínio	6,44
Polipropileno	4,37
Hexafluorofosfato Lítio	2,01
Níquel	1,18

Fonte: OptimunNano (2017)

A Figura 22 mostra as células cilíndricas utilizadas no BESS com 32mm de diâmetro e 70mm de comprimento, o formato de embalagem cilíndrico é amplamente utilizado para baterias primárias e secundárias. As vantagens são a facilidade de fabricação e boa estabilidade mecânica. O cilindro tubular pode suportar altas pressões internas sem se deformar. As células cilíndricas possuem um mecanismo de alívio de pressão, e o projeto mais simples utiliza uma vedação de membrana que se rompe sob alta pressão.

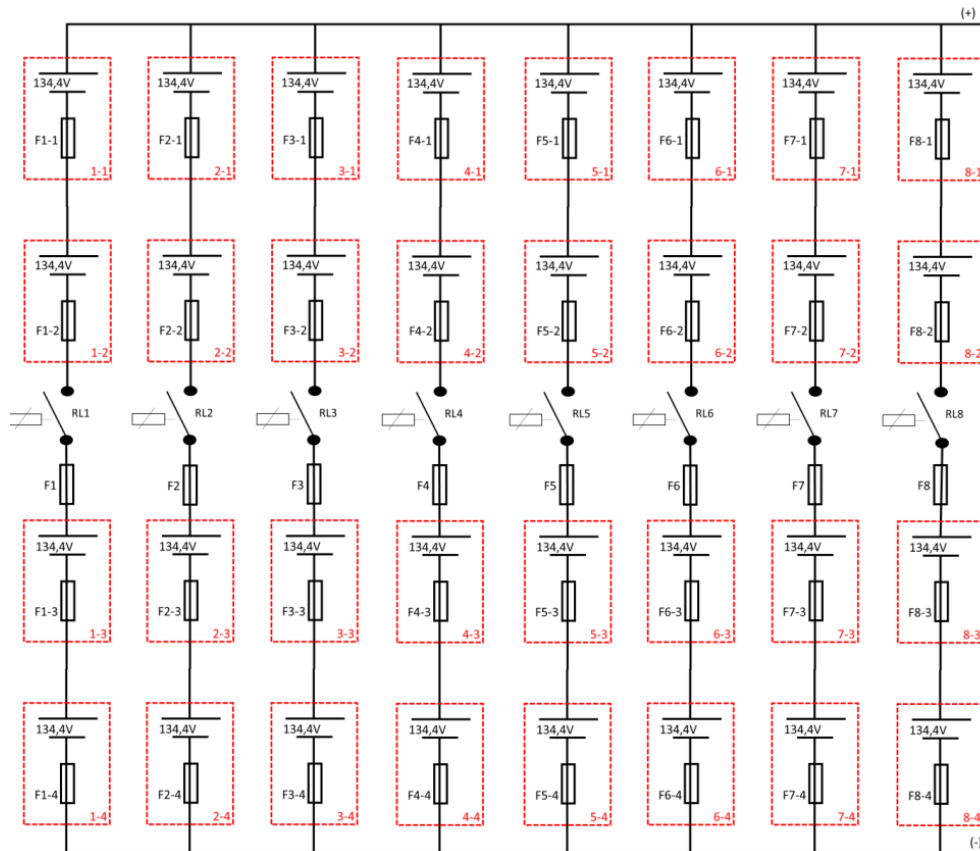
Figura 22- Célula utilizada no BESS do projeto de P&D



Fonte: OptimunNano (2017)

A maior unidade de bateria é chamada de pack, as quais são ligadas em série para formar uma string, o BESS possui 08 strings ligadas paralelo e cada strings possui 04 packs ligados em série totalizando, 32 Packs, conforme a Figura 23. A arquitetura em questão opera em uma tensão nominal de 537,6V, com uma capacidade de 1344Ah, com uma energia total nominal de 722.534 kWh.

Figura 23- Diagrama unifilar das conexões do pack de bateria

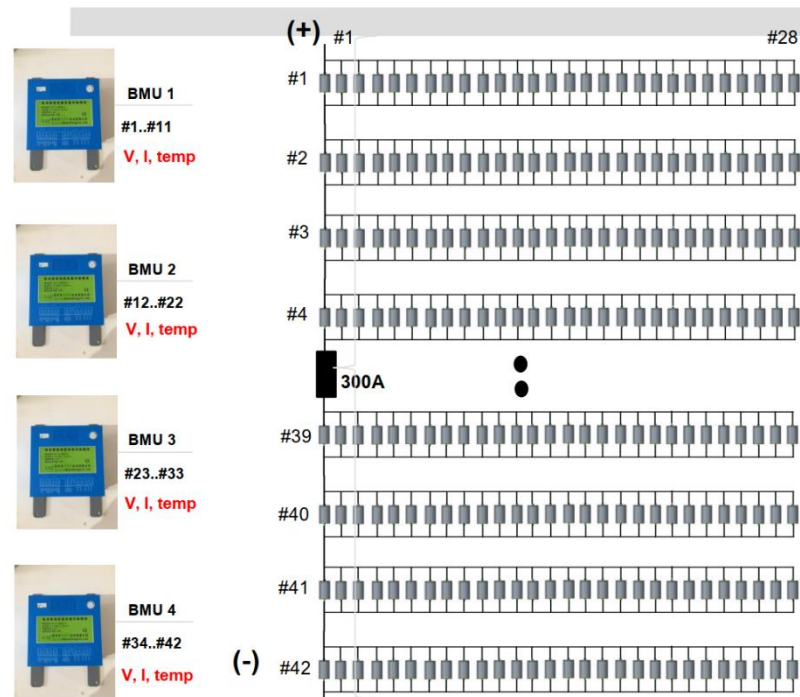


Autoria: Projeto You.On Energia (2018)

O BESS foi projetado para operar com 80% de profundidade de descarga, dos 722.534 kWh nominais, apenas 578.027kWh estão disponíveis para ciclagem. Considerando a eficiência do sistema em 88%, valor medido durante o projeto, tem-se 508.664 kWh disponível no sistema para garantir a operação em 250 kW ao decorrer de duas horas.

O pack de bateria é composto por células ligadas em série/paralelo para atingir a capacidade nominal de 134,4V e 168Ah. São 28 células de 6Ah ligadas em paralelo para atingir a capacidade de corrente de 168 Ah, com uma série de 42 linhas de baterias em paralelos com a tensão de 3,2V para obter tensão nominal de 134,4 V. A Figura 24 ilustra a conexão elétrica do pack de baterias.

Figura 24- Diagrama unifilar das conexões das baterias no interior do pack



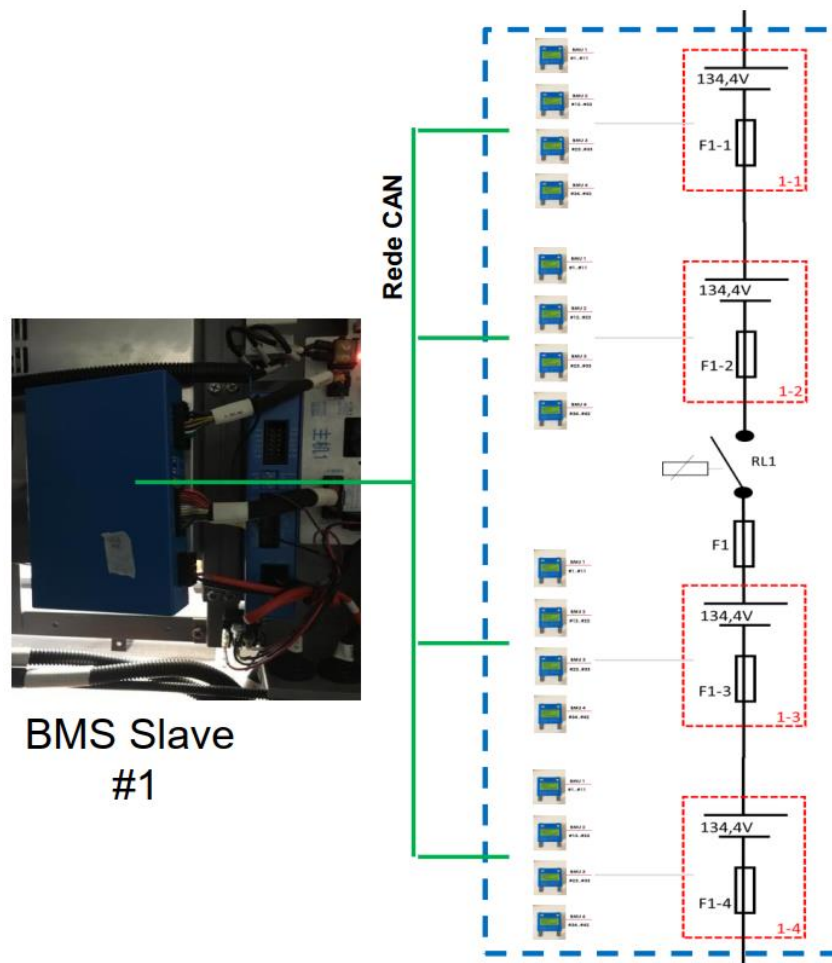
Autoria: Projeto You.On Energia (2018)

As baterias de lítio são controladas pelo BMS, Battery Management System, que comunica entre as unidades por uma rede CAN. O BMS é composto por quatro BMUs (Battery Management Unit), por pack, cada quatro packs que forma uma string é controlado por um BMS Slave. Todos os oito BMS Slave são controlados por um BMS Master que é responsável de comunicar com ShineMaster e o PCS e fornecer todos os parâmetros CC necessários para operação do BESS

O pack tem quatro BMUs (Battery Management Unit), o BMU 1 controla as fileiras de 1 a 11, o BMU 2 as fileiras 12 a 22, o BMU 03 as fileiras 23 a 33 e o BMU 04 a 34 a 42. O BMU é embasado no controlador de células LTC 6804 de terceira geração, capaz de controlar até 12 células de 0 a 5V com uma imprecisão inferior a 1,2 mV, com uma taxa de amostragem de 290µs. O LTC 6804 possui recursos adicionais que incluem balanceamento passivo para cada célula, um regulador de 5V integrado e 5 linhas de I/O de uso geral. O LTC6804 pode ser alimentado diretamente pela bateria, ou de uma fonte isolada. A égide do controle da BMU está nas três principais grandezas da bateria, corrente, tensão e temperatura, a partir deste monitoramento é possível realizar o controle de carga /descarga de cada célula, estimar o estado de carga (SoC, em inglês), e a saúde de bateria (SoH, em Inglês).

Cada strings tem um BMS Slave que controla os 16 BMU presentes nos 04 packs em série, a Figura 25 mostra o diagrama unifilar de comunicação entre os BMS Slave e as BMU de cada um dos racks.

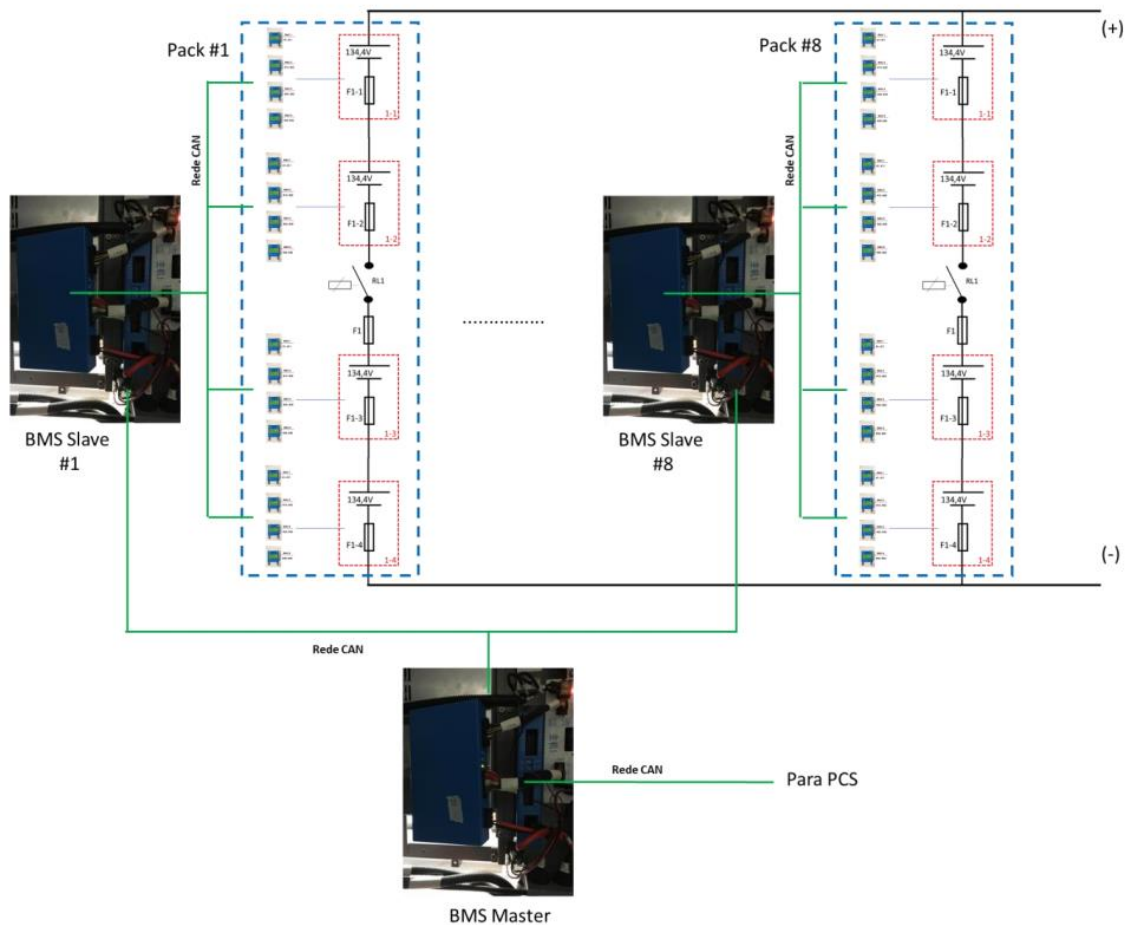
Figura 25- Diagrama unifilar de comunicação BMU/BMS Slave



Autoria: Projeto You.On Energia (2018)

Na Figura 26 é mostrado o diagrama unifilar de comunicação de todo o sistema, desde a BMU até ao BMS Master. No BMS Master todas as funções do sistema se convergem, dentre as principais funções estão a medição da corrente, tensão e temperatura de cada uma das células do BESS, controle de operação do sistema, medição da isolação dos cabos e circuitos, diagnóstico do sistema, medidas de potência e energia, balanceamento passivo e ativos das células, controle de carga e descarga, e entre outros.

Figura 26- Diagrama unifilar de comunicação BMU/BMS Slave/BMS Master



Autoria: Projeto You.On Energia (2018)

O BMS Master, além de se comunicar com o PCS para viabilizar a operação do sistema, também se comunica com o Shine Master, supervisor do container, através de RS485, no qual todas as informações podem ser acessadas via computador Windows, além das leituras intrínseca a operação do BESS, é possível se comunicar com computadores de supervisórios externos como SCADA ou SAGE.

4.2.4. Sistema de Detecção de Incêndio e Refrigeração

O Container tem um Sistema de detecção de incêndio, alarme, controle e combate. As sirenes de alarmes irão soar uma vez que o detector de fumaça e/ou o detector de calor é sensibilizado. Quando ambos os sensores são ativados conjuntamente, o alarme soará e o sistema de controle envia um sinal para interromper as conexões CC das baterias o que é realizada através dos disjuntores CC. O Contêiner deve ser evacuado instantaneamente,

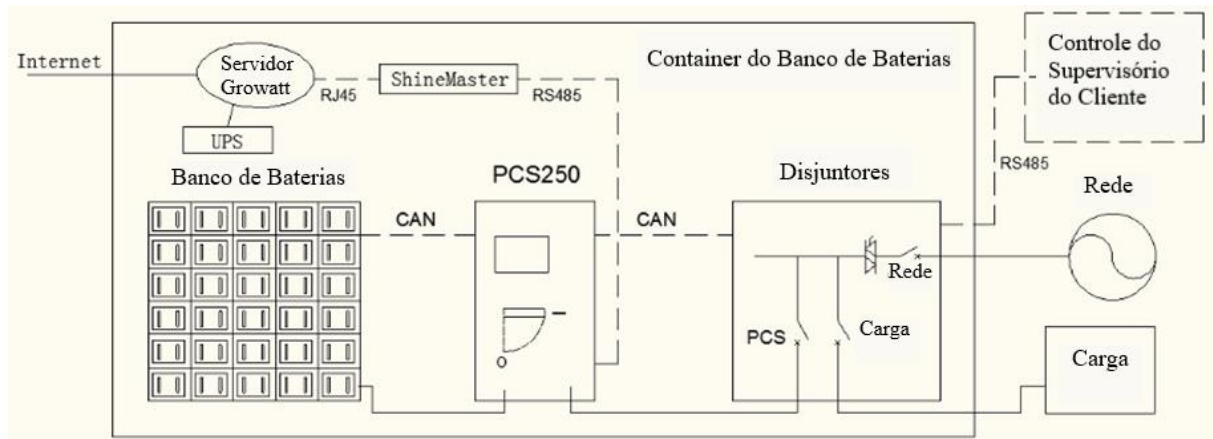
enquanto isso o Sistema de controle inicia a contagem e o final da contagem dispara o combate insuflando gás na sala. A válvula eletromagnética irá atuar no cilindro de gás para preencher o container em curto prazo de tempo. Uma lâmpada de sinalização inicia um alarme indicando para as pessoas ficarem fora do contêiner. Tão logo o cilindro atuar, o PLC irá enviar um sinal ao equipamento de monitoramento de incêndio, enviando a estação de controle do sistema desligando todos os disjuntores do painel do PCS de uma única vez. Quando a fonte de alimentação do Sistema de combate a incêndio é perdida, seja a fonte CC ou CA, o painel de incêndio vai enviar um sinal de problema para o PLC e mostrar existe algo errado com a fonte de alimentação.

Já o sistema de refrigeração do container é composto por dois ares-condicionados, um split que localiza na Área 01, onde está o PCS, o outro localiza-se na área 02, das baterias, tipo “wall mounted”, microprocessado, cuja composição interna é condensadora e evaporador. O ar possui uma tomada de ar externo via uma abertura no container como a qual deve ser mantida aberta para o correto funcionamento e manutenção da temperatura estabelecida para a sala de baterias. Os filtros dessa janela de acesso do lado externo do container devem ser limpos e trocados periodicamente.

4.2.5. Supervisório – Shine Master

O BESS está equipado com um coletor de dados, o Shine Master, o qual é responsável por coletar diversas informações do sistema de armazenamento de energia e fazer o upload do informações ao host local e ao centro de monitoramento da rede elétrica. Além disso, o Shine Master recebe a instrução de agendamento emitida localmente ou pelo supervisório em tempo real e o BESS executa a ação correspondente após receber a instrução. Shine Master é uma solução de monitoramento especialmente projetada para usina solar. A comunicação é via RS485, o Shine Master pode monitorar até 32 inversores. A Figura 27 ilustra o diagrama esquemático de monitoramento de comunicação do BESS.

Figura 27- Diagrama unifilar de comunicação dos equipamentos do BESS



Fonte: Projeto OptimunNano (2017)

O Shine Master suporta comunicação de rede, que pode ser comunicada via WLAN com fio, WiFi, 2G/4G, GPRS e servidor de nuvem. Os dados monitorados são enviados ao servidor da Growatt e, em seguida, é possível acessar o domínio do servidor e verificar os dados, assim como enviar para outro supervisório, no caso do projeto desse P&D, o SCADA. O Shine Master pode operar em plantas industriais compatíveis com comunicação RS485 também suporta formas de comunicação com e sem fio para monitorar e definir dispositivos escravos e realizar atualizações online nos dispositivos. Ao acessar o endereço IP interno do Shine Master, tem-se a página integrada para configuração de parâmetros e visualização de adição de dispositivos e usuários.

4.3.MANUTENÇÕES CORRETIVAS

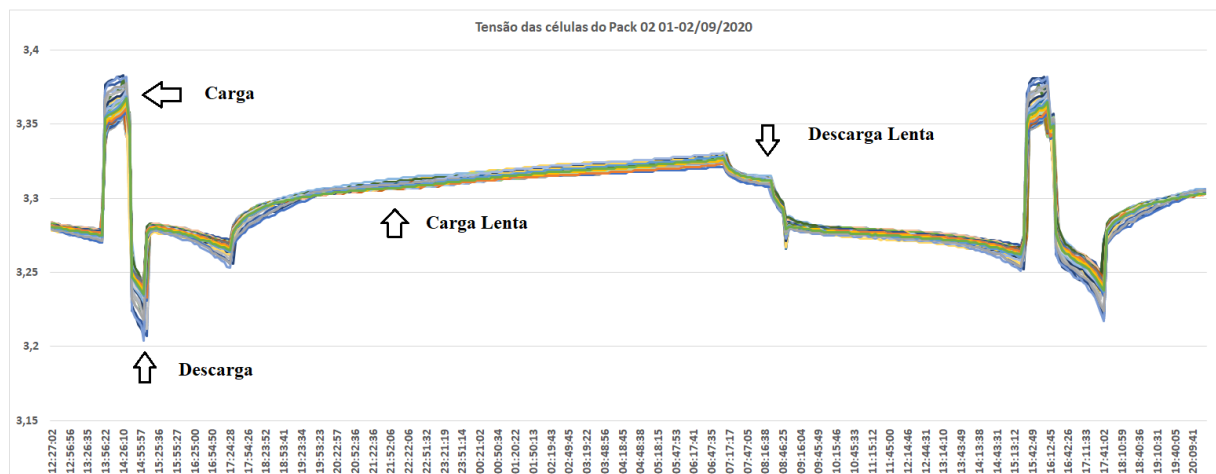
Para facilitar a implementação de um programa de manutenção mecânica preventiva e corretiva para o BESS foi desenvolvido um plano específico para atender a manutenção mecânica relevante da estrutura e componentes específicos de segurança instalados no BESS, que servem como base para início dos trabalhos de manutenção preventiva e naturalmente devem ser adequados à real situação. Leva-se em conta as condições ambientais do local onde o equipamento está instalado, características do BESS e como o resultado, tem-se ganho experiência adquirida no processo de aprendizagem do P&D.

A manutenção preventiva de grande parte dos equipamentos já vem indicada de fábrica, como o caso do PCS da Growatt, no qual é recomendando mensalmente: colher as leituras de operação do sistema, verificar o nível de poeira e umidade dentro do equipamento, verificar as conexões de cabos e apertar caso necessário, verificar as placas de informativas do sistema, verificar os disjuntores e seccionadoras CC/CA, verificar o botão de emergência e ruídos indevidos durante a operação.

Durante a operação para coleta de medidas do projeto de P&D houve duas manutenções corretivas necessárias para viabilizar a continuidade das campanhas de medidas. A primeira delas foi falha de uma das BMU dos packs, a qual gerava desequilíbrio entre as células.

A Figura 28 mostra a curva de carga e descarga das células dos Pack 02 da String 02 nos dias 01 e 02/09/2020, o gráfico mostra que todas as BMU deste pack, conseguem carregar e descarregar as células e forma uniforme sem que tensões disparem na carga ou na descarga, ou seja, funcionamento normal do sistema.

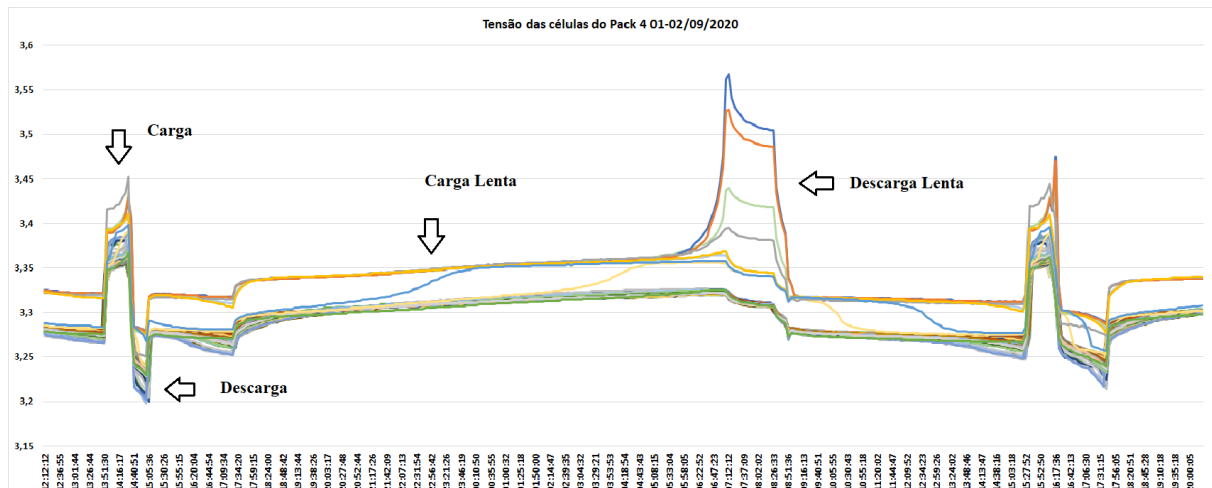
Figura 28- Tensão das células do Pack 02 da String 02



Fonte: Supervisório do BESS (2020)

A figura 29 mostra as tensões do PACK 04, ainda da string 02, é notável que as células estão desequilibradas durante a carga e descarga, o problema é causado pela incapacidade do BMU, devido ao mal funcionamento, equalizar a tensão das células durante a ciclagem da bateria. O BMS Master analisa que células estão carregadas quando pelo menos uma das células do BESS tem o nível de tensão superior a 3,55V, logo se apenas uma das células está em um estado muito energético, tensão elevada, e as outras estão em um estado pouco energético, o BESS perde capacidade de entregar energia ao longo do tempo, diminuindo os 500 kWh nominais. O desequilíbrio das células não acarreta uma diminuição da potência nominal, o BESS continua sendo capaz de injetar 250 kW, no entanto, por menos tempo, pois as células têm níveis discrepantes de energia.

Figura 29- Tensão das células do Pack 04 da string 02



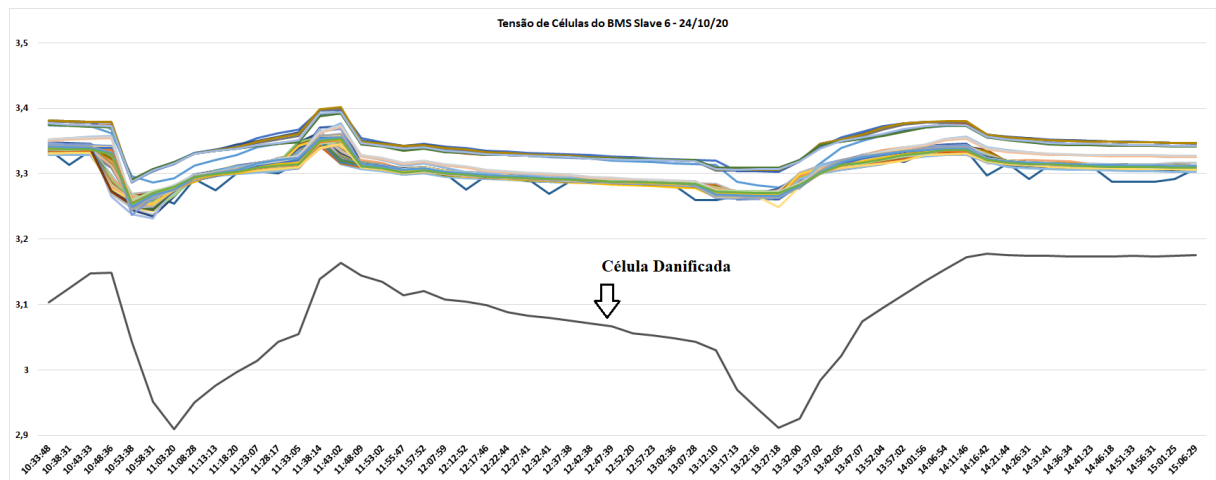
Fonte: Supervisório do BESS (2020)

Para assegurar o não funcionamento do BMU, as células foram carregadas individualmente com uma fonte CC externa, mas o problema voltou a se repetir, pois o BMU era incapaz de fazer o balanceamento ativo e passivo das células. Para restaurar a capacidade do BESS, foi solicitado novos BMUs a OptimunNano na China, após a substituição do equipamento no Brasil, o BESS voltou a despachar os 500 kWh nominais. Além do carregamento individual, ainda foi realizado uma carga e descarga lenta para favorecer o balanceamento ativo, no entanto, não houve sucesso, pois o BMU já não era capaz de equalizar a carga/descarga das células.

O balanceamento ativo, faz com que as células mais energéticas recebem menos corrente durante a carga e injetem mais corrente durante a descarga, já o balanceamento passivo equaliza a tensão das células durante o estado de modo de espera/flutuação para evitar altas taxas de autodescarga durante os períodos de não operação.

O segundo problema foi encontrado na String 06, conforme mostrado pela Figura 30, uma das células era incapaz de alcançar o estado energético nominal de 3,2 V, mesmo com carregamento externo da fonte CC. Logo, foi possível concluir que a célula estava danificada e assim como o BMU supracitado, foi necessário solicitar outras células a OptimunNano e substituir no Brasil para que o problema fosse solucionado.

Figura 30- Tensão das células da String 06



Fonte: Supervisório do BESS (2020)

Na Figura 31 mostra o pack de baterias aberto e a célula que estava no pack danificada. Segundo o fabricante a célula teve um problema construtivo/mecânico, possivelmente durante a fabricação, que acarretou um curto interno, danificando a estrutura eletromecânica da bateria.

Figura 31- Pack de Bateria Aberto/Célula danificada



Fonte: Autoria Própria

5. CONCLUSÃO

Este estudo contemplou o descritivo do uso de um banco de baterias em projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL na chamada 21, PD-00061-0054/2016, que tinha como um dos objetivos ensaiar, modelar, comparar e estabelecer as condições da utilização em larga escala das tecnologias de armazenamento.

O banco de baterias mostrou ser um equipamento robusto e atende com excelência as exigências do projeto, uma resposta imediata a rede com um armazenamento de curto prazo (semanas) e tem ótimo desempenho na aplicação de normalização da carga. O sistema em questão tem como ponto negativo a necessidade de um rigoroso controle de temperatura.

Apesar do alto grau de ineditismo do projeto e das tecnologias inovadoras, houve êxito na instalação, comissionamento e operação da BESS conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN), somados a experiência de manutenção do sistema.

A frequência de manutenções corretivas do sistema é baixa, e o sistema entrega uma grande confiabilidade durante a operação. No entanto, a manutenção é minuciosa e deve ser feita de forma segura e com uso correto de Equipamentos de Proteção Individual e Coletiva, pois a bateria tem potencial elétrico constante.

É importante entender as melhores aplicações do armazenamento eletroquímico a fim de criar maneiras de possibilitar o uso delas em cenários reais. Dito isso, é necessário um maior investimento em projetos de pesquisa e desenvolvimento a fim de otimizar o uso destas tecnologias de armazenamento de energia elétrica no SIN, produzir produtos com maiores eficiências e custos cada vez mais baixos, além de qualificar profissionais para operação e manutenção desses sistemas.

REFERÊNCIAS

Yang Z, et al. Chemical Reviews - Electrochemical energy storage for green grid. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 2011. P 3577-3578.

IRENA – Internacional Renewable Energy Agency. World Energy Transitions Outlook 2022, 1.5 °C Pathway. Adu Dhabi, 2022. P 33.

Wei L, Tobias P, Chau K.T – Overview of batteries and Battery management for eletrici vehicles. Energy Reports, Energy Reports 8 (2022), p 5.

Bloomberg – US Renewable Power Set to Get More Than 20% Boost From New Climate Law. Disponível em < <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-10-19/us-renewable-power-set-to-get-more-than-20-boost-from-new-climate-law> >. Acessado em 09 de setembro 2022.

Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. O Brasil ultrapassa os 185 GW de potência instalada. Disponível em < <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/brasil-ultrapassa-os-185-gw-de-potencia-instalada> >. Acessado em 11 de setembro 2022.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. Anexo VI. Estrutura Geral do Balanço Energético. Rio de Janeiro, 2007. P 10-24.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro, 2021. P 14-26.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2° Ed. São José dos Campos, 2017. 14p.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Statistics report, Key World Energy Statistics 2021. P 30

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key world energy statistics 2018. P.7

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5°C (2016). P 53-

F. Emílio, et. al. Sustainable hydropower in 21st century. National Academy of Sciences, 2010. P 3-5.

IEC – International Electrotechnical Commission. Executive summary. Electric Energy Storage White Paper, vol. 39, pp. 11-22, 2009.

LUO X. et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation” Appl. Energy, vol. 137, pp 511-536, 2015.

WOHLMUTH T. et al. Optimizing self-consumption of grid-connected PV / storage systems. Fevereiro, pp. 37-40, 2014.

ROSOLEM M. F. N. C. et al. Estado da Arte de baterias avançadas para sistemas fotovoltaicos. VI Congresso Brasileiro de Energia solar. Belo Horizonte 2016. P, 8-12

BERNDT D. Maintenance-free Batteries Lead-Acid, Nickel/Cadmium, Nickel/Metal, Hydride. A handbook of battery Technology, 2° Ed, 1995, p 125-129.

TUDOR. Linha Estacionária, características (2017). Disponível em < tudor.com.br/pt_br/produtos/estacionaria/caracteristicas >. Acessado em 06 de novembro de 2022 às 00:05.

BATTERIES INTERNATIONAL. Developing a battery consisting of molten sodium was always going to be a challenge. But sodium sulfur and sodium nickel batteries are still around (2018). Disponível em < batteriesinternational.com/2016/09/22/battery-pioneers-johan-coetzer/ >. Acessado em 11 de novembro de 2022.

BATTERY UNIVERSITY. How does the lead acid Battery works? (2022a). Disponível em <<https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>>. Acessado em 07 de novembro de 2022.

BATTERY UNIVERSITY. Why does Sodium-sulfur need to be heated? (2022b). Disponível em < <https://batteryuniversity.com/article/bu-210a-why-does-sodium-sulfur-need-to-be-heated> >. Acessado em 11 de novembro de 2022.

BATTERY UNIVERSITY. How do lithium batteries work? (2022c). Disponível em < <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work> >. Acessado em 07 de novembro de 2022.

BATTERY UNIVERSITY. How to Restore Nickel-based Batteries (2021). Disponível em < <https://batteryuniversity.com/article/bu-807-how-to-restore-nickel-based-batteries> >. Acessado em 07 de novembro de 2022.

BATTERY UNIVERSITY. Nickel-Based Batteries (2021a). Disponível em < <https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries> >. Acessado em 07 de novembro de 2021.

BATTERY UNIVERSITY. Charging Lithium-ion (2021b). Disponível em < batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries >, acessado em 26 de outubro de 2022.

BATTERY UNIVERSITY. How does lithium battery works? (2022d). Disponível em < <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work> >. Acessado em 26 de outubro de 2022.

BATTERY UNIVERSITY. How to store Renewable Energy in a Battery (2021c). Disponível em < <https://batteryuniversity.com/article/bu-413a-how-to-store-renewable-energy-in-a-battery> >. Acessado em 27 de outubro de 2022.

RANAWEERA I. Modelling of Photovoltaic Modules with Battery Energy Storage in Simulink / Matlab. Håvard Breisnes. Vika, Junho de 2014, p. 62.

RESERVE C. Integration of Lithium-Ion Battery Storage Systems in Control Reserve. pp. 1–22, 2017.

KJERPESET S. A. Energy Storage in the Distribution Grid. University of Bergen, dezembro, 2017, p. 1-8.

PANAGIOTOU K.; KLUMPNER C.; SUMNER M. The effect of including power converter losses when modelling energy storage systems: a UK Domestic Study. The University of Nottingham, junho de 2019, p. 4

Chatzivasileiadi A.; Eleni A.; Knight I. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings. Welsh School of Architecture, Cardiff University, vol. 25, 2013, p. 2-5.

MARRA F. et al. Energy Storage Options for Voltage Support in Low-Voltage Grids with High Penetration of Photovoltaic. IEEE, 2012, p. 1-7.

MATALLANAS E.; MASA-BOTE D. PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector. Instituto de Energia Solar, Universidad Politécnica de Madrid. Vol 85, setembro 2011, p 2338-2348,

ESA - Energy Storage Association. Spinning Reserve. Disponível em < <https://energystorage.org/spinning-reserve/> > acessado 04 de novembro de 2022.

SAAD M. C. Controlador de carga e descarga de baterias, microcontrolado com PIC, com aplicação em sistemas de fornecimento de energia em geral, incluído sistemas fotovoltaicos. PUC-RIO, Rio de Janeiro, dezembro de 2012, p.7.

ETACHERI V., MAROM R., ELAZARI R. “Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review”. Energy & Environmental Science, 2011, p. 5.

PVTECH. NGK’s NAS sodium sulfur grid-scale batteries in depth (2017). Disponível em < <https://www.pv-tech.org/interviews/sponsored-ngks-nas-sodium-sulfur-grid-scale-batteries-in-depth> >. Acessado em 08 de novembro de 2022.

Valor Econômico. ISA CTEEP inaugura primeiro sistema de baterias em larga escala (2022). Disponível em < <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2022/11/29/isa-ctEEP-inaugura-primeiro-sistema-de-baterias-em-escala.ghtml> >. Acessado em 28 de novembro de 2022.