

Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias: Histórico, Aplicações e Desafios.

Elizaldo Severino de Sousa Junior

Projeto de Graduação



Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias: Histórico, Aplicações e Desafios.

Aluno: Elizaldo Severino de Sousa Junior

Orientador: Delberis Araújo Lima

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

Ao longo destes anos de trajetória acadêmica, muitas pessoas tiveram papéis fundamentais na minha vida. Do início da graduação, de quando acordava às 4h para chegar às 7h na Gávea, ao final dela, conciliando um trabalho de 8h diárias e os estudos. Em todos os momentos vocês se fizeram presentes na minha vida.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me sustentado até aqui e me dado saúde para seguir em frente, mesmo nos momentos de desânimo. Sou grato pela mão que me guiou pelas estradas sinuosas, pelo consolo das lágrimas derramadas, pela iluminação nos momentos de dúvida.

Aos meus pais, Maria e Elizaldo, que, apesar de todas as dificuldades, buscaram dar educação a mim e à minha irmã, sempre nos incentivando a estudar desde muito cedo. Se hoje tenho a oportunidade de chegar aonde cheguei, muito se deve a vocês. Também agradeço a minha irmã Mariana por todo o carinho e incentivo dado até aqui.

Agradeço de maneira especial à minha noiva Larisse Isídio da Silva, que desde o início da graduação, com seu amor e dedicação, foi minha companheira de estudos e de vida. Agradeço por todo seu apoio em todas as circunstâncias, das leves às difíceis, por me ajudar a superar um dos períodos mais duros na minha vida e por ter me motivado a chegar até o fim.

Gostaria de agradecer também aos amigos que me acompanharam nessa longa trajetória. Aos amigos da PUC, aos amigos da FAETEC, aos amigos da Pastoral da Juventude, aos amigos da Elera Renováveis, aos amigos da vida. Agradeço por compreenderem minha ausência dos últimos tempos. Vocês são muito importantes para mim.

Agradeço ao Governo Federal que proporcionou a minha bolsa de estudos através do Prouni, que custeou integralmente o meu curso. Sem este programa, eu não teria condições de me tornar engenheiro pela PUC-Rio.

Agradeço à Elera Renováveis, na pessoa de Charleston Stelle, e à Energisa Distribuidora, na pessoa de Osvaldo Tavares, pela disponibilização de dados utilizados neste trabalho.

Agradeço à PUC-Rio por todas as oportunidades que tive durante a graduação: ser monitor dos departamentos de Matemática, Química e Física; ter sido integrante do AeroRio; ter feito iniciação científica no Laboratório de Instrumentação e Medidas Magnéticas; ter feito intercâmbio no Politécnico de Milão no difícil ano de 2020; ter sido professor do PVC Seja+ e por tantos outros trabalhos voluntários que ajudaram na minha formação.

Ainda mencionando a PUC, não posso esquecer do tempo em que fui estagiário do SOU-CTC, onde pude aprender muito com esta equipe tão especial. A todos que me apoiaram em tantos momentos, em especial Deborah Sanches e Lena Hirsh.

Minha gratidão também a D. Paolo Selmi, D. Attilio Cantoni e toda comunidade de Bruzzano, que abriram as portas durante minha estadia em Milão enquanto estudava no Politécnico. Vocês representam um importante capítulo na minha vida.

Agradeço também ao meu orientador, Delberis Araújo Lima, pela oportunidade de ajudar-me a concluir mais esta etapa acadêmica.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os professores que me apoiaram e foram modelos para mim. Não seria possível chegar até aqui sem vocês. Cada um foi muito importante. Em especial agradeço a Wilson Reis, Alessia Mandini, Luís Eduardo Barbosa, Fred Palmeira, Débora Mondaini, Tatiana Soderó, Daniela Soluri, Raphael de Paola, Jefferson Ferraz, Jan Siqueira, André Milhorce, Alexandre Street e Delberis Lima. Tenho a mais alta estima por todos vocês.

Resumo

A descarbonização da matriz de geração elétrica através da transição energética é objetivo primário para atenuação dos danos causados ao meio ambiente. As fontes de energia renovável variável (ERV) eólica e solar aparecem como os principais alvos de investimento ao redor do mundo. O setor elétrico também passa por mudanças com a inserção dos recursos distribuídos de energia (RDE), como a geração distribuída (GD), a resposta da demanda (RD) e sistemas de armazenamento por bateria (Battery Energy Storage System, BESS).

A fim de reduzir riscos de insuficiência de geração por ERV e para se beneficiar de arbitragem tarifária, existe amplo interesse na inserção de BESS em diversos níveis de tensão. Na transmissão, pode auxiliar na melhoria de índices de confiabilidade e redução de desperdício de energia não despachada por grandes centrais de ERV. Em média e baixa tensão (em escopo de distribuidoras de energia), podem reduzir necessidade de contratação de montante de uso de sistema de transmissão e para arbitragem tarifária.

Propõe-se, nesse Trabalho de Conclusão de Curso, realizar o levantamento do avanço tecnológico de sistemas de baterias, as principais aplicações atuais e prospectivas, o cenário regulatório no Brasil e os desafios gerais para sua implementação ampla no setor elétrico no curto-médio prazo, além de uma proposta de instalação de um BESS em uma usina de geração renovável variável no nordeste brasileiro.

Palavras-chave: Armazenamento de Energia; Transição Energética; Baterias; Energia Renovável Variável

Battery Energy Storage Systems: Technological State of Art Survey, Applications and Challenges.

Abstract

The energetic transition of the electric generation to the low carbon emission sources is a primary objective to the attenuation of the damages caused to the environment. Variable Renewable Energy (VRE) sources such as wind and solar come out as the main targets of investments around the globe. The electricity market also goes through transformations in the characterization of consumption, as the insertion of the Distributed Energy Resources (DER), namely, Distributed Generation (DG), Load Response (LR) and Battery Energy Storage Systems (BESS).

Aiming to reduce insufficiency risks of VRE generation and take advantage of arbitrary pricing, there is vast interest in the insertion of BESS on many voltage levels. In transmission, it could help on the improvement of reliability indexes and reduce the waste of non-dispatched energy by big VRE centers. In medium and low voltage (distribution companies), it could reduce the necessity of contracting the amount of transmission system usage and for arbitrary pricing.

It is proposed, in this Undergraduate Final Project, to do a technological state of art survey of BESS, its main applications and prospective, the regulatory scenario in Brazil and the general challenges for its wide short-medium term implementation on the electric sector.

Keywords: Energy Storage; Energy Transition; Batteries; Variable Renewable Energy

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 7 |
| 1.1. Objetivo..... | 7 |
| 1.2. Estrutura do trabalho..... | 7 |
| 2. Energia renovável variável..... | 8 |
| 3. Sistemas de armazenamento de energia | 12 |
| 3.1. Desenvolvimento | 12 |
| 3.2. Baterias de lítio | 15 |
| 4. Battery Energy Storage System..... | 19 |
| 4.1. Aplicações do BESS | 20 |
| 4.2. Simulação de um BESS em um conjunto eólico..... | 26 |
| 4.3. O uso do BESS no Brasil..... | 28 |
| 4.3.1. CEMIG | 28 |
| 4.3.2. CPFL Energia | 29 |
| 4.3.3. ISA CTEEP | 30 |
| 4.4. Desafios..... | 31 |
| 5. Regulamentação no Brasil..... | 33 |
| 6. Conclusão..... | 34 |
| 7. Referências..... | 36 |

1. Introdução

A fim de lidar com o aumento da demanda energética e com a necessidade de descarbonizar as atividades do setor elétrico, a participação das fontes de energia renovável variável (ERV) se faz cada vez mais presente e necessária ao redor do mundo. Nos últimos 10 anos, o uso de ERV cresceu a uma taxa de aproximadamente 75% (IRENA, 2019).

Um dos principais desafios da utilização de ERV é a alta variabilidade do recurso em intervalos curtos de tempo, dificultando o planejamento e otimização da operação. Mesmo com o avanço de modelos meteorológicos, as previsões de geração contêm erros e podem frustrar a programação de geração de energia, tanto de maneira negativa, quando o recurso não se mostra disponível na quantidade prevista, quanto de maneira positiva, quando há maior abundância de recurso e, conseqüentemente, de oportunidade de geração. Isso ocorre devido à intermitência das fontes solar e eólica.

Visando minimizar os impactos causados pela alta variabilidade de ERV, e ainda se beneficiar da arbitragem tarifária presente no mercado de energia, propõe-se a adoção de sistemas de armazenamento de energia. Outro motivo pelo qual busca-se o armazenamento de energia, é auxiliar a resposta à inercia que falta em sistemas de geração por ERV (IRENA, 2017).

O desafio de armazenar energia de plantas de geração por fontes de energia renovável variável está em conciliar o custo, que ainda é elevado, com os ganhos de receita que podem ser obtidos. Além deste ponto, desafios técnicos como manutenção, controle de temperatura e vida útil são aspectos a serem debatidos (IRENA, 2017).

Em um momento de transição energética das fontes fósseis para fontes renováveis, o aperfeiçoamento do armazenamento de energia elétrica é de suma importância para potencializar a presença das tecnologias de geração eólica e solar, garantindo uma rede equilibrada e aproveitando ao máximo a energia gerada.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é mostrar a evolução das tecnologias de armazenamento de energia com foco em Sistemas de Armazenamento por Baterias (BESS), conhecido também como *Storage*, o status da utilização de tais tecnologias, desafios acerca de sua implementação e o andamento da regulamentação no Brasil.

1.2. Estrutura do trabalho

O trabalho se divide em seis partes. No primeiro capítulo contendo a introdução e apresentação do objetivo do trabalho. No segundo capítulo é feita uma contextualização do cenário da transição energética pelo uso de fontes de geração renovável variável. No terceiro capítulo é abordado o tema do presente trabalho de forma geral, apresentando diferentes formas de armazenamento de energia, trazendo à tona o histórico do armazenamento de energia e a estrutura de baterias. No quarto capítulo será aprofundada a discussão sobre o Battery Energy Storage System (BESS), seu desenvolvimento, aplicações, utilização no mercado e seus desafios. No quinto capítulo será discutido o tema da regulamentação do uso do armazenamento de energia. Por fim, no sexto capítulo são feitas as considerações finais, concluindo este Trabalho de Conclusão de Curso.

2. Energia renovável variável

Na última década os custos de implementação de painéis solares e aerogeradores diminuiu consideravelmente, possibilitando o aumento da participação das fontes renováveis variáveis no cenário mundial, representando 36% das fontes renováveis (IRENA, 2021).

O custo médio de projetos de geração eólica *onshore* diminuiu em 68%, de \$ 0,102/kWh para \$ 0,033/kWh entre 2010 e 2021. No mesmo período, o custo médio de projetos fotovoltaicos teve uma expressiva redução de 88%, saindo de \$0,417/kWh para \$ 0,048/kWh. Como é possível observar na figura 1, as tecnologias eólica e solar foram as que tiveram maior queda percentual em seu custo de implementação (IRENA, 2021).

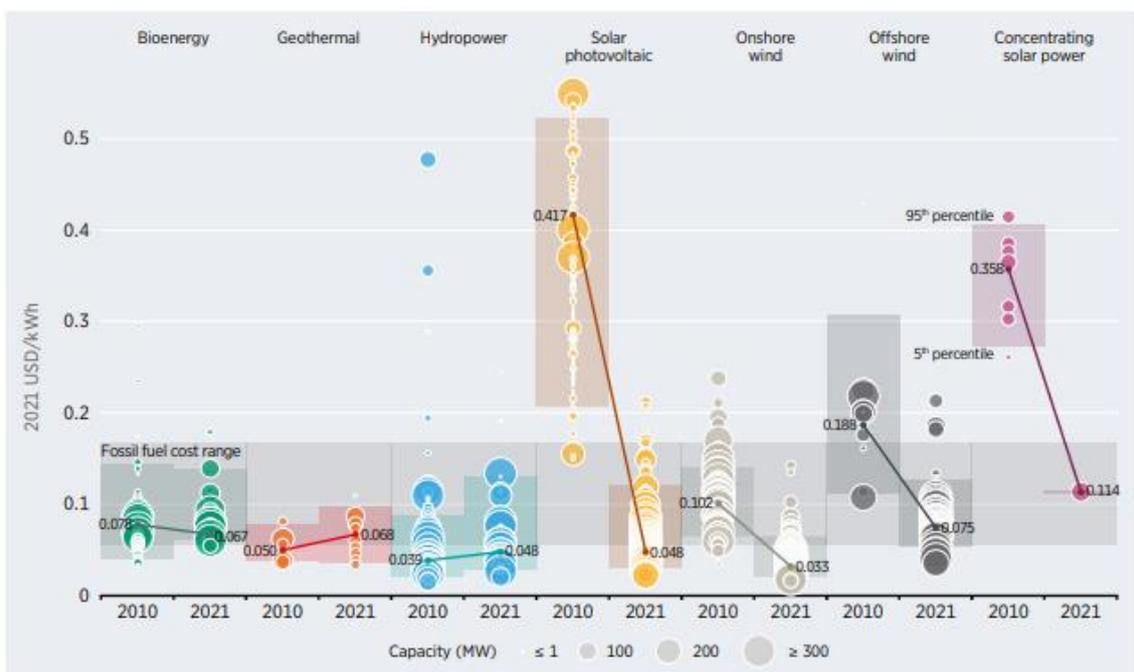


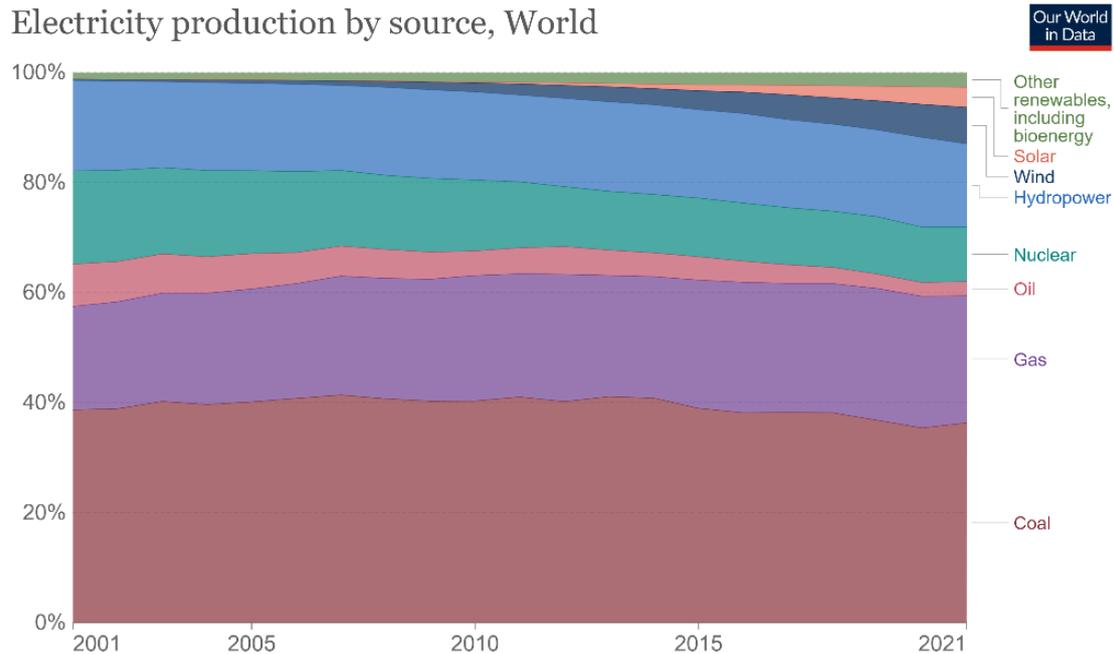
Figura 1: Variação do custo médio ponderado por kWh de projetos de geração de energia elétrica (IRENA, 2021).

Estas reduções permitiram que o portfólio da matriz mundial de geração de energia elétrica abrisse mais espaço às fontes eólica e solar que, dentre as fontes de energia renovável, tiveram o maior crescimento relativo, vide tabela 1. Além deste, outro fator que colabora para o aumento de penetração de geração por ERV é a redução, ainda que a baixas taxas, da participação de fontes como carvão, óleo e nuclear. De acordo com projeções da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), as fontes de ERV representarão cerca de 85% da matriz de geração de energia elétrica no mundo, sendo 36% de penetração por plantas eólicas e 22% por parques fotovoltaicos.

Tabela 1: Variação do custo médio por kWh de projetos de geração de energia elétrica por fontes renováveis (IRENA, 2021).

| Ano | Solar | Eólica | Hidro | Outras |
|----------|----------|---------|--------|--------|
| 2010 | 0,16% | 1,62% | 16,00% | 1,78% |
| 2021 | 3,66% | 6,60% | 15,15% | 2,70% |
| Variação | 2187,50% | 307,41% | -5,31% | 51,69% |

Electricity production by source, World



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2022); Our World in Data based on Ember's Global Electricity Review (2022); Our World in Data based on Ember's European Electricity Review (2022)
 Note: 'Other renewables' includes biomass and waste, geothermal, wave and tidal.
 OurWorldInData.org/energy • CC BY

Figura 2: Distribuição entre tecnologias de geração de energia no mundo, em percentual (Our World in Data, 2022).

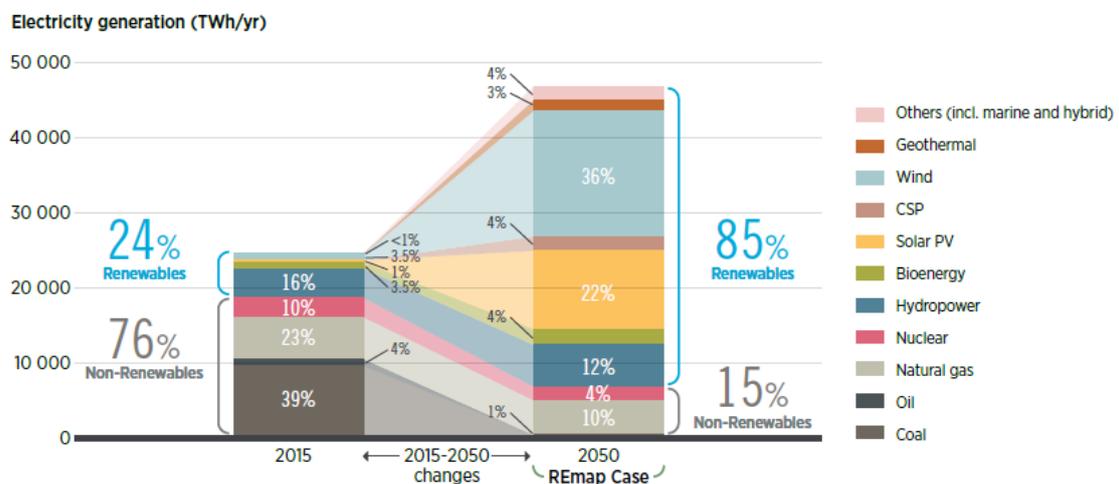


Figura 3: Projeção da distribuição de tecnologias na matriz de geração de energia elétrica para 2050 (IRENA, 2019).

Embora seja muito positivo o cenário de crescimento da penetração de fontes de ERV na matriz de geração elétrica, este movimento traz consigo um novo desafio para os operadores do sistema elétrico, tendo em vista maiores riscos de congestionamentos das redes de transmissão e distribuição de energia que podem ameaçar a segurança e a confiabilidade da rede.

As fontes de ERV estão, inevitavelmente, sujeitas a variações de disponibilidade. O vento e o sol por exemplo são, por natureza, imprevisíveis e, conseqüentemente, não programáveis, ao contrário da fonte hidráulica. Por exemplo, nem sempre o vento é forte e a irradiância é suficientemente boa para gerar energia, assim como pode acontecer o oposto, quando os ventos podem soprar em excesso e o sol brilhar com mais intensidade.

Em ambos os casos pode haver desequilíbrios no sistema elétrico, seja por falta de potência injetada devido à baixa do recurso, seja por excedente de oferta. No primeiro caso, pode haver redução da frequência da rede. No segundo, aumento da frequência. Em ambos os cenários, é possível observar os efeitos da variabilidade em inversores, religadores, derivações de transformadores, controladores de tensão e no sistema de proteção, promovendo flutuações de tensão e problemas relacionados à qualidade de energia e estabilidade da rede. Em casos mais extremos, é passível que haja um blecaute caso não sejam tomadas medidas mitigatórias (Bloom, 2017).

Para demonstrar a intermitência da geração por ERV e comparar com a geração por fonte hidráulica, foram extraídos dados de geração horária de seis ativos de geração renovável no Brasil e outros países da América do Sul.

Na figura 4 está representada a geração de dois parques eólicos: Alvorada, situado no sertão da Bahia, e Renascença, situado no litoral do Rio Grande do Norte. É possível notar que há um certo comportamento de complementariedade entre os parques, mas em ambos os casos o Fator de Capacidade (razão entre potência de geração e a capacidade instalada, em valores percentuais, ou Potência Ativa em p.u.) possui alto grau de variação entre as horas do dia.

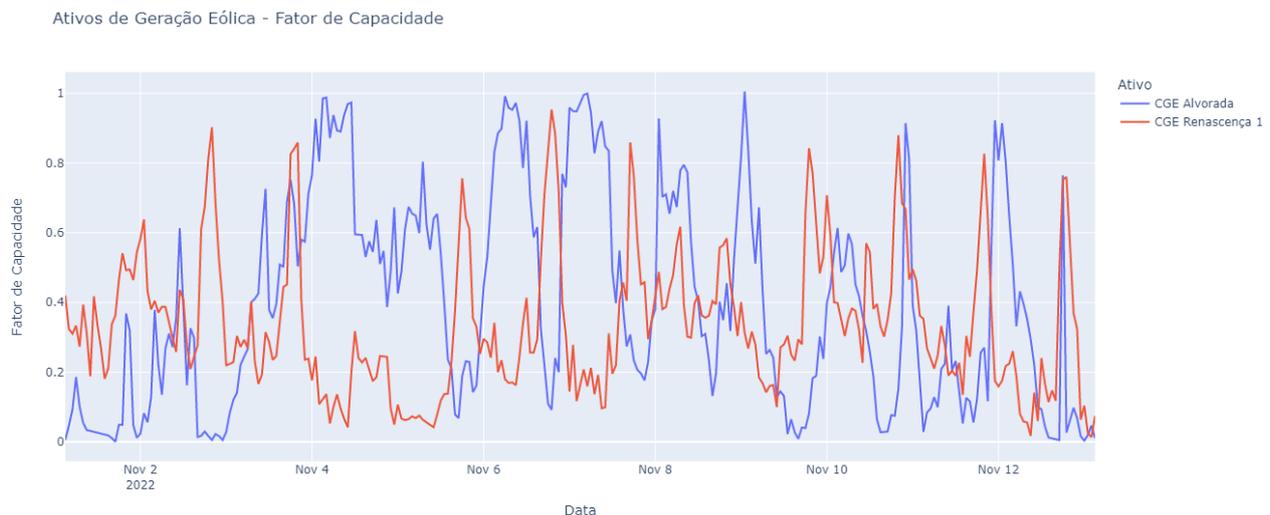


Figura 4: Fator de Capacidade de Ativos de Geração Eólica (Elera Renováveis, 2022).

Como é possível observar na figura 5, a geração solar possui a característica de intermitência com o horário de luz solar. É possível notar que de um dia para o outro há variações a depender do horário, indicando condições climatológicas diversas, como nuvens e/ou chuvas.

Note que na curva vermelha referente à planta solar Alto Cielo, situada à noroeste do Uruguai, há uma característica marcante no dia 06 de novembro de 2022. A geração neste dia ficou limitada à 20% do fator de capacidade da usina. Isso ocorreu, pois neste dia houve abundância de oferta de energia no sistema regional, sob operação de responsabilidade da ADME (Administración del Mercado Eléctrico del Uruguay).

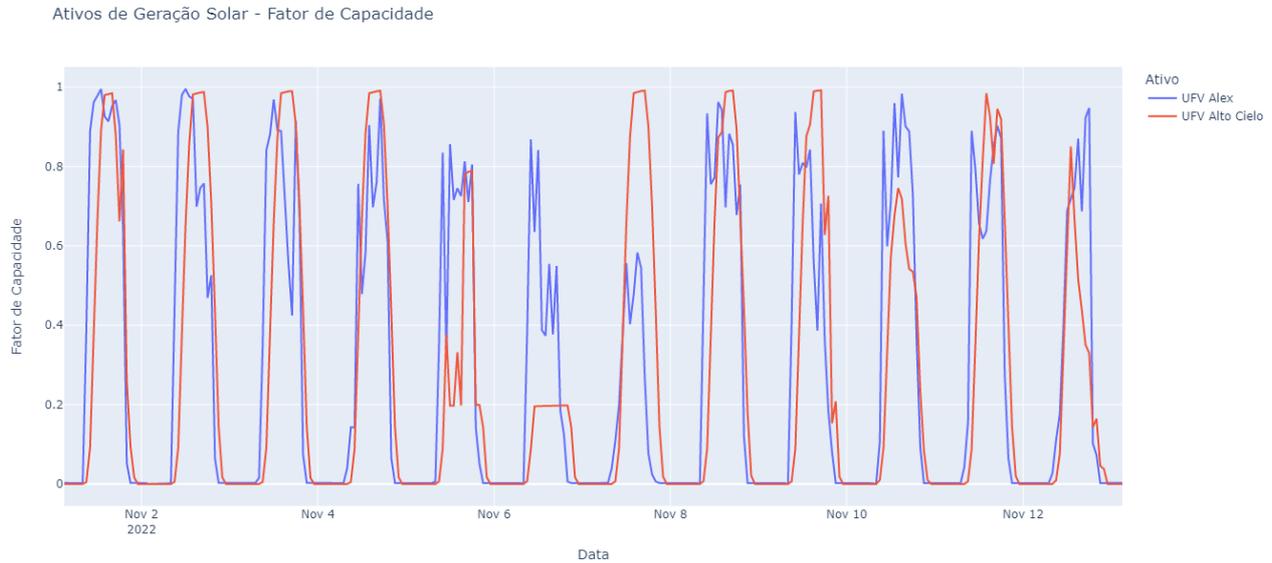


Figura 5: Fator de Capacidade de Ativos de Geração Fotovoltaica (Elera Renováveis, 2022).

Analisando usinas de geração hidráulica, vide figura 6, nota-se uma variação muito mais suave e controlada do fator de capacidade durante os dias do horizonte de observação. Isso se dá por conta dos reservatórios que permitem o armazenamento do recurso de forma que o agente de geração defina os horários em que o despacho possa auxiliar o sistema ou mesmo aproveite a margem de melhores preços de venda de energia quando há modulação do PLD (Preço de Liquidação das Diferenças).



Figura 6: Fator de Capacidade de Ativos de Geração Hidráulica (Elera Renováveis, 2022).

É natural inferir que é mais fácil e vantajoso realizar um planejamento e execução da operação quando há pouca variabilidade ou então quando se tem a possibilidade de armazenar o recurso de geração de energia. Entretanto, não é possível controlar a velocidade dos ventos, tampouco o brilho do sol.

Com a grande penetração das fontes de ERV no sistema elétrico e a possibilidade de eventos climáticos extremos, a volatilidade da oferta de energia aumenta. Além dos problemas levantados anteriormente por conta da variabilidade do recurso, outra grande consequência da intermitência são os *curtailments* da geração quando esta for maior que a carga mais perdas do sistema. Vimos esta limitação na figura 5, na geração do dia 6 de novembro de 2022 da UFV Alto Cielo. Quando isso acontece, a energia que poderia estar sendo injetada no sistema simplesmente não é utilizada.

Visando acompanhar o processo de descarbonização das atividades do setor elétrico e a transição energética da matriz de geração por fontes de ERV, seria um fator muito benéfico e, quiçá, crítico para a viabilidade de tamanho crescimento, a possibilidade de se armazenar a energia que não é transmitida durante os *curtailments* (Ogimoto, 2020). Discutiremos no próximo capítulo soluções de armazenamento de energia, suas tecnologias e desafios.

3. Sistemas de armazenamento de energia

A energia elétrica pode ser gerada, transmitida e transformada de forma relativamente fácil. Entretanto, seu armazenamento ainda é um desafio por se tratar um processo não muito prático, caro e, por vezes, difícil. Isso significa que a energia deve ser gerada de acordo com a demanda e, conseqüentemente, as ERV necessitarão de apoio de sistemas de armazenamento para serem integradas ao sistema elétrico, evitarem descargas de energia em momentos de pouca carga e proporcionarem maior eficiência ao sistema elétrico.

Em um mundo em plena transição das energias fósseis para as fontes renováveis, como a energia eólica e a solar, uma melhoria do armazenamento de energia elétrica seria de vital importância para respaldar estas tecnologias, garantindo que os sistemas de rede estejam equilibrados e contribuindo para aproveitar ao máximo cada megawatt verde gerado.

Armazenar energia não é um assunto recente. De acordo com a mitologia grega, para aproveitar a força dos ventos, o deus Éolo decidiu aprisioná-los em uma ânfora. Hélio, por sua vez, conseguira estabelecer a alternância entre o dia e a noite ao arrastar o Sol com seu carro alado. Deixando a mitologia de lado, a História mostra que a humanidade busca há séculos modos de armazenar e aproveitar melhor os recursos naturais e a energia associada a eles.

3.1. Desenvolvimento

- 4000 a.C.: conta-se que a mais antiga estrutura para armazenar recursos energéticos foi a Barragem de Jawa, conhecida como a primeira barragem de alvenaria a ser construída pelo homem para desviar o curso do Rio Nilo e encaminhar a água aos complexos sistemas de irrigação da época, a fim de transformar regiões improdutivas em ricas planícies férteis.
- 247 a.C. – 224 d.C.: em 1938 o arqueólogo alemão Wilhem König analisou um objeto que foi considerado como a primeira bateria rudimentar da história, a chamada Bateria de Bagdá. O

objeto era um jarro de terracota dotado de um cilindro de cobre, que por sua vez, continha uma única barra de ferro. Experimentos foram conduzidos e mostraram que o jarro, preenchido de um eletrólito, agia como uma célula eletroquímica.

- Idade Média: de modo a defender as fortificações medievais, toras ou pedras arredondadas eram instaladas no topo de muros e colinas. Na ocasião de um eventual ataque, a energia potencial associada era liberada, transformando-se em energia cinética usada para repelir as investidas dos invasores.
- 1799: o físico italiano Alessandro Volta constrói a primeira bateria que podia prover uma corrente contínua a um circuito elétrico. A chamada Pilha de Volta foi o primeiro gerador estático de energia elétrica a ser criado. A bateria consistia em um circuito com dois metais diferentes separados por um pedaço de tecido ou papel embebido de eletrólito. Este circuito gerava corrente elétrica. Ao empilhar estes componentes, Volta pôde ajustar a quantidade de eletricidade produzida de acordo com sua vontade.
- 1866: o engenheiro francês Georges Leclanché inventa a célula de Leclanché. Este dispositivo é formado por um cilindro de zinco metálico, que funciona como anodo, separado das demais espécies químicas presentes na pilha por um papel poroso, mergulhado em um recipiente com solução de cloreto de amônia. O catodo é o eletrodo central, consistido em grafite coberto por uma camada de dióxido de manganês, que também possuía carbono misturado. Esta bateria fornecia uma tensão de 1,4 V.
- 1888: o físico alemão Carl Gassner inventa a bateria seca, ou seja, totalmente isenta de líquidos e, portanto, facilmente transportável e utilizável. Sua composição é semelhante à pilha de Leclanché, entretanto em seu catodo há carvão em pó e uma pasta úmida contendo cloreto de amônio e cloreto de zinco. Assim como a pilha de Leclanché, esta pilha possui caráter ácido, devido à presença de cloreto de amônio, e não pode ser recarregada, pois no seu uso ocorre uma semirreação de redução irreversível.
- 1893: o químico inglês Edward Weston inventa uma pilha úmida ainda menor. A Pilha Padrão de Weston servirá de referência aos laboratórios para a calibração de instrumentos de medição, como os voltímetros. Esta pilha é composta de mercúrio-cádmio, produz uma tensão de 1,0183V e tem um coeficiente de temperatura muito baixo. A tensão diminuía muito pouco com o tempo – cerca de 0,08mV ao ano.
- 1896: as pilhas secas começam a entrar no mercado. A National Carbon Company – hoje Energizer – dá início às distribuições de pilhas secas no mercado estadunidense.
- 1900 – 1950: em uma tendência de evolução e redução de materiais, são empregados diferentes materiais para novos tipos de baterias como zinco-ar (1914), metano (1936), mercúrio (1942) e a primeira pilha alcalina (1950). O objetivo é obter produtos cada vez menores e com mesma capacidade de armazenamento, capazes de se adaptar a diversas finalidades.
- 1907: é construída na Suíça a usina de Engeweiher, primeira usina hidrelétrica reversível, que utiliza dois reservatórios – um inferior e um superior – para armazenar água e, ora gerar energia através da queda d'água, ora bombear água para o reservatório superior para utilizar novamente. Esse tipo de usina permite que em horários em que a energia é mais cara, gere-se a energia, e em horários em que a energia é mais barata, a água seja bombeada. Foi o primeiro mecanismo de armazenamento de energia elétrica em larga escala a ser implementado no mundo.
- 1957: as primeiras baterias de mercúrio entram no mercado. As mais comuns são as redondas e achatadas, típicas dos relógios de pulso, calculadoras e outros aparelhos elétricos portáteis.

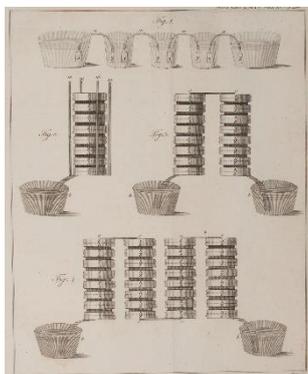
- 1963: as baterias de combustível são utilizadas pela primeira vez nas naves espaciais Gemini e Apollo, ambas da NASA substituindo as células convencionais de combustível.
- 1978: entra em operação o primeiro sistema de armazenamento CAES (Compressed-air energy storage) que utiliza a energia nuclear para comprimir e injetar o ar em duas cavernas de deslocamento com um volume de 310.000 m³.
- 1990: a pilha de Weston foi banida devido às novas descobertas de pesquisas sobre a toxicidade do mercúrio e do cádmio, ambos os elementos presentes em alta concentração nas baterias.
- 1991: após 20 anos de estudos, as primeiras baterias recarregáveis de íons de lítio começam a ser comercializadas: elas permitem armazenar grandes quantidades de energia por várias vezes e são a base dos principais instrumentos de comunicação e de trabalho atuais. Em 2019, John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino receberam o Prêmio Nobel de Química pela descoberta.
- 2008: o denominado Project Barbados entra em operação no mês de novembro. Trata-se do primeiro sistema de baterias de íons de lítio conectado à rede elétrica para finalidade estritamente comercial.
- 2014: o primeiro sistema de armazenamento eletroquímico de dimensões comerciais da Europa é inaugurado na Alemanha, nas imediações de Schwerin. A planta hospeda 25.600 baterias de íons de lítio para armazenar a produção eólica e fotovoltaica não programável.



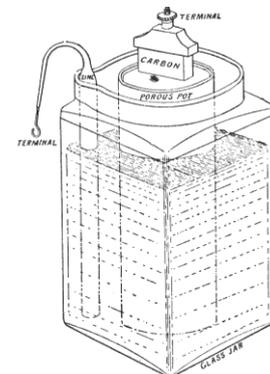
a - Barragem de Jawa



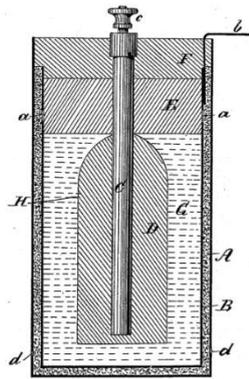
b - Bateria de Bagdá



c - Pilha Voltaica



d - Pilha de Leclanché



e - Pilha Seca



f - Usina Hidrelétrica Reversível



g - Pilhas Alcalinas



h - Bateria Recarregável de Lítio

Figura 7: Mecanismos de Armazenamento de Energia.

Cerca de 6000 anos se passaram desde o primeiro mecanismo de aproveitamento de recursos energéticos até os dias de hoje e, ainda assim, este tema ainda possui amplo potencial para ser explorado. A seguir, abordaremos com maiores detalhes o funcionamento das baterias, desde seu início até as baterias modernas.

3.2. Baterias de lítio

Baterias são extremamente comuns no nosso cotidiano. Desde um relógio de pulso a um veículo elétrico, elas se fazem necessárias para garantir seu funcionamento. Caso não existissem, seria necessário que uma fonte fixa de alimentação de energia estivesse conectada a todos os aparelhos elétricos existentes.

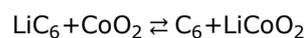
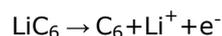
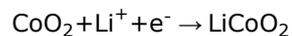
As baterias são dispositivos que armazenam energia em compostos químicos capazes de gerar carga elétrica. Como abordado no subtópico anterior, elas são apresentadas em várias formas. Suas principais vantagens são a sua rapidez de resposta, na ordem de milissegundos, sua facilidade de instalação e escalabilidade, permitindo também sua portabilidade, e, finalmente, os vários benefícios que podem oferecer a ativos renováveis onde podem ser instaladas. Não existe a bateria ideal, mas existe a bateria mais adequada para cada aplicação, levando em conta aspectos técnicos, econômicos, logísticos e até mesmo sociais. Nas aplicações de armazenamento de energia, as baterias de íons de lítio têm se mostrado mais promissoras. Neste subtópico o foco será no funcionamento deste tipo de baterias.

Dentre os diversos tipos de baterias citadas no subtópico anterior, as baterias de íons de lítio têm sido amplamente utilizadas devido à sua maior durabilidade de carga, menor quantidade de substâncias utilizadas em sua composição e menor ocorrência do efeito memória, conhecido também como vício da bateria, que faz com que a bateria perca carga com mais facilidade. Além disso, o lítio, depois do hidrogênio e do hélio, é o menor elemento da tabela periódica, e é também o menor átomo que se pode encontrar em estado sólido. Por último, o lítio pode ceder facilmente um de seus três elétrons, tornando-se um íon positivo que pode se inserir nos eletrodos de uma bateria e mover-se transportando carga entre um eletrodo e outro.

Uma bateria é composta de dois eletrodos: o anodo ligado ao polo negativo e o catodo ligado ao polo positivo, separados por uma membrana semipermeável que deixa passar somente alguns íons conservando os demais componentes da bateria. Para carregá-la, os dois polos são conectados a uma fonte que, à justa diferença de potencial, produz uma reação química chamada oxidação com a qual se retiram alguns elétrons das moléculas presentes no catodo e estes são fluem ao longo dos cabos elétricos em direção ao polo negativo. No anodo ocorre a reação inversa, chamada redução, que permite um elétron alcançar um íon positivo tornando-o átomo neutro. Este último pode depositar-se no próprio anodo, entretanto, no interior da célula, um número igual de íons positivos atravessa a barreira semipermeável que separa o catodo do anodo acumulando-se neste último e capturando os elétrons que são trazidos graças à fonte externa (Let's Talk Science, 2019).

Quando se quer utilizar a bateria, o processo acontece de modo contrário: realiza-se a oxidação no polo negativo extraindo os elétrons outrora acumulados formando assim corrente elétrica.

Para baterias de lítio, o anodo é formado pela associação de lítio (Li) e grafite (C), ao passo que o catodo é formado por óxido de lítio e cobalto (Co). O processo de carga e descarga é semelhante ao descrito anteriormente. No processo de redução o óxido de cobalto (CoO₂) se combina com íons de lítio para formar óxido de lítio cobalto (LiCoO₂). Já no processo de oxidação, o composto de intercalação de grafita (LiC₆) forma grafite (C₆) e íons de lítio. As semirreações e a reação completa estão representadas abaixo.



Durante o processo de descarga a equação (fluxo de elétrons) ocorre do lado esquerdo para o direito e, no processo de carga, a equação ocorre no sentido contrário, como representado na figura 8.

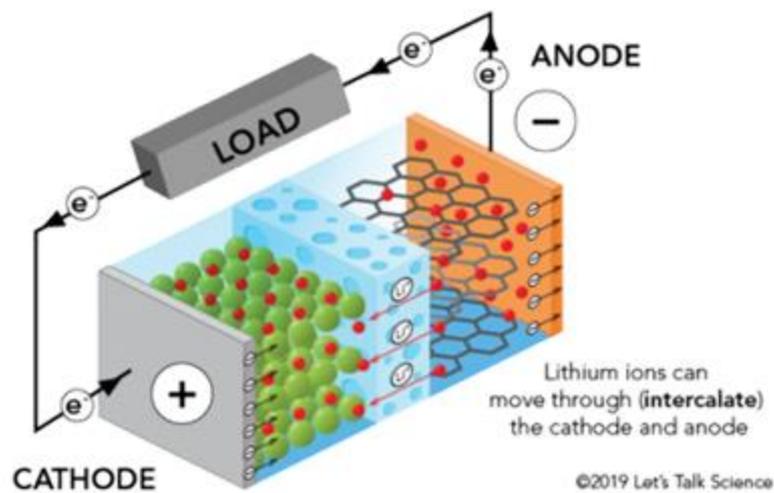
A unidade de carga no SI (Sistema Internacional) é o Coulomb (C). Uma unidade de carga representa uma certa quantidade de elétrons. Mais especificamente, 1 C = 6,25 x 10¹⁸ elétrons. A capacidade da bateria está associada ao tempo e à medida da corrente que se pode utilizar. Esta é expressa em ampère-hora (Ah) ou miliampère-hora (mAh). A corrente é a taxa de variação da carga no tempo, ou seja, 1 A = 1C/s. No caso de 1 Ah, tem-se 1 ampère para cada segundo em uma hora, ou 3600 segundos. Logo, 1 Ah = 1 C/s x 3600 s = 3600 C. Representando a unidade em mAh, tem-se que 1 mAh = 3,6 C. A depender da tensão de saída, tem-se uma unidade de energia em kWh. Por exemplo, para uma tensão de 1000 V e capacidade de 1 Ah, há 1 kWh de energia.

As principais vantagens das baterias de lítio são a sua elevada densidade de energia em comparação com outros tipos de bateria, o que implica em uma concentração maior de energia em menor volume ocupado, sua autodescarga é relativamente baixa – cerca de 50% da autodescarga das baterias de NiCd e NiMH – e a ausência de materiais tóxicos. Além disso, elas requerem menos manutenção e suas células causam menos danos ao meio-ambiente em comparação com baterias de chumbo-ácido ou à

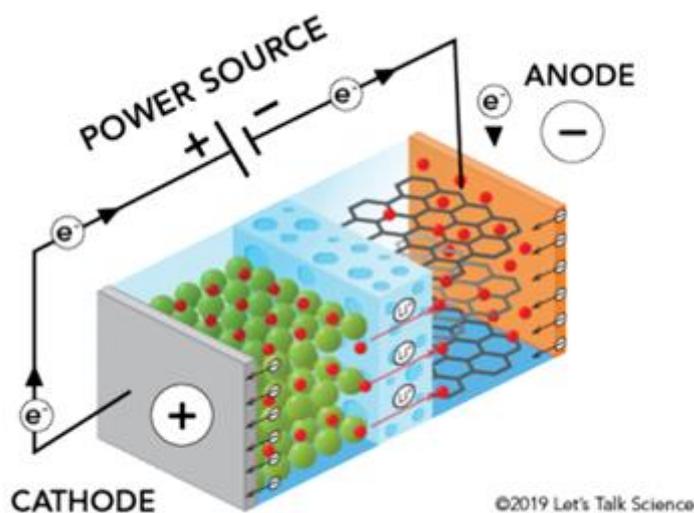
base de cádmio. Outros fatores importantes a se mencionar são seu longo ciclo de vida, versatilidade e redução crescente de custos.

As principais desvantagens das baterias de íons de lítio são a necessidade de um circuito de proteção – este limita a tensão e a corrente. A bateria é segura se não for sobrecarregada. Elas estão sujeitas ao envelhecimento, mesmo fora de uso. O correto armazenamento e a 40% da carga, reduz o efeito do envelhecimento. Seu alto custo de fabricação também é um fator crítico, mesmo com as reduções de custo que as baterias vêm sofrendo. Outro ponto de atenção é a possibilidade de chama devido ao eletrólito ser inflamável e pelo calor que a célula pode atingir se seu uso superar as especificações.

Na tabela 2, são apresentados alguns parâmetros de avaliação e comparação entre as diferentes tecnologias de baterias. Os parâmetros são: Potência Nominal, Densidade de Energia, Tempo de Descarga, Eficiência Energética e Ciclo de Vida.



a - Processo de Descarga



b - Processo de Carga

Figura 8: Bateria de Lítio. (a) Descarga, (b) Carga (Let's Talk Science, 2019)

As baterias de íons de lítio e as de enxofre-sódio possuem densidade energética maior do que as demais baterias, vide figura 9. Ao se comparar o tempo para descargas baterias, percebe-se que as baterias de lítio possuem o menor tempo entre as tecnologias analisadas, bem como possuem maior eficiência e vida útil. Apesar disso, necessitam de sistema de gerenciamento para monitoramento dos seus parâmetros, podem impactar negativamente o meio ambiente e possuem alto custo inicial.

Tabela 2: Comparação de Parâmetros de Baterias (Campos, et al)

| Tecnologia | Potência Nominal (MW) | Densidade de Energia (Wh/kg) | Tempo de Descarga (h) | Eficiência Energética (%) | Ciclo de Vida (anos) |
|------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|
| Chumbo-Ácido | < 36 | 50 | 8 | 75 ~ 85 | 3 ~ 12 |
| Íons de Lítio | <102 | 200 | 6 | 90 ~ 94 | 5 ~ 15 |
| Íons de Alumínio | Não Encontrado | 60 | 6 | 90 ~ 94 | 5 ~ 15 |
| Fluxo de Vanádio | < 28 | 30 | 10 | 70 ~ 85 | 5 ~ 15 |
| Enxofre-Sódio | < 50 | 240 | 8 | 75 ~ 86 | 5 ~ 10 |

Em relação aos custos, foi constatada uma queda de 87% do valor das baterias de lítio entre 2010 e 2019, o que tem motivado a utilização dessa tecnologia nas mais diversas aplicações. A capacidade instalada mundial de baterias de íons de lítio teve um aumento em torno de 60% entre 2012 e 2018. Isso pode ser explicado pela maior utilização de veículos elétricos e Battery Energy Storage System (BESS) nos sistemas elétricos. No próximo tópico será abordada a utilização de tais dispositivos de armazenamento de energia.

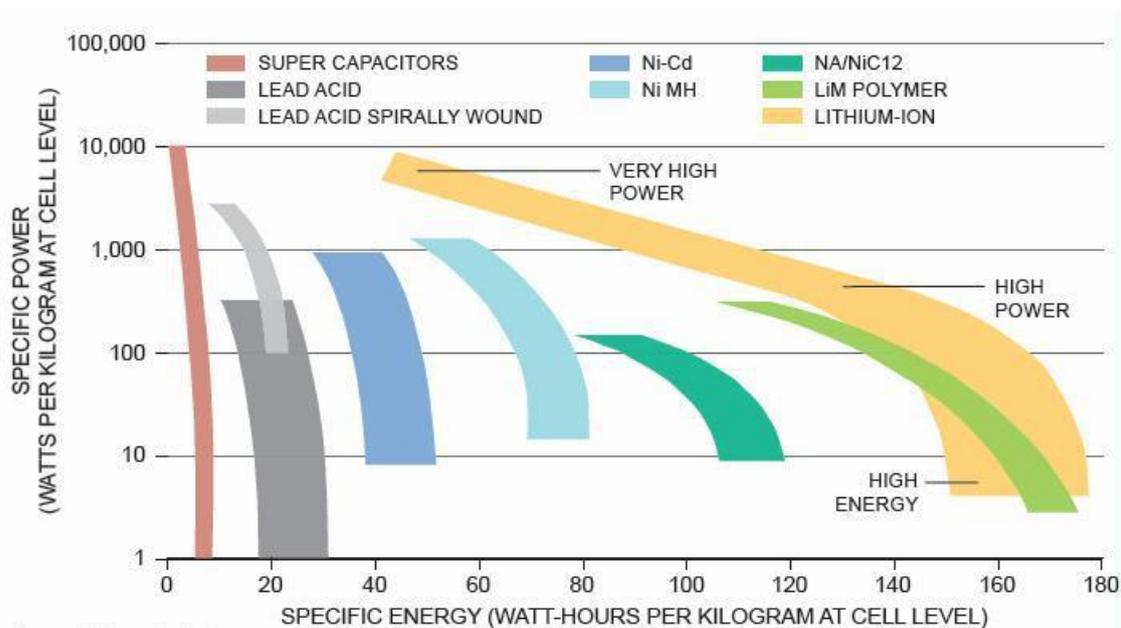


Figura 9: Tabela Ragone - Densidade de Energia (Extraído de Treinamento Banco de Baterias Conectado à Rede Elétrica e a Geração Eólica, CPFL)

4. Battery Energy Storage System

Por quase um século, os sistemas de potência ao redor do mundo focaram em três funções chave: gerar, transmitir e distribuir eletricidade como *commodity* de tempo real. A física exige que a geração esteja sempre balanceada com a carga, independentemente da variabilidade desta, em escalas de tempo da ordem de milissegundos. Com o aumento da penetração de geração por fontes renováveis variáveis, como abordado no tópico 2, redução de geração baseada em combustíveis fósseis e o perfil de consumo cada vez mais variado, os operadores dos sistemas estão utilizando novos métodos para manter o balanço da rede. Um dos métodos mais recentes e promissores é o Battery Energy Storage System (BESS).

O BESS é um sistema de armazenamento de energia fundamental para atender o objetivo de descarbonizar as atividades do setor elétrico. Os sistemas de armazenamento por baterias são capazes de armazenar a energia elétrica produzida em excesso pelas usinas renováveis variáveis e seu funcionamento é semelhante ao das baterias presentes em nossos dispositivos de uso diário. Eles são capazes de converter uma reação química em energia elétrica, armazenando a energia que será liberada segundo a necessidade, tal como um *power-bank* quando nossos dispositivos eletrônicos entram na reserva. Sua participação no sistema elétrico é proposta como uma importante abordagem para prover serviços auxiliares, melhorar a geração por ERV e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia proveniente de fontes fósseis.

O BESS é composto por um Banco de Baterias, um Sistema de Monitoramento de Baterias (Battery Management System, BMS), um Sistema de Conversão de Potência (Power Conversion System, PCS), um Sistema de Gerenciamento de Energia (Energy Management System, EMS), e por componentes auxiliares como sensores e extintores de incêndio. Um BESS tem vida útil entre 10 e 15 anos, podendo exceder, a depender das características construtivas, como o tipo de bateria química, padrões de uso, condições de operação e manutenção.

O BMS é responsável por monitorar e controlar os parâmetros das baterias durante a operação do BESS. O PCS tem como objetivo converter energia de corrente alternada em corrente contínua e vice-versa através de inversores e conversores. A função do EMS é monitorar e gerenciar a atuação do BESS e de seus dispositivos. A manutenção da segurança e confiabilidade da operação do sistema de armazenamento fica a cargo dos serviços auxiliares.

A expansão dos sistemas de armazenamento está intimamente ligada à inovação tecnológica e à sustentabilidade dos produtos. As modalidades mais populares atualmente se baseiam em sistemas de bateria de lítio, utilizados de forma associada a outras tecnologias emergentes que tornarão os sistemas de armazenamento do futuro ainda mais vantajosos e com um desempenho cada vez mais otimizado. Apesar de terem um reduzido peso e uma alta eficiência, um dos maiores empecilhos para sua maior difusão no sistema elétrico de potência é seu elevado custo.

Porém, esta situação parece estar mudando. Conforme um recente estudo da organização BloombergNEF (BNEF), o custo das baterias de íon de lítio se reduzirá consideravelmente nos próximos anos, além inclusive da redução de 85% que ocorreu entre 2010 e 2018. Mais concretamente, a BNEF prevê uma redução até a metade dos custos das baterias de íon de lítio por kW/h para 2030, à medida que a demanda aumente em dois mercados diferentes: armazenamento estacionário e veículos elétricos.

Isto facilitará que as instalações de armazenamento de energia a nível mundial se multipliquem exponencialmente, desde modestos 9 GW/17 GWh implementados a partir de 2018 até 1.095 GW/2.850 GWh em 2040. Este expressivo aumento exigirá um investimento de cerca de 662 bilhões de dólares.

O mercado global de BESS oferece uma grande escolha de opções de produtos, que variam em química, escala, funcionalidade, uso pretendido e preço. Alguns dos maiores players desse mercado são: ABB, NextEra Energy, BYD, Panasonic, Toshiba, Fulence (joint venture da AES e Siemens), Samsung, LG Chem, General Electric, Hitachi, Tesla, NEC Corporation, Johnson Controls.

Dentre as finalidades do BESS estão o equilíbrio da rede através do controle de frequência, o deslocamento de carga, a reserva de energia, a confiabilidade de suprimento, a qualidade de energia, a gestão da demanda contratada e a gestão de tarifas. As diferentes aplicações vão depender do local de instalação do BESS, se será "antes ou atrás do medidor". Cada um destes pontos será tratado em seguida.

4.1. Aplicações do BESS

Antes da discussão a respeito dos diferentes usos do BESS, é importante mencionar que há três áreas de aplicação: os sistemas "atrás do medidor", os sistemas "antes do medidor", e os sistemas off-grid. Cada um destes sistemas determinará o porte do empreendimento de armazenamento de energia bem como sua aplicabilidade. Sistemas "atrás do medidor" são os de pequeno e médio porte instalados por consumidores individuais. Estas estão focadas em aspectos de gestão, confiabilidade e qualidade de energia para o consumidor. Sistemas "antes do medidor" são aqueles de grande porte aplicáveis em grandes centros de geração e redes de transmissão e distribuição de energia visando evitar linhas e realizar serviços ancilares. Os sistemas off-grid, por sua vez, são aqueles que operam fora da rede elétrica.

Na Califórnia, a Southern California Edison (SCE), é uma distribuidora que vem utilizando uma capacidade de cerca de 10 GW em armazenamento de energia através de recursos distribuídos de energia, como exemplo de aplicações "depois do medidor". Um número crescente de habitantes da Califórnia tem adotado tecnologias de recursos distribuídos de energia, como geração solar, dispositivos de eficiência energética, carros elétricos e armazenamento de energia.

A SCE realizou testes para determinar a capacidade de um BESS em grande escala para auxiliar em um serviço de achatamento da curva de carga e correção do fator de potência. O achatamento de curva ajudará a distribuidora a evitar complexidades operacionais associadas com o processo de partida e parada de plantas durante as horas de carga pesada e de carga leve, prevenindo a sobrecarga de equipamentos em partes do sistema e adiando manutenções nos sistemas de transmissão e distribuição. A utilização do banco de baterias para correção do fator de potência propõe a melhora do perfil de tensão, a redução de perdas energéticas e o aumento da capacidade de carga nos circuitos de distribuição.

A fim de sincronizar os ativos de geração para a operação da rede, a corrente alternada deve ser controlada dentro de limites de tolerância. Para realizar este controle, a inércia dos geradores e a adição e subtração de geração na rede estão entre os métodos mais recorrentes. Figurando entre novos métodos, a utilização de sistemas de armazenamento de energia representa grande potencial para a regulação da frequência da rede. Em Kyushu, no Japão, um empreendimento que conta com um BESS de 50 MW, e capacidade de 300 MWh, está sendo implantado. Quando a frequência da rede diminui devido à elevada demanda energética, a bateria é capaz de iniciar o fornecimento da energia armazenada em poucos segundos; em caso de aumento da frequência devido à uma queda na demanda, a bateria é recarregada com a energia excedente. Trata-se de uma dupla função essencial para a estabilização de redes elétricas. Um dos benefícios do BESS nesta aplicação é que a resposta de regulação da frequência por rampa de ativos de geração é da ordem de segundos a minutos, ao passo que o *storage* é capaz de efetuar a regulação em milissegundos.

Uma outra abordagem para a utilização de BESS é o deslocamento da curva de geração em algumas horas, quando é mais necessário ou para se valer de tarifação arbitrária. Na figura 11, apresenta-se uma ilustração desta aplicação. Um portfólio de três usinas de fontes renováveis variáveis, de capacidade instalada de 723 MW e Garantia Física de 302 MW, passará a ser integrado com recursos distribuídos de armazenamento de energia totalizando 100MW. Em uma dada semana de agosto de 2022 a geração eólica foi mais baixa que a média durante o horário de carga pesada. Sabendo que a tarifação de geração é valorada ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) e este tem variação horária, busca-se otimizar a operação deslocando-se a curva de energia transmitida para o horário de ponta.

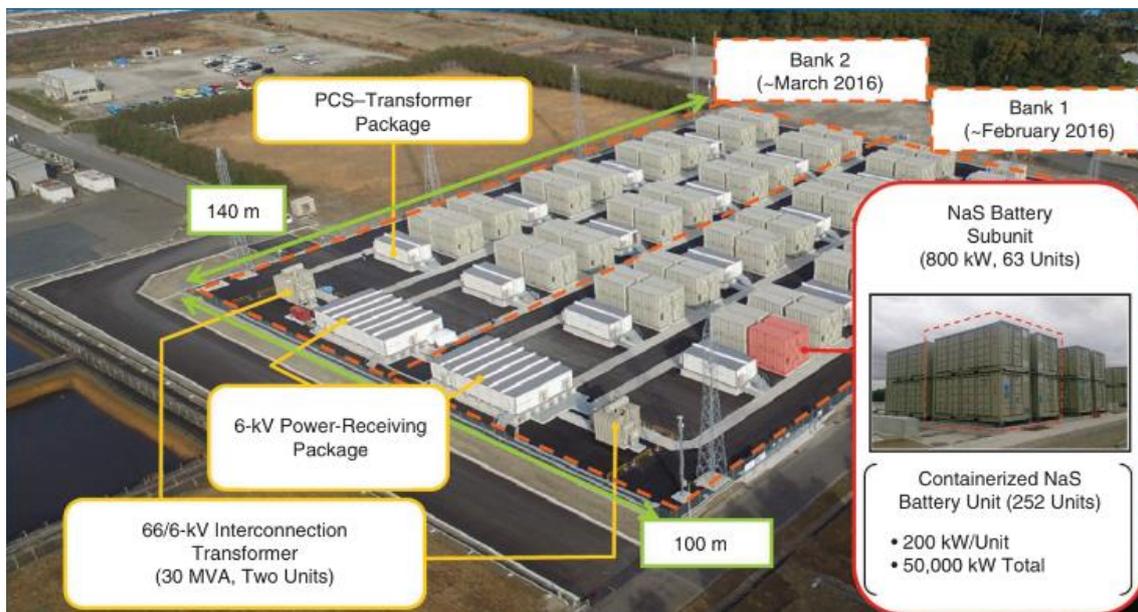
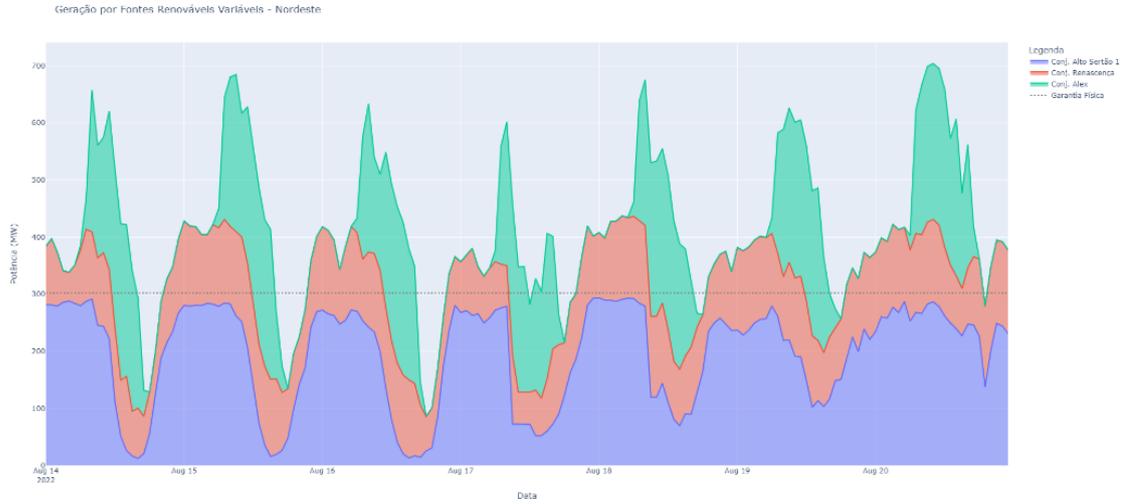
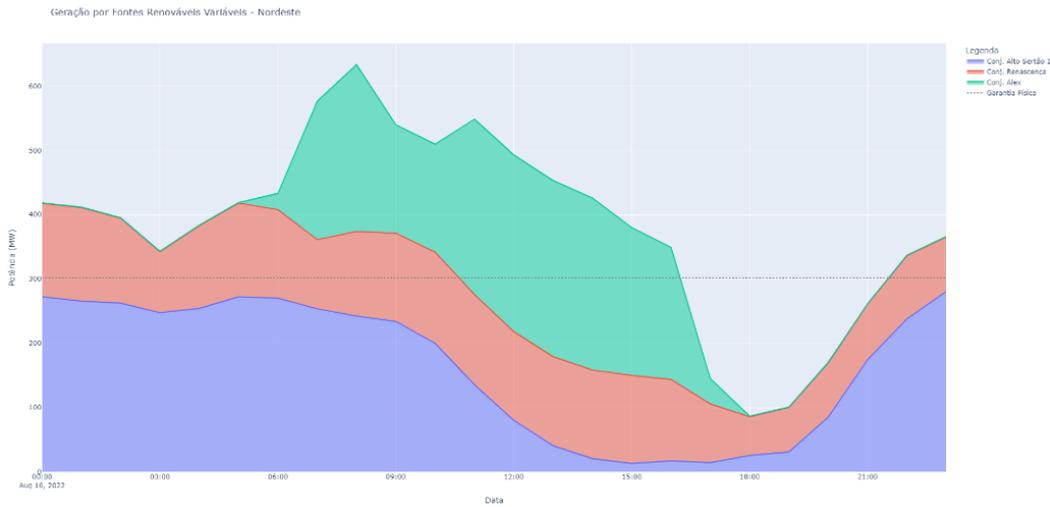


Figura 10: BESS em larga escala em Kyushu, Japão. (Kyushu EPCO)

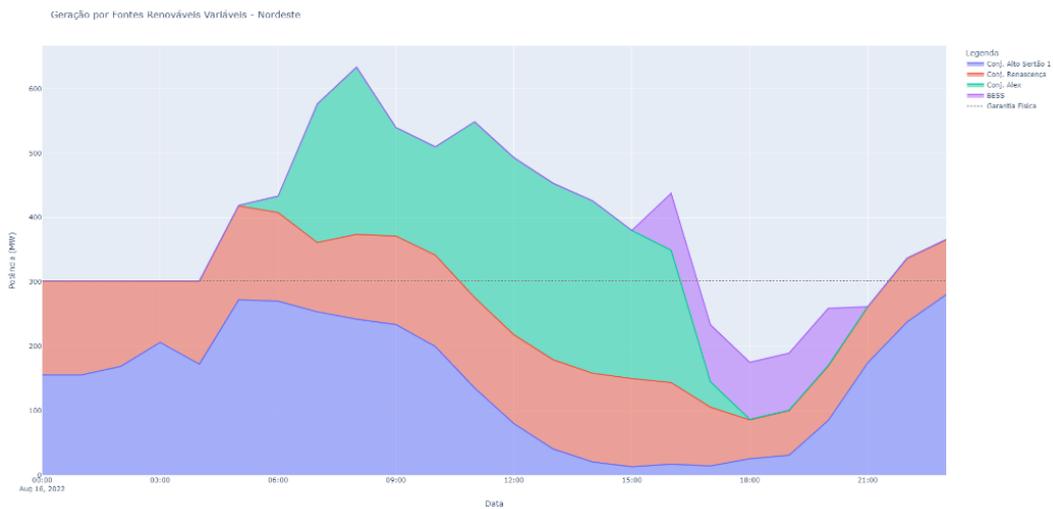
Nos primeiros horários do dia, o PLD está em seu menor preço. Na data de 16 de agosto de 2022, quando se apresentou a menor geração no horário de ponta, o PLD estava variando entre R\$ 67,39 /MWh e R\$ 68,48 /MWh. A fim de se manter o mínimo de geração igualando à Garantia Física e sabendo que o BESS leva 5 horas para ser carregado, utiliza-se o excedente da Garantia Física nas primeiras 5 horas do dia para carregar o sistema de armazenamento e descarrega-se nos horários em que o PLD é maior. Pela distribuição de preços, a melhor janela ocorre entre 16h e 21h.



a - Curva de geração de plantas renováveis variáveis (Elera Renováveis, 2022)



b - Detalhamento do perfil de geração no dia 16/08/2022 (Elera Renováveis, 2022)



c - Deslocamento da geração para o horário de carga pesada – teórico (Elera Renováveis, 2022)

Figura 11: Deslocamento da curva de geração (Elera Renováveis, 2022)

Neste dia, gerou-se o total de 9,18 GWh a partir deste portfólio. Precificado com o PLD, gerou-se uma receita de R\$ 649.329,17, sem a utilização do *storage*. A partir do deslocamento da curva de geração, a receita do dia passaria a ser de R\$653.199,81, um ganho de R\$ 3.870,64 sem alterar a energia total produzida pelos ativos.

A gestão da demanda contratada também é uma oportunidade de utilização do BESS. Esta aplicação visa efetuar a redução do pico da demanda para que não haja ultrapassagem do valor contratado junto à concessionária e impostos incidam sobre este acontecido. No momento em que a geração está mais alta, carregam-se as baterias e quando o recurso estiver reduzido, descarrega-se o sistema de armazenamento. Este uso também auxilia no controle do Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST). Caso o agente de geração ultrapasse o valor de transmissão no ponto de conexão, este pagará uma multa equivalente ao triplo da Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) sobre a diferença do montante contratado, excluída tolerância de 1%, conforme a equação a seguir:

$$\text{Multa} = 3 \cdot (P_{\text{máx}} - 1,01 \cdot \text{MUST}) \cdot \text{TUST}$$

Para exemplificar esta aplicação, em novembro de 2022 um ativo de geração solar ultrapassou o valor contratado do MUST. A geração às 8:45 h do dia 18/11/2022 foi de 52,038 MW ao passo que o montante contratado prevê uma transmissão de 50 MW. A partir da equação da multa, o valor a ser pago pela violação é de 4,615 vezes o valor da TUST, que para esta usina foi contratado a R\$ 5,025/kW.mês (com desconto de 50% de energia incentivada), representando uma multa de R\$ 23.192,77, custo que seria evitado com a utilização de BESS.

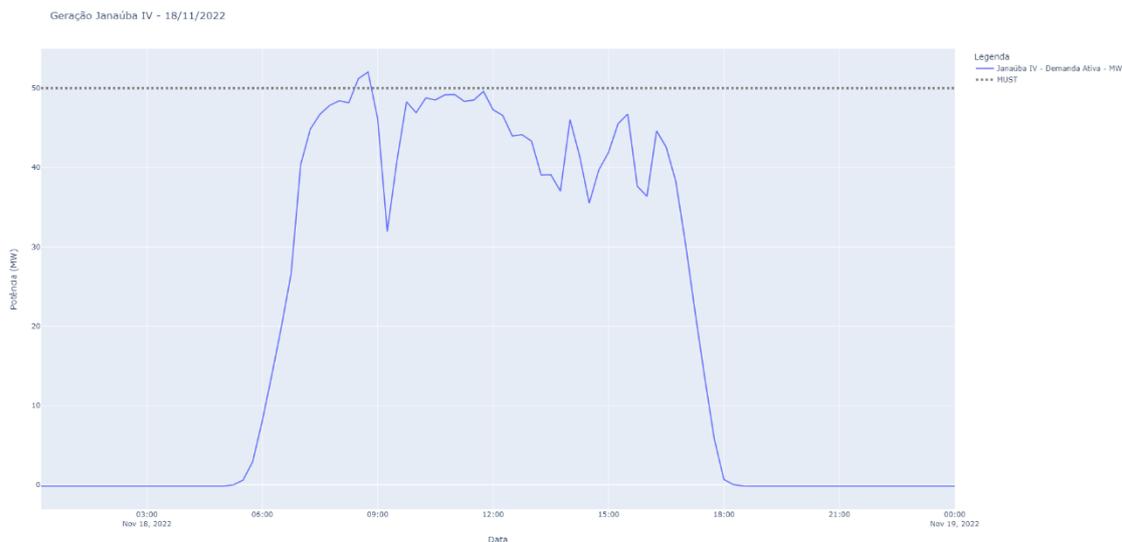


Figura 12: Violação do MUST, Janaúba IV (Elera Renováveis, 2022)

O parque eólico de Kahuku, no Havaí, conta com um BESS de 15 MW/ 10 MWh (não operacional devido a um incêndio ocorrido em 2012) que tinha como principal função reduzir rampas no ponto de conexão da planta. As rampas devem ser limitadas para reduzir seus impactos adversos na confiabilidade do sistema de potência e permitir a integração de quantidades maiores de geração variável. O sistema de armazenamento poderia ser carregado durante as subidas de rampas e descarregado durante as descidas, conforme ilustrado na figura 13.

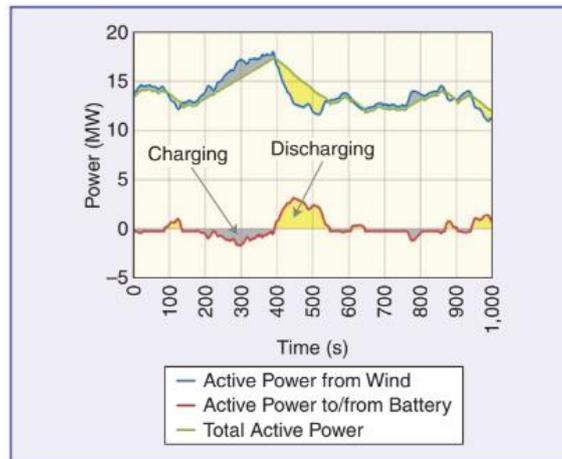


Figura 13: Ilustração da aplicação de BESS na redução de rampas em geração eólica (Grid-Level Application of Electrical Energy Storage)

Na Tehachapi Wind Resource Area, localizada na Califórnia, há um BESS instalado em um parque eólico de propriedade da SCE de capacidade de 4,5 GW. O *storage* conta com um sistema de 8 MW de potência, carregáveis por 4 horas e utiliza baterias de íons de lítio da LG Chem e eletrônica de potência da ABB. Este projeto foi construído para atender os seguintes usos operacionais:

- ✓ Aplicações de Transmissão
 - Suporte de Tensão e Estabilização de Rede.
 - Redução de Perdas por Transmissão.
 - Aumento da Confiabilidade ao deslocar a Curva de Carga.
 - Otimizar a quantidade e o custo de energia transmitida por ERV.
 - Postergação ou eliminação de altos gastos com investimentos na rede.
- ✓ Aplicações a Nível de Sistema
 - Prover adequação de capacidade e recurso ao sistema.
 - Integrar ERV com suavização da entrada na rede.
 - Deslocar saída de geração eólica.
- ✓ Questões de Mercado envolvendo o Operador do Sistema Californiano
 - Regulação de Frequência.
 - Arbitrariedade de preços.
 - Entrega de taxa de rampa.

Em outubro de 2012, um dos primeiros empreendimentos de BESS em larga escala foi comissionado para Portland General Electric e constava com 5 MW/ 1,25 MWh de capacidade instalada. Apenas 5 anos depois, o primeiro BESS de 100 MW foi instalado na Austrália do Sul para auxiliar a rede durante as demandas de pico do verão. Chamado Hornsdale Power Reserve, este sistema de armazenamento tem uma capacidade de 129 MWh e, em 2020, foi expandido em mais 50 MW/ 64,5 MWh pela Tesla. Segundo estimativas, apenas nos dois primeiros anos de operação do Hornsdale Power Reserve houve uma economia de mais de \$ 150 milhões para os consumidores australianos. Na figura 14 está ilustrada a operação de carga e descarga do BESS.

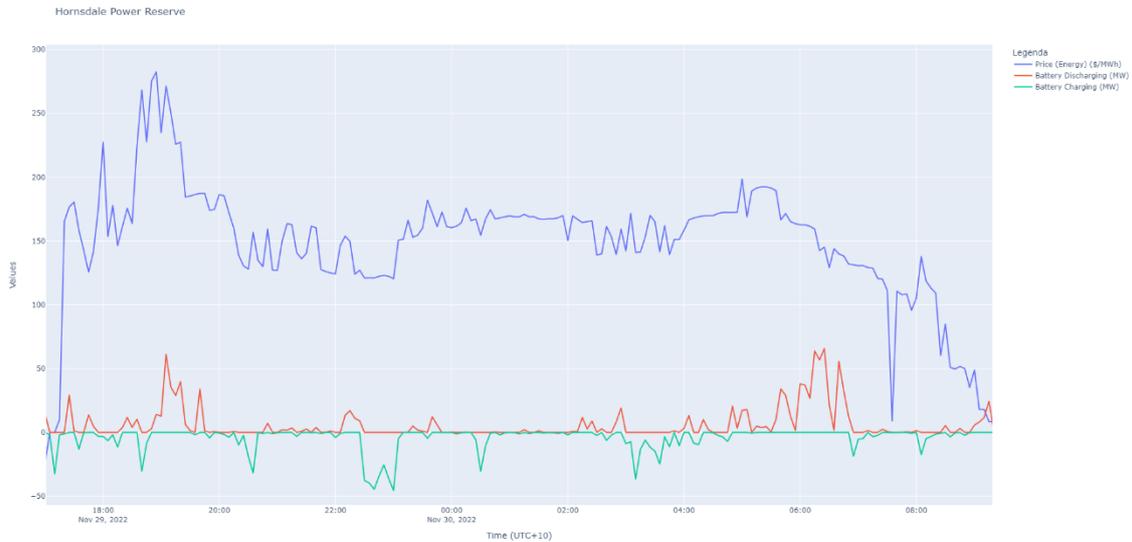


Figura 14: Curva de carga e descarga do Hornsdale Power Reserve em função do preço da energia (Hornsedale Power Reserve, 2022)

Outra importante aplicação do BESS é o aproveitamento do recurso quando o excesso de oferta de energia causa restrições de geração. Quando o recurso está elevado, mas há limitações de rede ou menor demanda que geração, o Operador do Sistema pode restringir a transmissão de energia de agentes de geração. Nesses casos, corta-se ou limita-se a capacidade de gerar, independente da disponibilidade do recurso e do ativo.

Conforme é possível verificar na figura 15, a velocidade do vento (representada pela curva vermelha) estava em alta, permitindo que a curva de geração crescesse. Entretanto, por volta das 10 h houve uma limitação de geração (curva azul) em 16 MW, ao passo que a potência instalada do conjunto é de 150 MW. Em seguida, às 14:30 h houve mais uma restrição na geração, limitando-a em 10 MW. Valendo-se de um BESS, a energia deixada de se transmitir poderia ser armazenada e transmitida quando houvesse baixa do recurso, aproveitando a geração no momento do *curtailment*.



Figura 15: Curtailment no Conjunto Renascença em 04/12/2022 (Elera Renováveis, 2022)

4.2. Simulação de um BESS em um conjunto eólico

Analisando a série de *curtailments* impostos pelo ONS no conjunto eólico Renascença, nota-se que a maioria das limitações ocorre aos domingos, dia em que tipicamente a carga é mais baixa. A figura abaixo mostra uma sequência de dias em que limitações foram impostas. A curva azul representa a potência despachada a cada hora em MW médio (MWh/h), os tramos em vermelho representam a mesma potência quando ela ultrapassa um valor estatístico de 90% do observado para aquela determinada hora do mês e a curva verde representa a geração possível a partir do recurso observado nas torres de medição anemométrica.

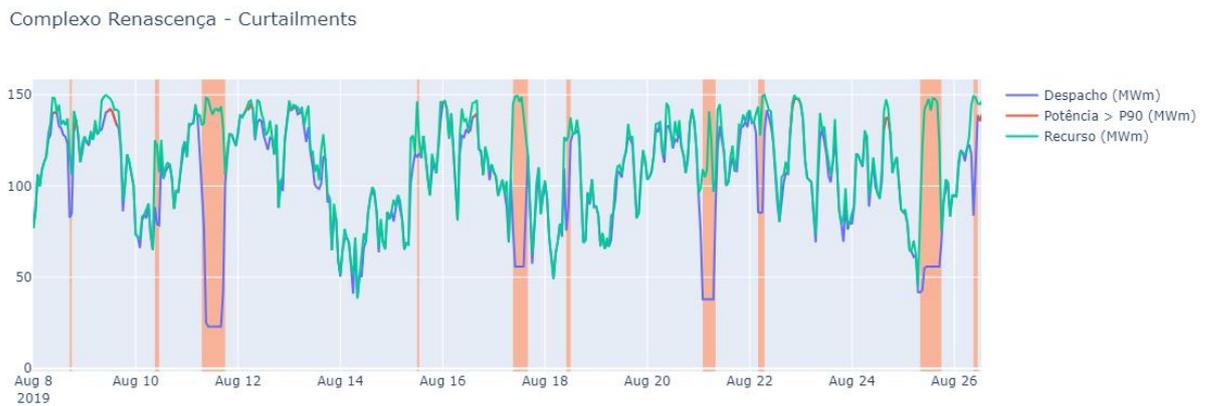


Figura 16: Curtailment no Conjunto Renascença em Agosto de 2019 (Elera Renováveis, 2022)

No caso base a seguir, será avaliada a viabilidade de se implementar um BESS com o perfil de geração deste ativo. Para tal serão consideradas as seguintes premissas:

1. Duração média dos curtailments: 2h;
2. Impacto médio sobre o despacho: 50MWh/h;
3. O tipo de bateria escolhido será de íons de lítio por representar uma das maiores eficiências dentre as baterias avaliadas (> 90%) e custo em declínio;
4. Será considerado um CAPEX (Despesa de Capital) de \$ 579,55 /kW no ano inicial e \$ 14,49/kW-ano em custos de O&M ao longo da vida útil de 20 anos do BESS (NREL);
5. Será considerada também uma taxa de juros de 4% seguindo o IPCA acumulado de junho de 2023 como referência.
6. Por fim, o custo da energia por geração em leilão para o ativo será de R\$275/MWh.

Inicialmente, para dimensionar o BESS, é necessário indicar o quanto de energia deseja-se armazenar e em quanto tempo. No caso proposto, temos uma potência de 50 MW em 2 horas, o que indica 100 MWh de energia. Esta é, hoje, uma dimensão relativamente alta se comparada aos projetos existentes no Brasil atualmente. Para fins de deixar a simulação mais tangível, consideremos 1/5 deste valor, ou seja, 20MWh em 2 horas (10MW).

Segundo projeções do IRENA, baterias de íons de lítio podem ter seu ciclo de vida aumentado em 90% até 2030. Atualmente, baterias deste tipo podem operar por aproximadamente 10.000 ciclos completos de carga e descarga. Ainda de acordo com o IRENA, os custos de instalação do BESS sofrerão reduções significativas da ordem de 50% a 66%. O Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) projeta os custos de CAPEX e O&M em três cenários: arrojado – considerando uma queda mais acentuada dos preços, moderada – considerando uma mediana da tendência apresentada no mercado, e conservadora – considerando o caso de menor desconto dentre os avaliados.

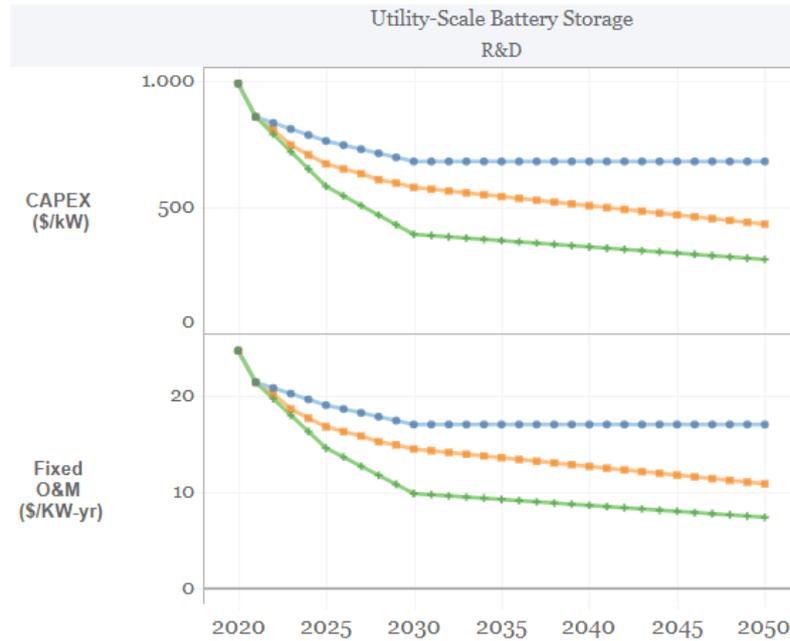


Figura 17: Projeção de custos de CAPEX e O&M para BESS (NREL, 2023)

De acordo com o gráfico acima, em 2030 o CAPEX e O&M apresentarão valores nas faixas de \$ 394,89 a \$ 681,62 e \$ 9,87 a \$ 17,04 respectivamente. Para fazer uma estimativa da viabilidade financeira da instalação de um BESS na planta eólica. Para isso, será calculado o Valor Presente Líquido do projeto com os custos mencionados. Para avaliar as possíveis viabilidades, serão simulados os três cenários de custo projetado.

$$VPL = \text{Ganho Energético} - (\text{CAPEX} + \text{O\&M})$$

$$VPL = \sum_{n=1}^{20} \frac{G_i}{(1+i)^n} - \sum_{n=1}^{20} \frac{O_i}{(1+r)^n} - C_0$$

Onde G_i representa o ganho por geração anual, i é a taxa IPCA atualizada, O_i representa os custos anuais com O&M, r é a taxa Selic e C_0 é o investimento inicial. Realizando os devidos cálculos, chega-se à tabela abaixo, indicando que, caso a projeção conservadora se concretize, a instalação do BESS em Renascença é inviável. Entretanto, nos outros dois casos é demonstrada a viabilidade de se implementar um sistema de armazenamento, com as premissas mencionadas anteriormente. Para que o caso conservador seja viável, o preço da energia deveria ser de, pelo menos, R\$277,18/MWh, resultando em uma TIR maior que 0% e *payback* de 20 anos, um cenário não muito atrativo, apesar de economicamente viável.

Tabela 3: Simulação de cenários de viabilidade econômica

| Custo 2030 | Arrojado | Moderado | Conservador |
|------------|------------------|-------------------|-------------------|
| CAPEX | \$ 394,89 / kW | \$ 579,55 / kW | \$ 681,62 / kW |
| O&M | \$ 9,87 / kW-ano | \$ 14,49 / kW-ano | \$ 17,04 / kW-ano |
| Payback | 5 anos | 10 anos | +20 anos |
| TIR | 13,1% | 3,5% | -0,2% (inviável) |

4.3. O uso do BESS no Brasil

No Brasil, a escassez de projetos de armazenamento de energia utilizando baterias de grande porte impulsionou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a lançar o projeto estratégico Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro (chamada pública nº 21/2016).

Na ocasião, 23 projetos foram aprovados com investimento médio de R\$ 19,2 milhões. Foram selecionados projetos de empresas como Engie, Energisa MS, Petrobras, Amazonas Energia, Furnas, Coelce, CEMIG, CPFL e CTEEP. As propostas recebidas contemplaram diversas tecnologias de armazenamento de energia desde baterias de íon de lítio, até aplicações como baterias de chumbo-ácido, hidrogênio e usinas reversíveis. Os projetos foram propostos com duração prevista de 24 a 48 meses, utilizando tanto recurso do Programa de P&D regulado quanto contrapartida externa por parte das entidades executoras.

Para a seleção foram empregados os critérios de originalidade, aplicabilidade, relevância e custos. O P&D tem como objetivo o desenvolvimento de projetos para avaliação e inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro, de forma que permita criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica, propriedade intelectual e infraestrutura de produção nacional.

A seguir, veremos os projetos selecionados das empresas CEMIG Distribuição, CPFL Energia e ISA CTEEP.

4.3.1. CEMIG

A CEMIG Distribuição, junto a entidades parceiras como a UFMG, Alsol Energias Renováveis, FITec, ITEM e Concert, submeteu a proposta de uma planta piloto de sistema distribuído de armazenamento de energia de 1,26 MW/ 1,36 MWh conectado a um alimentador crítico da rede de distribuição de 13,8 kV. Este foi o primeiro empreendimento de larga escala a ser implantado no Brasil e conta com baterias de Fosfato de Ferro Lítio (LiFePO₄) da fabricante chinesa BYD.

Este empreendimento está conectado a uma usina de geração fotovoltaica (UFV) com capacidade instalada de 1,4 MWp, o que possibilita uma série das aplicações abordadas no subtópico 4.1. Como funções definidas no projeto, constam: i) suavização de potência de origem fotovoltaica; ii) suprimento de energia em situação de contingência da fonte primária da concessionária para blocos de carga específicos; iii) suporte aos serviços auxiliares, notadamente a regulação de tensão e o controle de potência reativa ao longo do alimentador e iv) "peak shaving" e "load leveling" pelo uso do sistema de armazenamento para suprir picos de demanda, reduzindo os investimentos em atualizações da rede de distribuição com conseqüente postergação de investimentos.



Figura 18: BESS CEMIG instalado em Uberlândia (CEMIG, BYD)

A integração do *storage* com a rede de distribuição se dá por meio de um sistema de gerenciamento centralizado, estabelecido por meio de um complexo sistema de comunicação e apoiado por um sistema de decisão otimizado. No mercado há empresas que fornecem a montagem completa do sistema de modo a unificar o conjunto de baterias, BMS, PCS e componentes adicionais que compõem um conjunto completo de equipamentos para aplicações em armazenamento de energia. As principais são as empresas S&C, AES, Woojin, SGCC, GE, Greensmith e ABB.

A depender da capacidade instalada de cada BESS e avaliando-se as restrições operativas impostas pela rede, ele pode contribuir parcialmente ou totalmente para a regulação de frequência e tensão da rede. Além dessas funções, é possível usar a eletrônica de potência associada ao banco de baterias para realizar compensação de potência reativa, desbalanço de correntes e harmônicos de cargas não lineares.

4.3.2. CPFL Energia

Em 2021 a CPFL Energia comissionou e iniciou a operação de três projetos de BESS. São cinco sistemas de armazenamento de energia por baterias de 75 kWh a 2 MWh de capacidade instalada implantados em uma unidade da rede de autopostos Graal, em dois condomínios residenciais, em uma subestação de energia e em uma usina do Conjunto Eólico Campo dos Ventos, no Rio Grande do Norte. Estes projetos tiveram um investimento de mais de R\$ 27 milhões.

No Graal o BESS conta com baterias de lítio de 200 kW/ 430 kWh e está integrado a um gerador diesel e dois eletro postos para a recarga de veículos elétricos (EV). Além de avaliar a viabilidade técnica da substituição do gerador a diesel, o projeto visa promover maior qualidade de energia e redução dos gases de efeito estufa. A partir dos resultados desta aplicação, será possível ampliar o uso desta tecnologia para outros consumidores industriais.

Na Subestação (SE) Barão Geraldo, o BESS de 1 MW/ 2 MWh tem por objetivo a integração com um alimentador de distribuição, garantindo mais qualidade do fornecimento e um planejamento de médio e longo prazos para obras e expansões na rede. O investimento também busca dar mais robustez à SE durante o horário de carga pesada e permitir maior integração de ERV na rede.

Também foi instalado um sistema de armazenamento de energia em baterias de 100 kW/ 255 kWh em um condomínio com 47 residências, sendo que 27 delas possuem sistema de geração solar. Como a geração dessas unidades é maior que a demanda, todas as casas são atendidas e o excedente é exportado na rede de distribuição. O BESS instalado no condomínio permite então o uso posterior da

energia excedente armazenada pelos moradores, realizar controle de tensão local, suavizar o pico de consumo e aliviar o carregamento da rede de distribuição local.



Figura 19: BESS CPFL (Portal Solar)

No Conjunto Eólico Campo dos Ventos, o *storage* de 1 MW/ 1,29 MWh permitirá a otimização da produção de ERV, suavizando a curva de geração. Desse modo, quando houver excedentes de geração o sistema de armazenamento permite acumular energia elétrica para fornecimento quando houver necessidade. Além disso, as equipes realizarão estudos para valoração dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento.

4.3.3. ISA CTEEP

A ISA CTEEP, maior empresa privada de transmissão de energia no Brasil, comissionou em 2022 o maior BESS do Brasil com capacidade de 30 MW, assegurando energia por até duas horas, totalizando 60 MWh. A tecnologia atuará nos momentos de pico de consumo, como um reforço da rede, evitando interrupção de energia devido ao excesso de demanda neste período, garantindo maior confiabilidade e segurança no despacho elétrico.

Em 2010 iniciaram-se estudos elétricos para a temporada de verão na região do Litoral Sul do estado de São Paulo, especificamente para a SE Registro. Na época, iniciou-se a constatação do esgotamento do sistema de transmissão. A partir de 2013 começaram algumas iniciativas de expansão da rede para reforçar o sistema, mas estas enfrentaram dificuldades para avanço de empreendimentos. Dentre as iniciativas constavam reconstrução de Linhas de Transmissão (LTs), aluguel de Geradores diesel e Transformadores Defasadores. Além dos potenciais impactos ambientais que estas iniciativas causariam, o alto custo e inviabilidade no curto prazo as tornaram insuficientes para atender as necessidades de expansão contribuindo com o processo de descarbonização das atividades do setor elétrico. Entre 2019 e 2020 foram feitos estudos para o P&D de Sistemas de Armazenamento de Energia da ANEEL, tendo sua aprovação em 2021. Em novembro de 2022 deu-se início à operação do BESS na SE Registro em uma área de 4 mil m².

O banco de baterias, que tem vida útil de 15 anos e investimento de R\$ 200 milhões, está conectado a um barramento de 138 kV na SE Registro e pode ser utilizado em diversas aplicações como o alívio de pontos de congestão do sistema elétrico, em serviços ancilares, a fim de garantir o funcionamento do

sistema como um todo, tais como o controle de tensão e de frequência, e na compensação da variabilidade de geração por fonte solar e eólica, permitindo uma maior integração de ERV ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Reduzindo assim as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).



Figura 20: BESS ISA CTEEP (2ª Reunião Técnico-Gerencial do ONS, 2022)

O armazenamento atuará como back-up para manter o suprimento de energia elétrica em momentos de pico de consumo, colaborando para o menor acionamento das usinas térmicas, reduzindo a aplicação de sistemas que necessitem de geração a diesel. Com as baterias, será evitada a emissão de 1.194 toneladas de GEE, em dois anos da tecnologia em operação, além da realização de obras em áreas de preservação ambiental, como o Parque Estadual da Serra do Mar. Ainda, até a implantação do sistema, há estimativa de serem gerados cerca de 400 empregos diretos.

4.4. Desafios

O armazenamento de energia por baterias ainda é uma tecnologia em fase de amadurecimento. Mesmo com os rápidos desenvolvimentos e avanços alcançados nos últimos anos, o estado da arte desta tecnologia ainda sofre muitas limitações, incluindo o alto custo. Ao redor do mundo o número de instalações de armazenamento de energia ainda é baixo, entretanto, segundo projeções da Bloomberg NEF, o potencial de instalações de armazenamento de energia subirá para pouco mais de cerca de 1000 GW.

INSTALAÇÕES DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ACUMULADA EM TODO O MUNDO

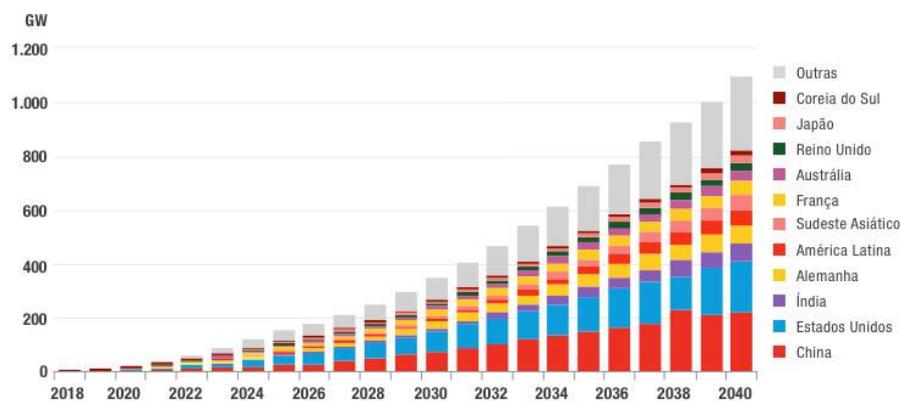


Figura 21: Projeção da Capacidade Instalada de Armazenamento de Energia para Redes Elétricas no Mundo (Bloomberg NEF, 2018)

Como descrito na introdução do tópico 4, o BESS não é composto somente de baterias. Ele é um complexo sistema multicamadas de engenharia. Portanto desenvolver um sistema de armazenamento de energia por baterias do zero exige conhecimento aprofundado em vários campos incluindo tecnologias de baterias, eletrônica de potência e monitoramento. O primeiro destes pontos representa a maior concentração do custo, apesar das reduções de custo que vem sofrendo na última década. As estimativas da Bloomberg NEF preveem um custo médio por kWh de \$ 58 em 2030, o que deve incentivar mais investimentos na implementação de BESS em larga escala.

Ao escolher um BESS, vários fatores devem ser considerados como a plenitude do sistema e a disponibilidade dos subsistemas e equipamentos de apoio; a química, segurança e outras características da bateria; qualidade, disponibilidade e continuidade de suprimento dos componentes de hardware; e a confiabilidade do software. Portanto, o BMS desempenha um importante papel na performance geral do BESS já que ele será o responsável pela gestão de carga e descarga com segurança para as baterias.

Em comparação com as baterias primárias como as alcalinas, desenvolvidas para serem consumidas como qualquer outro consumível, uma bateria recarregável é desenvolvida para durar muito tempo. Entretanto, mesmo este tipo de bateria sofre degradação com o tempo e, inevitavelmente, todas as baterias terão sua vida útil terminando. Dependendo das características químicas, tamanho, configuração e propósito de operação, uma bateria pode realizar entre 500 e 10.000 ciclos completos de carga e descarga.

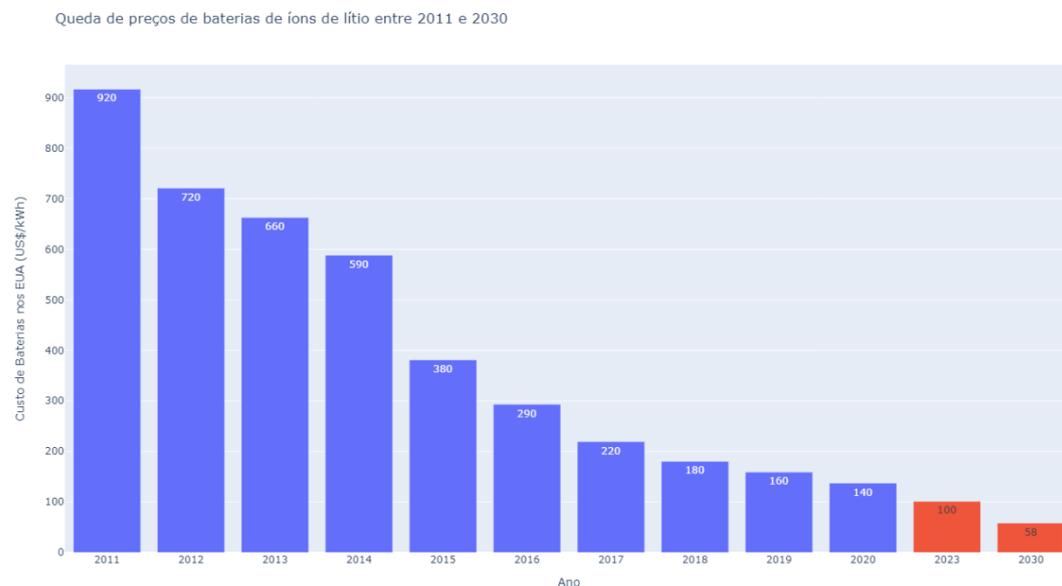


Figura 22: Queda de preços de baterias de íons de lítio entre 2011 e 2023 (Adaptado de Bloomberg NEF, 2020)

Em maio de 2020, a Receita Federal determinou que sistemas de armazenamento de energia deveriam ser classificados com os mesmos códigos de NCM (nomenclatura comum do Mercosul) das baterias utilizadas em sua construção. Entretanto a carga tributária para tais códigos é extremamente elevada. Para baterias de lítio, por exemplo, o tributo é de mais de 80%, o que torna o acesso à tecnologia no Brasil mais difícil.

Outro desafio é a necessidade de sistema de gerenciamento de baterias para monitoramento dos seus parâmetros, a fim de proteger a *storage* contra sobretensão, subtensão, sobrecorrente, elevação de temperatura evitando, assim, riscos de incêndio dentro do contêiner. O BMS também é imprescindível para a estimação do estado de carga (SOC) e o estado de saúde (SOH). É de extrema importância para a saúde das baterias que a temperatura do conjunto esteja controlada. Com o aumento da temperatura no ambiente do BESS, sua vida tende a reduzir. Além disso, os sistemas de armazenamento de energia por baterias podem impactar negativamente o meio ambiente.

Um grande desafio futuro é sobre o descarte das baterias. Como são equipamentos eletroquímicos, eles geram significativo impacto ambiental caso não tenham o devido tratamento. Visando minimizar o impacto negativo, uma opção para as baterias velhas seria reutilizá-las em aplicações que não exijam tanta potência e/ou confiabilidade, por exemplo em sistemas de iluminação ou reserva de energia para sistemas pequenos como motorhomes. Além da reutilização, é possível recondicionar ou reciclar as baterias. BESS construídos utilizando materiais reciclados requerem de 46% a 75% menos energia em relação àqueles construídos a partir de materiais virgens. No arquipélago da Madeira o projeto Porto Santo Fossil Free Island utiliza dois BESS que utilizam baterias de segunda vida. Essas baterias vieram de carros elétricos da Renault e não atendiam às demandas de um veículo elétrico, mas podem funcionar perfeitamente para uso estacionário como reguladores de tensão e estabilizadores de rede.

Como os tópicos anteriores destacaram, as inovações tecnológicas, redução de custos e aumento da penetração de geração renovável variável fomentou a utilização do BESS pelo mundo, mas inovações em políticas regulatórias e em modelos de mercado serão necessários para continuar um crescimento estável e sustentável da indústria de armazenamento de energia.

5. Regulamentação no Brasil

No Brasil, sistemas de armazenamento por baterias são normalmente aplicados em sistemas off-grid, onde não há paralelismo com a rede de eletricidade pública. Em mercados como o europeu, o americano e o asiático, é possível que a energia das baterias seja injetada na rede interligada, o que ajuda na confiabilidade de todo o sistema elétrico e na modicidade tarifária. Falta ainda em nosso país, regulamentações e regras para que as tecnologias de armazenamento de energia por bateria avancem. No entanto, visando tornar o Sistema Interligado Nacional (SIN) um ambiente propício para a integração de BESS na rede, uma série de medidas estão sendo tomadas por órgãos do setor elétrico.

Em 2020, a ANEEL abriu uma consulta pública de 90 dias para ouvir empresas e agentes do setor de energia sobre "adequações regulatórias necessárias" para fomentar a adoção desses sistemas. Em nota técnica divulgada sobre o assunto, a agência comenta que o desafio é adaptar a política setorial e a regulação para que seja possível aos detentores das tecnologias de armazenamento monetizar o serviço que prestam, contestando, competindo com, ou até funcionando de forma integrada com os recursos tradicionais de oferta e demanda. No processo de consulta, a ANEEL buscará entender em que condições empresas reguladas poderiam instalar, operar e manter ativos de armazenamento como esses e como tais recursos poderiam ser considerados nos estudos de planejamento da expansão dos sistemas de geração e transmissão.

Em 2022 saíram três documentações a respeito do armazenamento de energia. A primeira delas foi a Portaria nº 140 em 21 de março no Diário Oficial da União, elaborada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), que aprova o regulamento técnico da qualidade e os requisitos de avaliação da conformidade para equipamentos de geração, condicionamento e armazenamento de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. Neste documento é apresentado o regulamento técnico da qualidade para os equipamentos anteriormente citados. São apresentados os requisitos gerais e técnicos.

Em maio deste ano foi apresentado o Projeto de Lei (PL) nº 1224/2022 que dispõe acerca da atividade de armazenamento de energia no âmbito do SIN. Pelo projeto, o armazenador poderá ser um agente que disponha de instalações de armazenamento ou um agregador de armazenamento que represente vários agentes. A geração terá que vir obrigatoriamente de fonte renovável variável. A atividade será exercida por meio de autorização do poder público. Empreendimentos com potência menor ou igual a 5.000 kWp serão dispensados da outorga, devendo apenas ser comunicados ao poder concedente. O PL estabelece também que a capacidade das instalações de armazenamento não poderá superar a do sistema gerador, em kWp. De acordo com o artigo 5º do referido projeto de lei, instalações que injetarem energia no sistema fora de horário previsto em regulamentação ou dentro do horário de tarifa verde serão multadas.

Há uma questão tributária que impossibilita a venda de energia por pessoas físicas. Atualmente, os sistemas de geração distribuída, que são utilizados na energia solar conectados à rede elétrica, ganham créditos que podem ser descontados na tarifa energética que não recebem ICMS. O artigo 6º do Projeto de Lei supracitado diz que a energia injetada em kWh na rede, no horário determinado pela ANEEL, se transformará em créditos kWh podendo ser resgatados em até 5 anos devendo ser utilizado em horários de carga leve.

Ainda em maio, a Nota Técnica nº 033/2022-SRD/ANEEL apresentou a avaliação técnica de mais de 2.000 contribuições enviadas por 63 agentes e consumidores no período de 24 de junho a 24 de setembro de 2021. Dentre as propostas analisadas, o armazenamento de energia não limitado às regras de micro e minigeração distribuída (MMGD) e medidas para incentivar o carregamento de veículos elétricos na rede em horários que não impactem o sistema elétrico, assim como a injeção da energia armazenada na bateria do veículo.

A partir das sugestões enviadas, a ANEEL constatou que a inserção de recursos energéticos distribuídos já é uma realidade no país, com mais de 10,9 gigawatts (GW) de potência instalada de micro ou minigeração distribuída (98% da fonte solar fotovoltaica). Sistemas de armazenamento distribuído, veículos elétricos, microrredes, usinas virtuais e programas de resposta da demanda em breve estarão instalados no país, o que demanda uma preparação do sistema de distribuição para operar nessas condições com segurança, confiabilidade e menor custo para os consumidores.

6. Conclusão

Nos últimos 10 anos houve uma expansão expressiva da penetração de fontes renováveis variáveis na matriz de geração do mundo inteiro. Com o avanço da tecnologia, os custos de implementação de projetos de ERV se tornou cada vez menor, proporcionando uma transição energética com projeção de 85% da participação de fontes renováveis em 2050. Entretanto a geração renovável variável não permite que se controle o recurso, apresentando desafios para a estabilidade e confiabilidade da rede por conta de sua volatilidade. Com tamanha variabilidade, o setor elétrico precisa estar preparado para aproveitar ao máximo as oportunidades que a geração renovável pode oferecer.

Os sistemas de armazenamento de energia por bateria (BESS) são soluções tecnológicas avançadas que permitem o armazenamento de energia em muitos modos para uso posterior. Os benefícios do BESS incluem a eficiência energética, economia e auxilia na descarbonização da operação do sistema elétrico ao se reduzir a necessidade de utilização de fontes fósseis. Dada a possibilidade que o fornecimento de energia pode sofrer flutuações devido ao clima, blecautes ou indisponibilidade de equipamentos, os sistemas a bateria são vitais para instalações comerciais e residenciais alcançarem um fornecimento de energia contínuo.

Ao redor do mundo, empreendimentos de armazenamento de energia por baterias se aproveitam de seus benefícios para otimização da operação, redução de custos e aumento da confiabilidade do

sistema. Além destes, outros benefícios que o BESS pode proporcionar são o deslocamento de carga para melhor utilização quando a demanda é maior ou aproveitar arbitragem de preços, criação de usinas virtuais que são capazes de auxiliar no controle de frequência e tensão da rede diminuindo a oneração de ativos de geração, integração com fontes de energia renovável variável garantindo suavidade nas curvas de potência e sua continuidade no caso de indisponibilidade de potência por parte de ERV.

Apesar de seus benefícios, a utilização de BESS também traz seus desafios. Uma das principais preocupações é com o monitoramento das baterias para que não haja aumento excessivo de temperatura, sobrecarga ou sobretensão a fim de se evitarem incêndios. O alto custo de implementação de BESS é outro fator que dificulta a sua entrada em países como o Brasil, especialmente devido a tributações impostas pelos órgãos federais, o que aumenta ainda mais o custo agregado a este tipo de equipamento.

Órgãos como ANEEL e INMETRO junto a agentes do setor elétrico brasileiro têm trazido contribuições e documentos visando preparar o SIN para uma projeção de expansão das instalações de BESS nos próximos 20 anos. Para isso, é necessário que políticas regulatórias sejam desenvolvidas e que seja fomentado o incentivo ao mercado para aumentar o acesso à implantação de BESS em ativos de geração solar e eólica.

7. Referências

- [1] Bloom, A., Helman, U., Holttinen, H., Summers, K., Bakke, J., Brinkman, G., & Lopez, A. (2017). It's Indisputable: Five Facts About Planning and Operating Modern Power Systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, 15(6), 22-30.
- [2] Ogimoto, K., & Wani, H. (2020). Making Renewables Work: Operational Practices and Future Challenges for Renewable Energy as a Major Power Source in Japan. *IEEE Power and Energy Magazine*, 18(6), 47-63.
- [3] Mehr, V., Kahrobaee, S., & Avendano, M. (2021). Harnessing the Full Potential of Clean Energy: The Role of Southern California's Utility Distributed Energy Resource Pilots. *IEEE Power and Energy Magazine*, 19(4), 28-40.
- [4] D. Stenclik, P. Denholm and B. R. Chalamala, "The Role of Energy Storage for Renewable Integration," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 15, no. 6, pp. 31–39, 2017.
- [5] IRENA (2019), *Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [6] IRENA (2017), *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [7] Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2022) - "Energy". *OurWorldInData.org*. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy>
- [8] Key Developments in the History of Gravity Dams. Disponível em: https://sethna.lassp.cornell.edu/SimScience/cracks/advanced/grav_hist1.html
- [9] The Voltaic Pile, MIT Libraries. Disponível em: <https://libraries.mit.edu/collections/vail-collection/topics/electricity/the-voltaic-pile/>
- [10] Longo, Luca. Storia delle batterie al litio. Disponível em: <https://www.eni.com/it-IT/tecnologie/batteria-litio-funzionamento.html>
- [11] Correia, Tiago de B., (2020), *Sistemas de Energia do Futuro: Soluções regulatórias para redução ou limitação da geração na operação de tempo real*.
- [12] How does a lithium-Ion battery work, Let's Talk Science. Disponível em: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/how-does-a-lithium-ion-battery-work>
- [13] Campos, Felipe M., et al (2022), *Tecnologias e Aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia para Suporte à Integração de Fontes Renováveis no Brasil*. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis, Brasil.
- [14] STA – Sistemas de Tecnologia Aplicada: Como Funciona Uma Bateria de Lítio Íon. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/como-funciona-uma-bateria-de-litio-ion>
- [15] Can you recycle an old EV battery? DW Planet A. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=PbOBmnZRpZ4>
- [16] ONS, 2ª Reunião Técnico Gerencial do ONS em 2022, Sessão Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=HX12IuyriH0>

- [17] Políticas Públicas devem estimular o mercado de baterias e armazenamento no Brasil, ABSOLAR, 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/politicas-publicas-devem-estimular-o-mercado-de-baterias-e-armazenamento-no-brasil/>
- [18] Badra, Mateus. Armazenamento de energia no Brasil: o que falta para decolar? Canal Solar. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/armazenamento-de-energia-no-brasil-o-que-falta-para-decolar/>
- [19] Frequency Regulation, Energy Storage Association. Disponível em: <https://energystorage.org/frequency-regulation/>
- [20] EPE (2019), Sistemas de Armazenamento em Baterias: Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento, Ministério de Minas e Energia, Brasil.
- [21] Silva, Rogério Diogne de Souza e, Utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias no Setor Elétrico e as Perspectivas para o Brasil, IPEA, 2021.
- [22] Cantane, Daniel A., Ando Junior, Oswaldo H., Hamerschmidt, Márcio B., Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro. Editora Scienza, 2020 – São Carlos - SP, Brasil.
- [23] Juvenal, Waleska K. G., Análise de Apuração do Montante de Uso do Sistema de Transmissão para Agentes de Geração Eólica com Base em Dados Reais, 2019, Florianópolis, Brasil.
- [24] CPFL entrega cinco sistemas de armazenamento de energia. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/armazenamento/cpfl-entrega-cinco-sistemas-de-armazenamento-de-energia>
- [25] Tessmer Hax, Gláucio R., Treinamento Banco de Baterias Conectado à Rede Elétrica e à Geração Eólica, CPFL, 2020.
- [26] Zhang, Yingchen, et al, (2017). Grid-Level Application of Electrical Energy Storage. IEEE Power and Energy Magazine.
- [27] Solovev, A., Petrova, A., (2021), Efficient Energy Management and Energy Saving with a BESS (Battery Energy Storage System). Disponível em: <https://www.integrasources.com/blog/energy-management-and-energy-saving-bess/>
- [28] Energy Storage Technologies. History of Grid-Scale. Disponível em: <https://energystorageforum.com/energy-storage-technologies/history-grid-scale-energy-storage>
- [29] Hornsdale Power Reserve. Disponível em: <https://hornsdalepowerreserve.com.au/>
- [30] Leite, L. H. M., et al. Impactos de um Sistema de Armazenamento de Energia de 1 MW na Rede de Distribuição de 13,8 kV – Desafios Técnicos, Econômicos e Regulatórios. XXV SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2019, Belo Horizonte – MG, Brasil.
- [31] ANEEL aprova 23 propostas no P&D sobre armazenamento de energia. Disponível em: <https://www.abragel.org.br/aneel-aprova-23-propostas-no-pd-sobre-armazenamento-de-energia/>
- [32] ANEEL está de olho nas tecnologias de baterias e armazenamento de energia. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-renovavel/aneel-esta-de-olho-nas-tecnologias-de-baterias-e-armazenamento-de-energia.html>
- [33] Battery Energy Storage Systems Can Be Recycled. Clean Energy States Alliance.

[34] Melin, Hans Eric. The lithium-ion battery end-of-life market – A baseline study. Global Battery Alliance.

[35] Energy Storage is a \$620 Billion Investment Opportunity to 2040. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/energy-storage-620-billion-investment-opportunity-2040/>

[36] Rosado, Beto. Projeto de Lei n.1224/2022. Atividade de armazenamento de energia no âmbito do Sistema Interligado Nacional (SIN).

[37] ANEEL, 2022. Nota Técnica nº 0033/2022-SRD/ANEEL, Análise das contribuições recebidas na Tomada de Subsídios no 11/2021 sobre propostas de modelos regulatórios para a inserção de recursos energéticos distribuídos, incluindo resposta da demanda, usinas virtuais e microrredes.

[38] INMETRO, 2022. Portaria Nº 140, de 21 de março de 2022. Aprovação do Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Equipamentos de Geração, Condicionamento e Armazenamento de Energia Elétrica em Sistemas Fotovoltaicos - Consolidado.

[39] Costa, T., et al. Estudo sobre o Mercado Brasileiro de BESS para o Setor Elétrico. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada. 2023.

[40] Utility-Scale Battery Storage. NREL. Disponível em: https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale_battery_storage