



Manual de Boas Práticas em Sistemas de Armazenamento de Energia

Lições aprendidas e recomendações

Como empresa federal de utilidade pública, a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH apoia o Governo Federal da Alemanha em seus objetivos na área de cooperação internacional.

Publicado por: Projeto Sistemas de Energia do Futuro

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

| | |
|--|--|
| Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Sede social SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1501, 15 andar, Ed. Brasília Trade Center. CEP 70711-902, Brasília-DF, Brasil Telefone: (61) 2101-2170 www.giz.de/brasil | Ministério de Minas e Energia (MME) Esplanada dos Ministérios, Bloco U Brasília/DF CEP: 70065-900 Telefone: (61) 2032-5555 www.gov.br/mme |
|--|--|

Coordenação técnica e revisão

Ministério de Minas e Energia (MME)

Alexandra Albuquerque
Lívio Teixeira
Samira Souza

GIZ

Daniel Almarza
Fabian Laudien
Vitor Peixoto de Souza
Helena Coutinho
África Aires
Renata Bennet
Carolina Marcusse

Elaboração da publicação – Corpo Técnico

NewCharge

Markus Vlasits
Guilherme Galvão Nizoli
Kevin Koji Hattori

Fotografia da Capa

© GIZ / James Ochweri

O projeto Sistemas de Energia do Futuro integra a Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável e é implementado pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e pelo Ministério de Minas e Energia com recursos do Ministério Federal da Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha.

Brasília, julho de 2025.

RESUMO

Este Manual de Boas Práticas, realizado no âmbito do Projeto Sistemas de Energia do Futuro III da GIZ em parceria com o MME e, elaborado pela NewCharge Energy, vem com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de novos projetos de sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil.

Este documento foca em projetos “atrás do medidor” em consumidores comerciais e indústrias, bem como aborda sinergias de implementação no âmbito do Programa de Eficiência Energética (PEE), regulado pela ANEEL. Contudo, também é apresentado um estudo de caso de projeto utilizando recurso próprio. Além disso, relata aprendizados e metodologias que poderão ser seguidos em projetos futuros.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Novas Instalações de Sistemas de Armazenamento de Energia Realizadas | 9 |
| Figura 2 - Capacidade Instalada de BESS no Brasil em meados de 2023 | 10 |
| Figura 3 - Torre de GES na cidade de Arbedo-Castione na Suíça..... | 14 |
| Figura 4 - Esquema de conexão do Flywheel no rotor de Motor/Gerador..... | 15 |
| Figura 5 - Modelo de UHR com reservatórios superior e inferior..... | 18 |
| Figura 6 - Modelo de funcionamento de uma bateria de fluxo de vanádio. | 21 |
| Figura 7 - Exemplificação de funcionamento de uma célula de hidrogênio..... | 23 |
| Figura 8 - Representação gráfica de ciclos de carga e descarga de uma bateria de íons de lítio. | |
| | 25 |
| Figura 9 - Visualização da aplicação do 'load shifting'..... | 30 |
| Figura 10 - Diferencial tarifário Ponta e Fora Ponta 2023. | 31 |
| Figura 11 - Visualização da aplicação do 'peak shaving'..... | 31 |
| Figura 12 - Gráfico de consumo horário (Máximo, Mínimo e Médio) da unidade consumidora. | |
| | 36 |
| Figura 13 - Gráfico de comparativo de dia de maior geração fotovoltaica com relação ao consumo da unidade no mesmo dia..... | 37 |
| Figura 14 - Fórmula básica do cálculo de LCOE de um projeto..... | 48 |

Lista de Abreviaturas

- ACR - Ambiente de Contratação Regulado
- ACL - Ambiente de Contratação Livre
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- BESS - *Battery Energy Storage System* (Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias)
- BMZ - Ministério Federal da Cooperação Econômica e do Desenvolvimento da Alemanha
- CA - Corrente Alternada
- CAPEX - *Capital Expenditure* (Investimento em Capital)
- CC - Corrente Contínua
- CEE - Custo Unitário da Energia
- CED - Custo Unitário da Demanda
- DoD - *Depth of Discharge* (Profundidade de Descarregamento)
- EE - Energia Anual Economizada
- EMS - *Energy Management System* (Sistema Supervisório / SGE – Sistema de Gestão de Energia)
- EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas
- FC - Fluxo de Caixa
- FV - Fotovoltaico(a)
- GD - Geração Distribuída
- GES - *Gravity Energy Storage* (Armazenamento de Energia por Gravidade)
- GIZ - *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*
- HFP - Horário Fora de Ponta
- HP - Horário de Ponta
- LCOE - *Levelized Cost of Energy* (Custo Nivelado de Energia)
- M&V - Medição e Verificação
- MDO - Mão de Obra
- MME - Ministério de Minas e Energia
- MMGD - Microgeração ou Minigeração Distribuída
- O&M - Operação e Manutenção
- P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
- PEE - Programa de Eficiência Energética
- PROPEE - Procedimentos do Programa de Eficiência Energética

RCB - Relação Custo-Benefício

RDP - Redução de Demanda na Ponta

RTE - *Round Trip Efficiency* (Eficiência de Ciclo Completo)

SAE - Sistema de Armazenamento de Energia

SCEE - Sistema de Compensação de Energia Elétrica

SELIC - Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (Taxa básica de juros da economia brasileira)

SIGFI - Sistemas Individuais de Geração com Fontes Intermitentes

SLA - *Service Level Agreement* (Acordo de Nível de Serviço)

SMES - Supercondutores Magnéticos de Energia

SOC - *State of Charge* (Estado de Carga)

SOH - *State of Health* (Estado de Saúde da Bateria)

TIR - Taxa Interna de Retorno

TUSD - Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

UC - Unidade Consumidora

UHR - Usina Hidrelétrica Reversível

VPL - Valor Presente Líquido

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 9 |
| 1.1. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO MUNDO..... | 9 |
| 1.2. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO BRASIL..... | 10 |
| 1.3. A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA..... | 10 |
| 1.4. PÚBLICO-ALVO | 11 |
| 2. OBJETIVOS..... | 11 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 12 |
| 3. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA – SAE | 12 |
| 3.1. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS ATUALMENTE DISPONÍVEIS..... | 13 |
| 3.1.1. <i>Armazenamento por gravidade</i> | 13 |
| 3.1.2. <i>Flywheel</i> | 15 |
| 3.1.3. <i>Armazenamento por Usinas Reversíveis</i> | 17 |
| 3.1.4. <i>Supercapacitores e Supercondutores</i> | 19 |
| 3.1.5. <i>Baterias de Fluxo</i> | 21 |
| 3.1.6. <i>Célula de Combustível - Hidrogênio</i> | 22 |
| 3.1.7. <i>Baterias Eletroquímicas</i> | 24 |
| 3.2. PRINCIPAIS CRITÉRIOS DE ESCOLHA..... | 27 |
| 4. BESS (BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM)..... | 29 |
| 4.1. O QUE É? | 29 |
| 4.2. FUNCIONALIDADES | 29 |
| 4.2.1. <i>Deslocamento do consumo (load shifting)</i> | 29 |
| 4.2.2. <i>Corte de pico de demanda (peak shaving)</i> | 31 |
| 4.2.3. <i>Back-up de energia</i> | 32 |
| 4.2.4. <i>Grid-zero</i> | 33 |
| 5. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE DE PROJETOS | 34 |
| 5.1. ESTUDO DE CASO: BESS NO GRUPO A | 34 |
| 5.1.1. <i>Análise de Viabilidade de Implementação com Recurso de PEE</i> | 39 |
| 5.1.2. <i>Análise de Viabilidade de Implementação com Recurso Próprio</i> | 43 |
| 6. DIMENSIONAMENTO DO BESS: PONTOS DE ATENÇÃO | 45 |
| 6.1. REQUISITOS DE POTÊNCIA E CAPACIDADE | 45 |
| 6.2. PERFIL DE USO DO SISTEMA..... | 46 |
| 6.3. RESTRIÇÃO DE ESPAÇO E DESAFIOS LOGÍSTICOS | 47 |
| 6.4. REQUISITOS DO SISTEMA SUPERVISÓRIO | 47 |
| 6.5. OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DO DIMENSIONAMENTO | 48 |
| 7. PRINCIPAIS CUIDADOS NA ESCOLHA DE FORNECEDORES: BOAS PRÁTICAS | 49 |
| 7.1. SUPORTE TÉCNICO | 49 |
| 7.2. PRAZOS DE ENTREGA E DE ATENDIMENTO | 51 |
| 7.3. PEÇAS SOBRESSALENTES | 51 |
| 7.4. ESTRATÉGIAS DE REPOSIÇÃO DA DEGRADAÇÃO (AUGMENTATION) | 52 |
| 7.5. PREÇO GLOBAL | 52 |
| 7.6. HISTÓRICO DE PROJETOS | 53 |
| 7.7. INSTALAÇÃO E COMISSIONAMENTO | 53 |
| 7.8. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO | 54 |
| 7.8.1. <i>Medição e verificação de parâmetros operativos</i> | 54 |
| 7.8.2. <i>Principais rotinas de O&M</i> | 56 |
| 7.9. GESTÃO DE RESÍDUOS E DESCARTE DO SAE | 57 |
| 8. PROCEDIMENTOS E EXIGÊNCIAS TÉCNICAS PARA CONEXÃO ELÉTRICA DE BESS | |
| 58 | |

| | | |
|--------------------------|--|-----------|
| 8.1. | DEFINIÇÃO DE REQUISITOS TÉCNICOS PARA CONEXÃO..... | 58 |
| 8.2. | ATENDIMENTO A NORMAS TÉCNICAS INTERNACIONAIS | 58 |
| 8.3. | PRAZOS E CONFORMIDADES..... | 60 |
| REFERÊNCIAS | | 61 |

1. INTRODUÇÃO

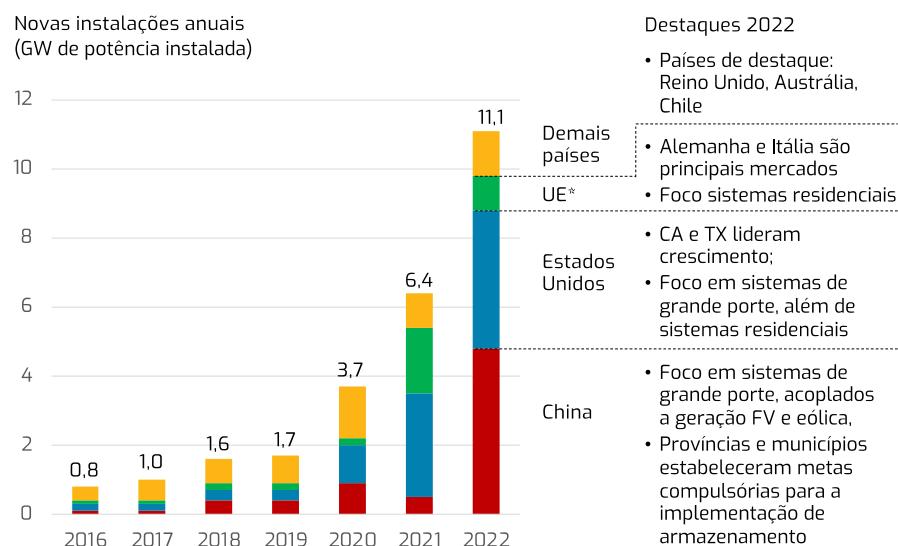
1.1. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO MUNDO

A indústria global de armazenamento de energia está em ascensão, com projeções indicando um crescimento anual de 27% até 2030, atingindo adições anuais de 110 GW/372 GWh (BloombergNEF). Esse avanço é impulsionado por investimentos governamentais e uma onda de novos projetos, com destaque para a China, que se consolida como o maior mercado de armazenamento de energia do mundo (LANE, 2022).

As tecnologias predominantes atualmente são as baterias de íon de lítio. No entanto, observa-se um interesse crescente em alternativas para armazenamento de longa duração, ainda que estas apresentem limitações (SPITTHOFF; SHEARING; BURHEIM, 2021). Sistemas de armazenamento têm demonstrado viabilidade para implantação em larga escala, especialmente em países como Estados Unidos e China, que investem significativamente desde 2016 (CCEE, 2023).

Em um levantamento recente, só em 2022 foram instalados cerca de 11,1 GW de capacidade de armazenamento em todo o mundo, conforme apresentado na Figura 1. Além disso, os Estados Unidos almejam alcançar 100 GW, enquanto o Reino Unido tem como meta instalar cerca de 1,5 GW por ano até 2030 (BOWERS; FASCHING; ANTONIO, 2023).

Figura 1 - Novas Instalações de Sistemas de Armazenamento de Energia Realizadas



Fonte: IEA, Bloomberg, 2023.

1.2. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO BRASIL

No Brasil, o avanço da instalação de sistemas de armazenamento de energia elétrica (BESS) ainda encontra barreiras significativas, tanto em termos econômicos quanto regulatórios (ANEEL, 2012). De acordo com levantamento recente da NewCharge (2023), a capacidade instalada total de sistemas BESS no país é de apenas **208 MWh**, o que evidencia um cenário incipiente, especialmente quando comparado aos volumes globais.

Como demonstrado no gráfico da Figura 2, cerca de **84%** dessa capacidade está concentrada em **projetos SIGFI** (Sistemas Individuais de Geração com Fontes Intermitentes) e em **projetos “em frente ao medidor”**, caracterizados por sua atuação em larga escala, prestando serviços diretamente ao sistema elétrico (GREENER; NEWCHARGE, 2021).

Figura 2 - Capacidade Instalada de BESS no Brasil em meados de 2023



Fonte: NewCharge, 2023.

Nesse contexto, os **projetos “atrás do medidor”** surgem como uma alternativa estratégica promissora. Ainda que em estágio inicial, esse tipo de aplicação possui alto potencial de crescimento, especialmente diante da expansão dos serviços que o armazenamento de energia elétrica pode oferecer ao setor.

1.3. A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O crescimento das fontes renováveis, como solar e eólica, amplia significativamente a importância dos Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) para a rede elétrica. Essas fontes

são intermitentes por natureza, o que significa que a geração de energia pode variar ao longo do dia e das estações, tornando a gestão da oferta e demanda mais complexa (ABSOLAR, 2023).

Para mitigar esses desafios, os SAE desempenham um papel essencial no equilíbrio do sistema elétrico. Eles armazenam o excedente energético nos períodos de alta geração e o liberam quando a produção cai, garantindo uma rede mais estável e um fornecimento **contínuo e confiável** (EA TECHNOLOGY, 2014).

1.4. PÚBLICO-ALVO

O Manual de Boas Práticas para Sistemas de Armazenamento de Energia é direcionado a uma variedade de atores no setor energético, como distribuidoras de energia, tomadores de decisão em empresas, empresas de engenharia, consultores e técnicos de energia, engenheiros, estudantes e pesquisadores.

Esta abrangência ajuda a garantir que diferentes partes interessadas estejam bem-informadas sobre as nuances técnicas, operacionais e regulatórias do armazenamento de energia.

2. OBJETIVOS

Este manual tem como objetivo fornecer uma base sólida para o desenvolvimento de projetos de armazenamento de energia, com foco especial em clientes comerciais e industriais inseridos no contexto do Programa de Eficiência Energética (PEE), regulado pela ANEEL. Ao longo do documento, são abordados aspectos técnicos e econômicos essenciais para a escolha de sistemas de armazenamento de energia do tipo "Atrás do Medidor", oferecendo subsídios práticos e conceituais para decisões mais eficazes.

Além disso, busca-se estabelecer sinergias com outras iniciativas de eficiência energética, de modo a orientar e potencializar futuras implementações no setor elétrico. A proposta é não apenas facilitar a integração de novas tecnologias, mas também fomentar a inovação em projetos energéticos sustentáveis.

Por fim, a disseminação das melhores práticas e dos aprendizados reunidos neste guia visa capacitar decisores, técnicos e engenheiros, incentivando a adoção de soluções que respondam às demandas energéticas imediatas e, ao mesmo tempo, contribuam para o desenvolvimento de uma infraestrutura energética mais resiliente e sustentável no Brasil.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desse manual:

- **Orientar:** Fornecer diretrizes claras e práticas para a escolha, dimensionamento e implementação de sistemas de armazenamento de energia.
- **Facilitar a Integração de Energias Renováveis:** Apoiar a integração eficaz de fontes de energia renovável, como a solar.
- **Apoiar a Tomada de Decisão:** Fornecer informações e ferramentas que auxiliem profissionais e empresas na definição de soluções tecnológicas adequadas para suas necessidades específicas, bem como na escolha de fornecedores.
- **Estabelecer Padrões de Qualidade:** Definir critérios técnicos e operacionais para assegurar a qualidade e a confiabilidade dos sistemas de armazenamento de energia, alinhando-se às melhores práticas internacionais e às normas técnicas vigentes.

3. Sistema de Armazenamento de Energia – SAE

Atualmente, um sistema de armazenamento de energia é compreendido como um conjunto de tecnologias capaz de reter energia elétrica, convertendo-a em outra forma armazenável, para posterior reconversão e uso. É importante destacar que a energia elétrica, em sua forma primária, não pode ser armazenada diretamente, sendo necessária sua transformação em formas alternativas como energia térmica, química, mecânica ou campos eletromagnéticos.

Dentre as principais tecnologias atualmente disponíveis no mercado, destacam-se:

- *Armazenamento de Gravidade;*
- *Armazenamento de Flywheel;*
- *Armazenamento por Usinas Reversíveis;*
- *Supercondutores e supercapacitores;*
- *Baterias de Fluxo;*
- *Armazenamento de Hidrogênio;*
- *Baterias de Íon-Lítio;*
- *Baterias de Sódio-Íon;*
- *Baterias de Estado Sólido;*
- *Armazenamento Térmico; e*
- *Armazenamento Biológico.*

Embora diversas opções estejam emergindo como alternativas promissoras em um mercado em plena expansão, é necessário observar que algumas tecnologias ainda se encontram em estágio inicial de desenvolvimento. Muitas delas enfrentam desafios relacionados à viabilidade técnica, eficiência energética, maturidade tecnológica e custos elevados de implementação em larga escala. Dessa forma, a adoção dessas tecnologias exige cautela, estudos aprofundados e análises de custo-benefício específicas para cada contexto.

3.1. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS ATUALMENTE DISPONÍVEIS

Armazenamento por gravidade

- *O que é?*

O Gravity Energy Storage (GES) é uma tecnologia de armazenamento de energia que utiliza a gravidade para armazenar energia elétrica em forma de energia potencial. Este método é baseado no conceito de armazenamento hidrelétrico bombeado, mas usa pesos maciços ao invés de água (LANE, 2022).

- *Como funciona*

O sistema GES opera içando grandes massas usando energia excedente, geralmente de fontes renováveis. Quando a energia é necessária, essas massas são abaixadas, e a energia potencial gravitacional é convertida de volta em energia elétrica (MOORE, 2021).

- *Principais aplicações*

GES é ideal para **balanceamento de rede, gerenciamento de demanda de pico e integração de fontes renováveis intermitentes**, como solar e eólica, fornecendo uma fonte confiável de energia de reserva (BERRADA; EMRANI; AMEUR, 2021).

- *Vantagens e Desvantagens*

| Aspecto | Vantagens | Desvantagens |
|---------------------|---|---|
| Vida útil | Longa vida útil. | |
| Custos operacionais | Baixos custos operacionais. | Necessita de significativo desenvolvimento tecnológico para comprovar sua eficácia e custo-efetividade. |
| Flexibilidade | Independência de condições geográficas específicas, ao contrário das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs). | - |
| Desenvolvimento | - | Requer desenvolvimento tecnológico significativo para comprovação de eficácia e custo-efetividade em comparação com outras tecnologias de armazenamento de energia. |

Alguns projetos que utilizam sistemas GES já estão em fase de testes e validação técnica e econômica em países como os Estados Unidos, diversas nações da Europa e a China. Um exemplo notável é a torre localizada na cidade de Arbedo-Castione, na Suíça (MOORE, 2021), ilustrada na Figura 3. Com 110 metros de altura, a estrutura foi desenvolvida com o objetivo de viabilizar estudos sobre a integração entre fontes de geração renovável e o armazenamento gravitacional, demonstrando seu potencial de aplicação em cenários energéticos sustentáveis.

Figura 3 - Torre de GES na cidade de Arbedo-Castione na Suíça.



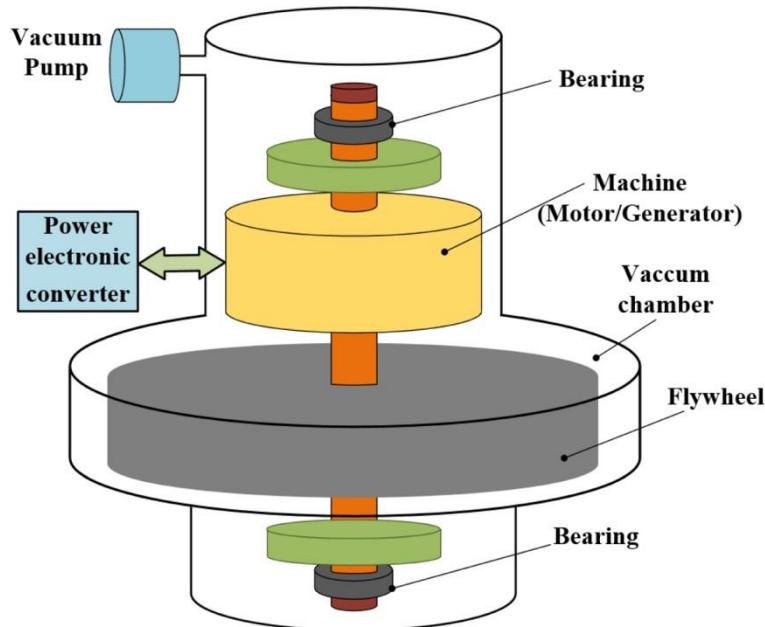
Fonte: Energy Vault, 2021

Flywheel

- O que é?

O *Flywheel*, representado na Figura 4, também conhecido como volante de inércia, é uma tecnologia de armazenamento de energia que se baseia na conservação da energia cinética.

Figura 4 - Esquema de conexão do Flywheel no rotor de Motor/Gerador



Fonte: ScienceDirect, 2022

- Como funciona

O sistema consiste em um disco ou cilindro que gira em alta velocidade para armazenar energia em forma de movimento rotacional, que pode ser convertida de volta em energia elétrica (MADEIRAS, 2015). Quando a energia é necessária, o movimento do rotor é desacelerado por um sistema de geração que converte a energia cinética de volta em energia elétrica (CARMO; TATIZAWA, 2019).

Os sistemas modernos de *Flywheel* geralmente utilizam mancais magnéticos para minimizar o atrito e maximizar a eficiência energética (ZHANG et al., 2022).

- *Principais aplicações*

Flywheels são utilizados principalmente para aplicações que exigem **alta potência por períodos curtos**. Isso inclui **estabilização da frequência** em redes elétricas, onde eles ajudam a manter a qualidade da energia ao responder rapidamente a flutuações de demanda.

Também são usados para fornecer **energia de backup de curto prazo** para instalações críticas, como data centers e hospitais, onde a confiabilidade do fornecimento de energia é crucial (ZHANG et al., 2022).

- *Vantagens e Desvantagens*

Entre as vantagens dos sistemas de armazenamento *Flywheel* estão sua alta eficiência, resposta rápida, longa vida útil e baixa degradação ao longo do tempo. Essa tecnologia não depende de produtos químicos ou materiais tóxicos, o que a torna uma opção mais amigável ao meio ambiente (DANIEL; POLASEK, 2014).

Entretanto, as desvantagens incluem sua capacidade limitada de armazenar energia por longos períodos devido a perdas por atrito, bem como os altos custos iniciais associados à tecnologia de ponta necessária para seu funcionamento eficiente (MADEIRAS, 2015). Além disso, devido à alta velocidade e energia armazenada, os sistemas de *Flywheel* podem representar riscos significativos em caso de falhas mecânicas, como a desintegração do rotor, que pode liberar energia de forma explosiva.

| Aspecto | Vantagens | Desvantagens |
|--------------------------|--|--|
| Eficiência | Alta eficiência. | Limitada capacidade de armazenar energia por longos períodos devido a perdas por atrito. |
| Resposta | Resposta rápida. | Altos custos iniciais associados à tecnologia de ponta. |
| Vida útil | Longa vida útil e baixa degradação ao longo do tempo. | Riscos significativos em caso de falhas mecânicas, como a desintegração do rotor, que pode liberar energia de forma explosiva. |
| Impacto Ambiental | Não dependem de produtos químicos ou materiais tóxicos, sendo mais amigáveis ao meio ambiente. | - |
| Custos | - | Altos custos iniciais. |
| Segurança | - | Possíveis riscos devido à alta velocidade e energia armazenada. |

Armazenamento por Usinas Reversíveis

- *O que é?*

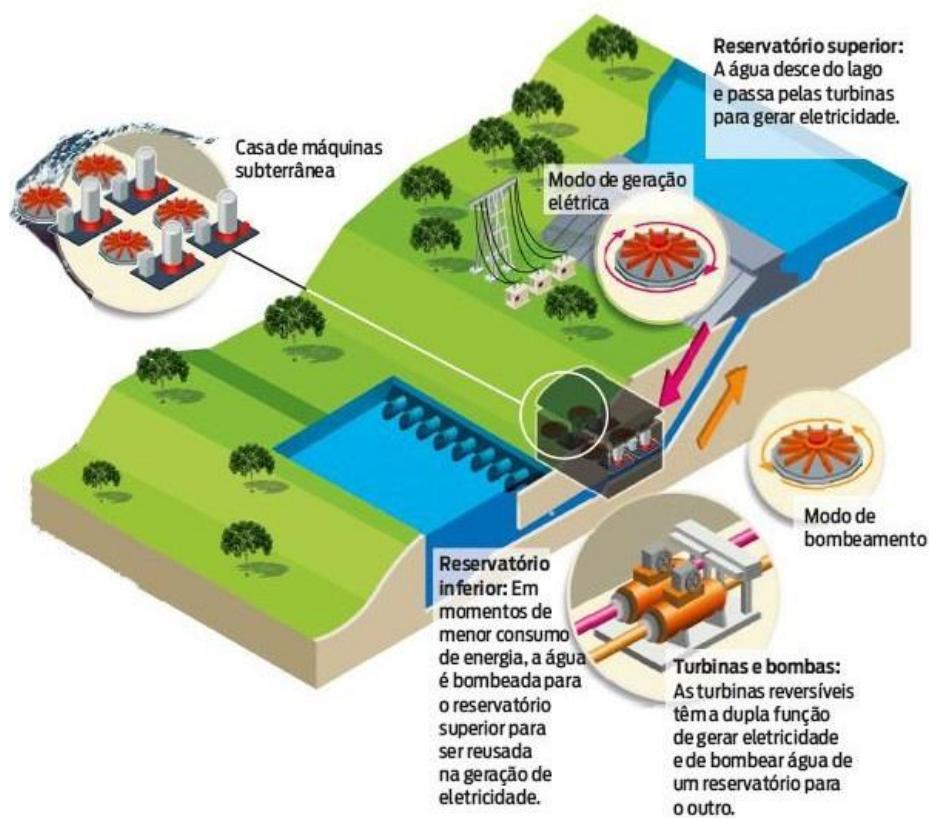
Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs), também conhecidas como sistemas de armazenamento hidrelétrico por bombeamento, são instalações que usam a diferença de altitude entre dois reservatórios para armazenar e gerar energia. Esses sistemas são considerados a maior e mais madura tecnologia de armazenamento de energia em escala de utilidade pública, representando mais de 94% da capacidade de armazenamento de energia instalada globalmente (CASTRO et al., 2018).

- *Como funciona*

As UHRs, como representado na Figura 5, operam bombeando água de um reservatório inferior para um superior durante períodos de baixa demanda e preços de energia elétrica mais baixos. Quando a demanda é alta e os preços da energia aumentam, a água é liberada de volta para o reservatório inferior, passando por turbinas que geram eletricidade.

Este processo não só permite armazenar energia potencial como também ajuda a equilibrar a carga na rede, fornecendo energia durante os picos de demanda (CANALLES et al., 2015).

Figura 5 - Modelo de UHR com reservatórios superior e inferior



Fonte: SENGE-PI, 2020

- **Principais aplicações**

As principais aplicações das UHRs incluem **a estabilização da rede elétrica, fornecendo reserva de energia, controle de frequência e regulação de tensão**.

Essas usinas são especialmente valiosas em sistemas elétricos que dependem fortemente de energias renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, pois podem armazenar o excesso de energia gerado e liberá-lo conforme necessário para manter a estabilidade e a confiabilidade da rede (CASTRO et al., 2018).

- **Vantagens e Desvantagens**

| Aspecto | Vantagens | Desvantagens |
|------------------------------------|---|--|
| Capacidade de Armazenamento | Alta capacidade de armazenamento, eficaz para integrar fontes de energia renováveis. | - |
| Serviços de Rede | Oferece controle de frequência e reserva de energia, essenciais para a estabilidade da rede elétrica. | - |
| Vida Útil | Longa vida útil, que suporta operações prolongadas sem necessidade de substituição frequente. | - |
| Dependência Geográfica | - | Necessita de condições geográficas específicas para a viabilidade, limitando locais de implementação. |
| Impacto Ambiental | - | Requer grandes reservatórios, causando impacto ambiental significativo. |
| Custos de Construção | - | Custos elevados de construção e manutenção. |
| Eficiência Energética | Uma das opções mais eficientes de armazenamento de energia. | Perdas de energia durante o bombeamento e a liberação de água, reduzindo a eficiência global do sistema. |

Supercapacitores e Supercondutores

- **O que é?**

Supercapacitores, também conhecidos como capacitores eletroquímicos de dupla camada, são dispositivos de armazenamento de energia que armazenam energia elétrica através da separação de cargas em uma interface eletrodo-eletrolito.

Supercondutores magnéticos de energia (SMES), por outro lado, utilizam propriedades de supercondutividade para armazenar energia em campos magnéticos gerados por correntes elétricas em bobinas supercondutoras (FERREIRA et al., 2012).

- *Como funciona*

Supercapacitores armazenam energia utilizando uma camada dupla formada na interface entre o eletrodo sólido e o eletrólito. Esta camada funciona como um dielétrico, enquanto o eletrodo e o eletrólito atuam como placas de capacitor, permitindo alta densidade de energia. SMES armazena energia na forma de um campo magnético criado pelo fluxo de corrente contínua em uma bobina supercondutora, que é resfriada abaixo de sua temperatura crítica para alcançar a supercondutividade e, assim, eliminar resistência elétrica (OLIVEIRA, 2010).

- *Principais aplicações*

Supercapacitores são frequentemente utilizados em aplicações que requerem **rápidas absorções e liberações de energia**, como em veículos elétricos para regeneração de energia durante frenagens e em dispositivos eletrônicos portáteis para garantir estabilidade de potência.

Em sistemas de rede elétrica, eles têm aplicação para **estabilização de energia, controle de qualidade de energia e suporte em aplicações que exigem liberações rápidas de energia** durante picos de demanda ou falhas (DANIEL; POLASEK, 2014).

- *Vantagens e Desvantagens*

| Aspecto | Vantagens | Desvantagens |
|--------------------------------------|---|--|
| Taxa de Carga e Descarga | Alta taxa de carga e descarga, permitindo operações rápidas. | - |
| Vida Útil e Robustez | Longa vida útil e robustez contra variações de temperatura. | - |
| Densidade Energética | - | Menor densidade energética em comparação com baterias convencionais. |
| Custo | - | Custos iniciais e operacionais elevados para Supercapacitores. |
| Eficiência e Resposta | SMES oferece alta eficiência e resposta rápida a flutuações de demanda. | - |
| Manutenção e Operação de SMES | - | Necessita de resfriamento intensivo e enfrenta desafios técnicos no armazenamento de energia em larga escala e manutenção técnica. |

Baterias de Fluxo

- *O que é?*

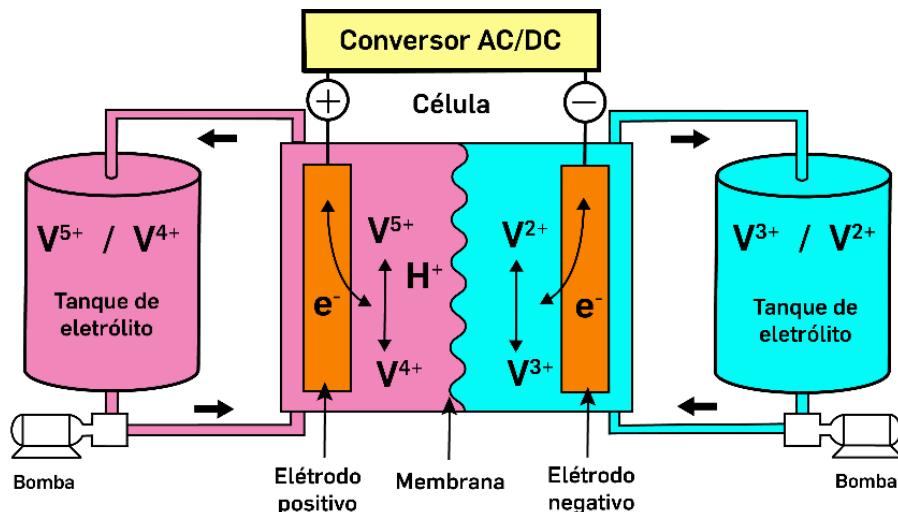
Baterias de fluxo são sistemas de armazenamento de energia eletroquímica que utilizam eletrólitos líquidos armazenados em tanques externos para gerar energia. A energia é armazenada e liberada através de processos de oxidação-redução (redox) entre dois eletrólitos líquidos separados por uma membrana.

- *Como funciona*

Nas baterias de fluxo, como o apresentado na Figura 6, os eletrólitos são bombeados de seus reservatórios para a célula eletroquímica onde, separados por uma membrana semipermeável, permitem trocas iônicas que geram fluxo elétrico.

A capacidade de energia é determinada pela quantidade de eletrólito nos tanques, enquanto a potência é determinada pela área da célula que facilita a reação redox. As baterias de fluxo de vanádio, por exemplo, utilizam vanádio em diferentes estados de oxidação para armazenar energia de forma eficaz (MOORE et al., 2012).

Figura 6 - Modelo de funcionamento de uma bateria de fluxo de vanádio.



Adaptado de Vanadium Redox-Flow
Battery de Sumitomo Electric Industries

Fonte: UFES, 2020.

- *Principais aplicações*

Baterias de fluxo são ideais para aplicações de **armazenamento de energia em larga escala** devido à sua capacidade de ajustar a capacidade de energia e potência de forma independente. Elas são usadas para **gestão de carga em redes elétricas**, integrando fontes de energia renováveis, como solar e eólica, e melhorando a confiabilidade e a estabilidade da rede (GALDINO, 2020).

- *Vantagens e Desvantagens*

| Aspecto | Vantagens | Desvantagens |
|--------------------------------------|---|---|
| Longevidade e Eficiência | Longa vida útil, capacidade de carregar e descarregar repetidamente sem perda significativa de carga. | - |
| Segurança e Impacto Ambiental | Segurança operacional e impacto ambiental reduzido. | - |
| Densidade Energética | - | Densidade energética mais baixa em comparação com baterias de íon de lítio, resultando em sistemas maiores. |
| Complexidade e Manutenção | - | Complexidade do sistema de bombeamento e manutenção. |
| Custo | - | Custo inicial relativamente alto. |

Célula de Combustível - Hidrogênio

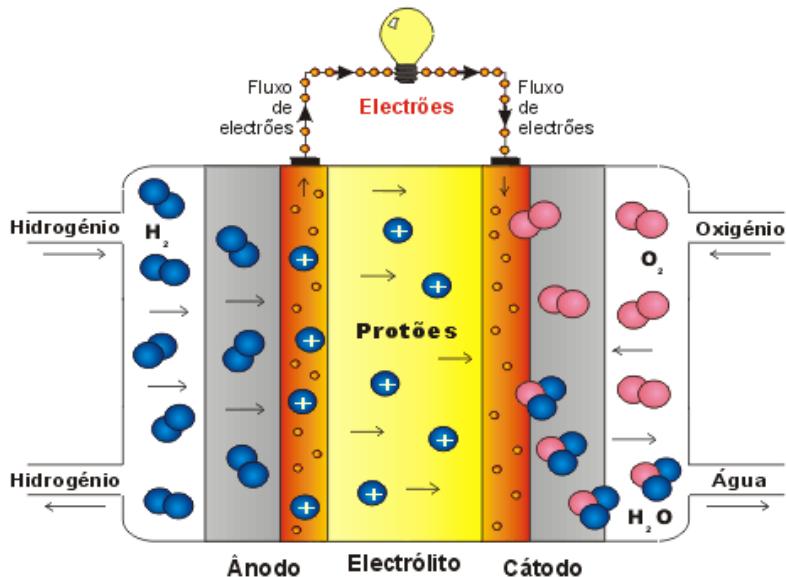
- *O que é?*

Células de combustível são dispositivos que convertem a energia química do hidrogênio ou outros combustíveis diretamente em eletricidade, água e calor, de forma limpa e eficiente. O hidrogênio é particularmente notável, pois quando usado, a única emissão é água, tornando-o uma opção de energia limpa e sustentável (ALVES; PAES, 2023).

- *Como funciona*

Uma célula de combustível é composta por dois eletrodos, um ânodo e um cátodo, separados por um eletrólito. O hidrogênio é introduzido no ânodo, onde um catalisador divide as moléculas de hidrogênio em prótons e elétrons, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplificação de funcionamento de uma célula de hidrogênio.



Fonte: PORTAL DE ESTUDOS DE QUÍMICA., 2010.

Os elétrons viajam através de um circuito externo, criando corrente elétrica, enquanto os prótons passam através do eletrólito até o cátodo, onde se recombina com oxigênio do ar para formar água (SOUTO; NOGUEIRA, 2021).

- *Principais aplicações*

As células de combustível têm uma ampla gama de aplicações, incluindo **transporte**, como em veículos movidos a células de combustível de hidrogênio, **sistemas de energia para edifícios** comerciais/residenciais e **armazenamento de energia em grande escala** para redes elétricas.

Elas oferecem uma solução potencial para armazenar energia renovável e fornecer energia de forma constante e confiável quando necessário (JACINTO JUNIOR et al., 2022).

- *Vantagens e Desvantagens*

| Aspecto | Vantagens | Desvantagens |
|------------------------------------|--|--|
| Eficiência Energética | - | Eficiência relativamente baixa na conversão de energia elétrica armazenada em hidrogênio de volta para eletricidade. |
| Emissões e Operação | Baixas ou nulas emissões de poluentes locais, operação silenciosa. | A maior parte do hidrogênio ainda é produzida a partir de fontes de combustíveis fósseis. |
| Flexibilidade e Aplicação | Flexibilidade em termos de escala e aplicação. | - |
| Custo e Infraestrutura | - | Alto custo inicial e necessidade de infraestrutura extensiva para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio. |
| Desenvolvimento Tecnológico | - | Desenvolvimento de métodos de produção de hidrogênio limpo em andamento, indicando uma necessidade de avanço tecnológico contínuo. |

Baterias Eletroquímicas

- *O que é?*

Baterias eletroquímicas são dispositivos que armazenam energia elétrica em forma de energia química e a liberam através de reações de oxidação-redução. Elas contêm células com eletrodos positivos e negativos, um eletrólito que facilita o movimento dos íons, e um separador que impede o contato direto entre os eletrodos enquanto permite a troca iônica (MESSIAS; FERREIRA, 2023).

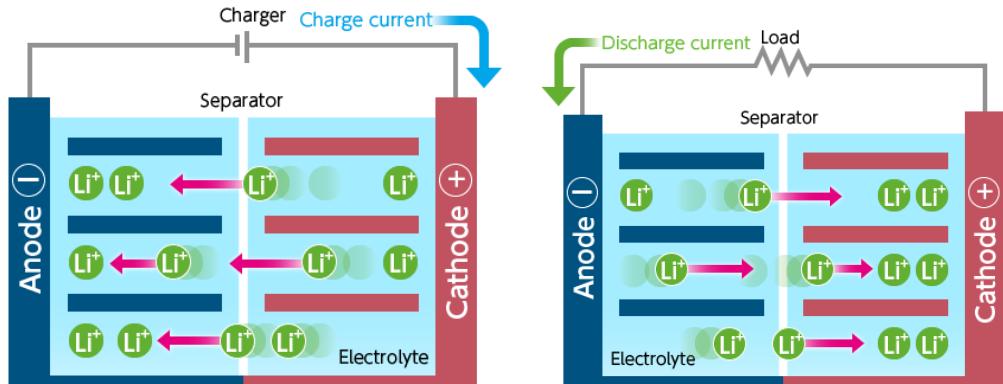
- *Como funciona*

No funcionamento das baterias eletroquímicas, os íons movem-se através do eletrólito do eletrodo negativo para o positivo durante a descarga, liberando energia elétrica.

Durante a carga, a energia elétrica é usada para mover os íons na direção oposta, regenerando os reagentes originais, como na

Figura 8. Esse processo envolve a transferência de elétrons através de um circuito externo, do ânodo para o cátodo (TOSHIBA, 2020).

Figura 8 - Representação gráfica de ciclos de carga e descarga de uma bateria de íons de lítio.



Fonte: Toshiba, 2020.

- *Principais aplicações*

As baterias eletroquímicas são amplamente utilizadas em diversas aplicações, desde **dispositivos portáteis** e **veículos elétricos** até **sistemas de armazenamento de energia em larga escala** para **estabilização de redes** elétricas alimentadas por fontes renováveis. São fundamentais em tecnologias de comunicação, transporte e no fornecimento de energia de emergência (SPITTHOFF; SHEARING; BURHEIM, 2021).

- *Vantagens e Desvantagens*

| Aspecto | Vantagens | Desvantagens |
|--|--|--|
| Densidade Energética | Alta densidade energética, permitindo armazenamento eficiente de energia, especialmente em variantes como as de íons de lítio. | - |
| Capacidade de Carga e Ciclo de Vida | Capacidade de carga rápida e ciclos de vida longos (em algumas tecnologias), reduzindo a necessidade de substituições frequentes. | - |
| Custo e Acessibilidade | Amplamente disponíveis e utilizadas em uma variedade de aplicações, desde dispositivos móveis até veículos elétricos. | Custos elevados de aquisição e manutenção, especialmente para variantes de alta performance. |
| Impacto Ambiental | Potencial para fontes de energia mais limpas e sustentáveis ao substituir combustíveis fósseis em aplicações de transporte e armazenamento de energia. | Impacto ambiental associado à extração e processamento de materiais críticos. |
| Segurança | Avanços tecnológicos estão continuamente melhorando a segurança das baterias, reduzindo o risco de incidentes. | Riscos residuais de segurança como incêndios e explosões, particularmente em tipos específicos de baterias com tecnologias voláteis. |
| Reciclagem e Descarte | Melhoria nas tecnologias de reciclagem está aumentando a sustentabilidade dessas baterias ao final de sua vida útil. | Desafios contínuos com a reciclagem eficaz e o descarte seguro devido a substâncias tóxicas. |
| Eficiência no Uso de Energia | As baterias eletroquímicas são eficientes em termos de armazenamento e liberação de energia, essenciais para aplicações críticas como veículos elétricos e dispositivos médicos. | Perdas de energia durante ciclos de carga e descarga, embora estejam melhorando com o desenvolvimento tecnológico. |

3.2. PRINCIPAIS CRITÉRIOS DE ESCOLHA

A seleção da solução de armazenamento mais adequada para cada projeto requer uma análise criteriosa, baseada em critérios técnicos, econômicos e no grau de maturidade tecnológica das opções disponíveis.

Para garantir a escolha mais eficiente e alinhada às necessidades específicas de cada aplicação, é essencial considerar uma série de fatores. Entre os principais aspectos que devem ser avaliados durante a definição do equipamento de armazenamento de energia em cada projeto, destacam-se:

- ***Defina os objetivos e requisitos do projeto:***

Comece por identificar os objetivos específicos do sistema de armazenamento de energia. Exemplo: Quais são as metas em termos de eficiência energética e redução de demanda na ponta? Haverá integração com energias renováveis?

- ***Avalie a escala do projeto:***

Determine o tamanho do sistema necessário para atender às demandas do projeto. Isso inclui a capacidade de armazenamento de energia e a potência do sistema.

- ***Analise o ciclo de vida e a durabilidade:***

Considere a vida útil esperada do sistema de armazenamento de energia. Diferentes tecnologias têm ciclos de vida variados e desgastam-se de maneira diferente com o tempo.

- ***Avalie a eficiência:***

Avalie a eficiência de carga e descarga do sistema, bem como as perdas de energia durante o armazenamento e a recuperação de energia. Determine se a tecnologia atende às metas de eficiência do projeto.

- ***Analise os custos:***

Calcule os custos totais do ciclo de vida, incluindo aquisição, instalação, manutenção e operação do sistema de armazenamento. Leve em conta o custo por quilowatt-hora (kWh) armazenado e o custo por ciclo de carga e descarga.

- ***Considere a aplicação específica:***

Avalie as necessidades e requisitos específicos do projeto. Por exemplo, sistemas de armazenamento utilizados em aplicações de resposta à demanda podem ter requisitos diferentes em comparação com sistemas de apoio a energias renováveis.

- ***Avalie a tecnologia disponível:***

Pesquise as tecnologias de armazenamento de energia disponíveis no mercado.

Além do quesito de maturidade tecnológica é importante avaliar se uma determinada tecnologia está disponível para comercialização no Brasil. Este critério é importante para questões de garantia, além de assegurar o devido atendimento pós-venda para questões de operação e manutenção do sistema.

- ***Estude a localização e o ambiente:***

Avalie o ambiente em que o sistema de armazenamento será instalado. Isso inclui as condições climáticas, a disponibilidade de espaço, os requisitos de segurança e as regulamentações locais.

- ***Pense na integração com outros sistemas:***

Considere como o sistema de armazenamento se integrará com outras fontes de energia, como geração solar ou eólica, e como se integrará com a rede elétrica local.

- ***Avalie a escalabilidade:***

Considere se o sistema de armazenamento pode ser facilmente dimensionado para atender a futuras necessidades de energia caso o projeto cresça, técnica conhecida como *augmentation*, que visa a ampliação possível do sistema caso se mostre necessário.

- ***Consulte especialistas:***

Se necessário, consulte especialistas em armazenamento de energia para obter orientações técnicas e avaliações detalhadas das opções disponíveis.

- ***Realize análises de viabilidade econômica:***

Realize análises de viabilidade econômica para comparar diferentes tecnologias e determinar qual oferece o melhor retorno sobre o investimento.

- ***Considere impactos ambientais:***

Avalie o impacto ambiental das tecnologias consideradas, levando em conta fatores como emissões de carbono, reciclagem de materiais e descarte adequado.

Após uma análise abrangente desses fatores, você estará mais bem equipado para escolher a tecnologia de armazenamento de energia mais adequada para seu projeto. É importante lembrar que não existe uma abordagem única, e a escolha da tecnologia deve ser personalizada de acordo com as necessidades e metas específicas do projeto.

4. BESS (Battery Energy Storage System)

4.1. O QUE É?

BESS, ou *Battery Energy Storage System*, é um sistema que armazena energia elétrica usando baterias recarregáveis. A principal função do BESS é capturar energia, como por exemplo de fontes renováveis (solar e eólica), e armazená-la nas baterias para uso posterior. Isso permite um uso mais eficiente da energia, ajudando a estabilizar a rede elétrica e reduzir custos de energia (GOVERNO FEDERAL, 2019).

4.2. FUNCIONALIDADES

Os sistemas de armazenamento de energia desempenham múltiplas funções essenciais na gestão das redes elétricas, contribuindo significativamente para a otimização do uso de fontes renováveis, o aumento da eficiência operacional e a segurança do fornecimento energético.

Em soluções “Atrás do Medidor”, as principais funcionalidades são:

- deslocamento de consumo durante o horário ponta (load shifting);
- gestão da demanda contratada (peak shaving);
- serviços como backup de energia; e
- suporte para não injeção de energia elétrica gerada por um sistema fotovoltaico (grid-zero) instalado na mesma unidade consumidora.

A maioria dessas funcionalidades acaba sendo mais aplicável a consumidores atendidos em média ou alta tensão, uma vez que esses grupos possuem diferenciação tarifária nos horários do dia. No entanto, ainda existem casos em que clientes do grupo de baixa tensão podem se beneficiar dessas soluções, especialmente quando há critérios técnicos que justificam sua aplicação (SANTOS, 2023).

4.2.1. Deslocamento do consumo (*load shifting*)

O *load shifting*, ou deslocamento do consumo do horário de ponta para o fora de ponta, está entre as aplicações mais atrativas para consumidores atendidos em média tensão. Isso se deve à estrutura tarifária definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece preços diferenciados conforme o horário de consumo: durante o horário de ponta (HP), a energia é significativamente mais cara, enquanto no fora de ponta (HFP), as tarifas são

reduzidas. Consumidores com baixa capacidade de gestão de carga podem se beneficiar ao armazenar energia nos horários mais baratos e utilizá-la nos mais caros, como ilustrado na Figura 9 (NEWCHARGE, 2021).

Figura 9 - Visualização da aplicação do 'load shifting'.



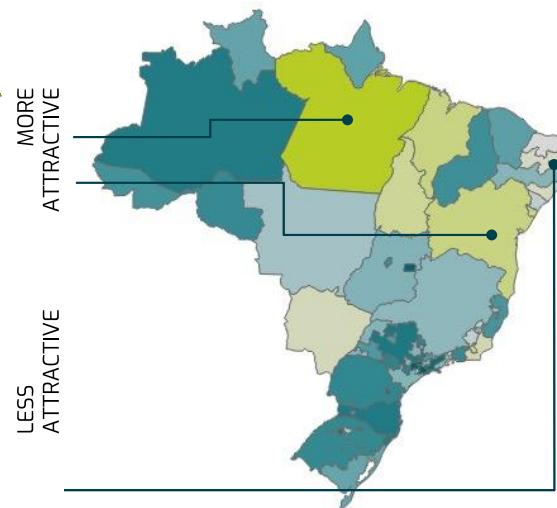
Fonte: Greener, NewCharge, 2021.

Essa funcionalidade se torna ainda mais vantajosa em regiões onde a diferença tarifária entre os períodos de ponta e fora de ponta é acentuada. Nesses casos, o sistema de armazenamento pode operar de forma estratégica, carregando a bateria durante a madrugada ou em horários comerciais, quando a energia é mais barata, e despachando-a nos horários de pico, reduzindo o custo total da energia consumida.

No Brasil, os estados do Pará e da Bahia apresentam os maiores diferenciais tarifários do país, o que amplia significativamente o potencial de economia em projetos que adotam o *load shifting*. Essas condições regionais estão detalhadas na Figura 10, reforçando a importância da análise tarifária na viabilidade econômica do sistema.

Figura 10 - Diferencial tarifário Ponta e Fora Ponta 2023.

| Distri- buidora | Estado | $\Delta P-FP^1$ (R\$/MWh) | $\Delta TUSD^2$ (R\$/MWh) |
|--------------------|--------|------------------------------|------------------------------|
| EPA | PA | 2.913 | 2.750 |
| Coelba | BA | 2.701 | 2.528 |
| CEAL | AL | 2.221 | 2.066 |
| EMR | RJ | 2.112 | 1.895 |
| ETO | TO | 2.090 | 1.937 |
| Cemar | MA | 1.848 | 1.715 |
| Enel RJ | RJ | 1.771 | 1.618 |
| EMS | MS | 1.761 | 1.593 |
| Sulgipe | SE | 1.630 | 1.526 |
| EPB | PB | 1.396 | 1.268 |



Fonte: ANEEL, 2023. Compilação realizada pela NewCharge.

¹ Delta entre Tarifas na Ponta (TUSD+TE) pelas Tarifas no Fora Ponta (TUSD+TE) sem contabilização de impostos.

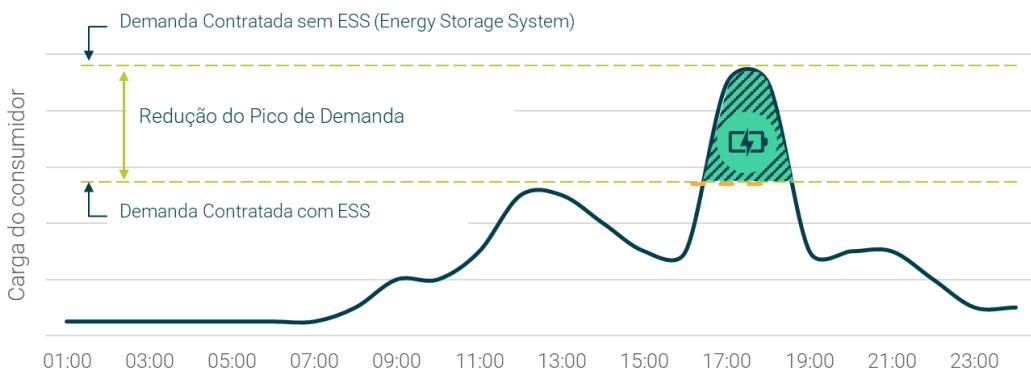
² Delta entre TUSD Ponta e Fora Ponta das concessionárias sem contabilização de impostos.

Fonte: Aneel, 2023 (modificado por NewCharge).

4.2.2. Corte de pico de demanda (*peak shaving*)

O uso de BESS para corte do pico de demanda consiste em utilizar o sistema de armazenamento para evitar elevações abruptas no consumo de energia. Quando a demanda se torna elevada, o sistema aciona automaticamente o uso das baterias para suprir parte da carga, reduzindo assim a potência retirada da rede. Essa aplicação está ilustrada na Figura 11.

Figura 11 – Visualização da aplicação do ‘peak shaving’.



Fonte: Greener, NewCharge, 2021.

Essa funcionalidade é especialmente útil para evitar que os picos de demanda ultrapassem os limites financeiros estabelecidos em contrato ou as restrições técnicas definidas pela concessionária de energia ou pela fonte geradora principal da instalação. Ao suavizar esses picos, o sistema contribui para maior estabilidade e previsibilidade no consumo.

O *peak shaving* é aplicável apenas a consumidores do Grupo A, aqueles atendidos em Média ou Alta Tensão, que possuem contratos de demanda junto à distribuidora. Para esses clientes, a utilização de um BESS bem dimensionado permite reduzir os custos associados ao excesso de demanda. Ao garantir o fornecimento de energia nos momentos de pico, o sistema evita penalidades e otimiza os gastos com energia, tornando-se uma solução financeiramente vantajosa quando bem planejada.

Dica 1: o fator de demanda (razão entre a demanda média e a demanda máxima) pode ser usado como referência. Quanto menor o fator de demanda, maior a chance da atratividade dessa função.

Dica 2: consumidores com histórico de ultrapassagem de demanda também pode ter elevado potencial de uso dessa aplicação.

Atenção! essa funcionalidade não tem se mostrado atrativa para consumidores com picos de consumo com longas durações, por necessidade de dimensionamento de sistemas de armazenamento com grandes autonomias, o que eleva consideravelmente os custos envolvidos (Zeh; Witzmann, 2014).

4.2.3. Back-up de energia

Em muitas regiões do Brasil, consumidores enfrentam baixos índices de qualidade no fornecimento de energia elétrica, seja por interrupções frequentes ou por variações de tensão. Esses problemas impactam diretamente o funcionamento adequado de equipamentos e processos, especialmente em setores mais sensíveis, como hospitais e indústrias químicas.

Para esses consumidores, o uso de sistemas de armazenamento de energia em baterias como back-up é relevante, garantindo o suprimento ininterrupto de energia com alta qualidade e confiabilidade. Assim, evita-se perdas de matéria prima e paradas inesperadas em linhas de produção.

No entanto, a análise de viabilidade financeira para a implementação de um sistema de *backup* com BESS ainda é complexa. Devido aos custos envolvidos e à variabilidade das condições técnicas e econômicas, essa aplicação permanece pouco difundida no país, exigindo estudos aprofundados caso a caso.

4.2.4. Grid-zero

No setor elétrico, o conceito de "**Grid-Zero**" refere-se à condição em que uma unidade consumidora (UC) reduz sua dependência de uma rede elétrica externa, a partir do maior aproveitamento da energia renovável gerada localmente.

O conceito de Grid-zero está intimamente ligado à **geração distribuída** e **armazenamento de energia** (principalmente por meio de sistemas de **baterias**), pois todo excedente de energia renovável, que seria injetado na rede elétrica, é armazenado para utilização quando a geração não for suficiente para atender o consumo.

Sendo assim, essa a funcionalidade de otimização do grid-zero tem duas principais aplicações:

1- Em consumidores livres:

- De acordo com resolução da ANEEL, esses consumidores não participam do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Portanto, toda energia injetada na rede é considerada com uma “perda”, no ponto de vista da UC.
- Assim, a energia que seria “perdida” pode ser armazenada para posterior uso. Assim se dá o ganho econômico dessa funcionalidade para clientes livres;

2- Consumidores com MMGD:

- UC com Microgeração ou Minigeração Distribuída (MMGD) participam do SCEE, ou seja, toda energia ativa injetada na rede pode ser compensada posteriormente como crédito de energia;
- Contudo, de acordo com a lei 14.300/2022, UC com MMGD protocolados a partir de 2023 terá a cobrança percentual de uma parcela (Fio B*) da tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD);
- A cobrança do Fio B terá aumento gradual ao longo dos anos, começando com 15% a partir de 2023 até 90% em 2028;

Desta forma, tem-se que a análise de viabilidade econômica de BESS para essa funcionalidade deve ser feita de forma bem particular, levando em consideração mudanças tarifárias, bem como, alterações no perfil de consumo e de geração.

O uso dessa funcionalidade é mais aconselhado como complementar às demais funções do BESS, trazendo mais benefícios para o sistema como um todo.

***Saiba mais:** A parcela Fio B, que compõe a TUSD, representa os custos com a rede de distribuição. Ou seja, ela remunera as distribuidoras devido aos seus investimentos em toda a infraestrutura da rede de distribuição. Sendo assim, o valor dessa tarifa varia de acordo com a complexidade de cada área de concessão.

5. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE DE PROJETOS

Uma vez que já foram detalhadas as principais funcionalidades do BESS e como cada função pode trazer benefícios financeiros, nesse capítulo será apresentado um estudo de caso, com o intuito de exemplificar e demonstrar como pode ser feita a avaliação de viabilidade econômica e financeira de projetos com BESS.

É importante mencionar que projetos com BESS podem contemplar mais de uma funcionalidade.

5.1. ESTUDO DE CASO: BESS NO GRUPO A

Para esse estudo de caso, vamos inicialmente estabelecer premissas para BESS, bem como, vamos caracterizar a unidade consumidora (UC) e o escopo do projeto.

Com isso, poderemos definir as funcionalidades desejadas e, em seguida, iremos fazer avaliações de viabilidade para dois cenários distintos, conforme listado abaixo:

- Cenário 1: utilizando recursos do PEE;
- Cenário 2: utilizando recursos próprios.
 - Considerando a UC no ACR e
 - Considerando a UC no ACL.

Para o estudo em questão foi considerada uma unidade consumidora com perfil de consumo característico de hospitais com as seguintes características:

Tabela 1 - Características da Unidade Consumidora do Grupo A do exemplo analisado.

| | | |
|----------------------------|--|----------------|
| Tipo de consumidor | Hospital com funcionamento 24 horas | |
| Grupo de atendimento | A4 Verde | |
| Sistema previsto FV | 850 kWp | |
| Permite injeção na rede | Não | |
| Demandada contratada | 1400kW | |
| Preço da energia (em 2023) | Ambiente Regulado | Ambiente Livre |
| Na Ponta (R\$/kWh) | R\$ 3,04687/kWh | R\$1,6655/kWh |
| Fora Ponta (R\$/kWh) | R\$ 0,34628/kWh | R\$0,1004/kWh |
| Funcionalidade adotada | Deslocamento de consumo (<i>load shifting</i>) | |
| Horário de ponta: | 18:00 às 21:00 | |

Fonte: O Autor, 2023.

O histórico de consumo mensal, referente ao ano de 2023, da unidade consumidora em estudo é apresentado na Tabela 2 a seguir:

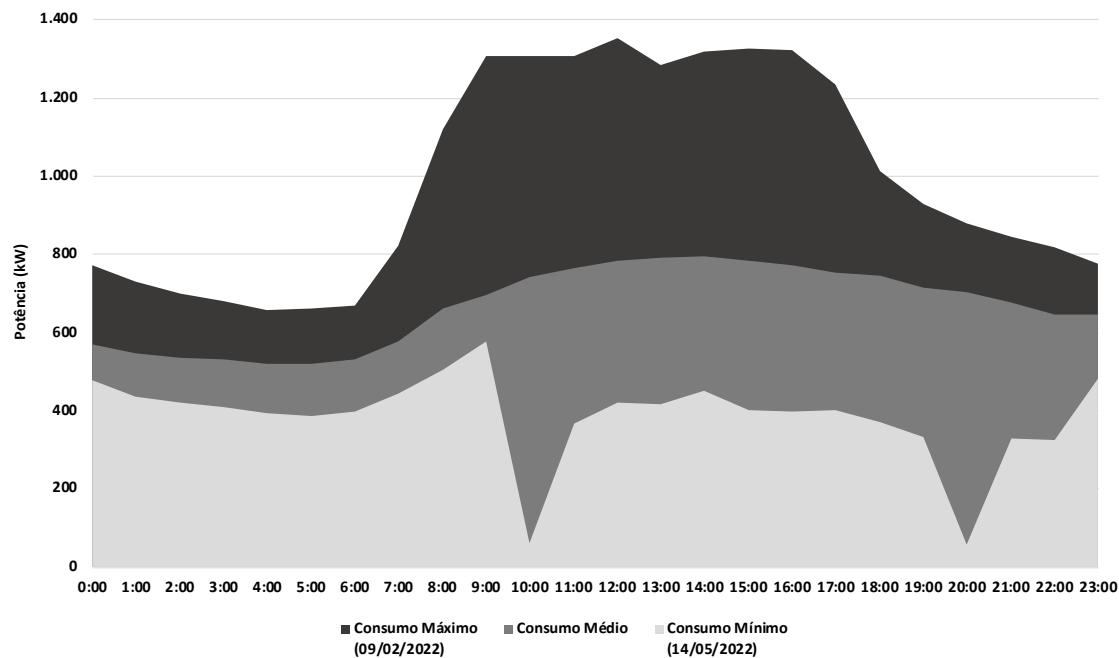
Tabela 2 - Consumo mensal da unidade analisada.

| CENÁRIO SEM BESS | | | |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Mês referente | Demandada contratada (kW) | Consumo Ponta (kWh) | Consumo Fora Ponta (kWh) |
| janeiro | 1.400,00 | 52.666,51 | 571.787,99 |
| fevereiro | 1.400,00 | 45.779,23 | 518.222,40 |
| março | 1.400,00 | 56.130,66 | 580.317,57 |
| abril | 1.400,00 | 39.191,63 | 478.996,19 |
| maio | 1.400,00 | 43.473,00 | 452.089,93 |
| junho | 1.400,00 | 41.453,72 | 454.509,35 |
| julho | 1.400,00 | 42.287,03 | 477.931,64 |
| agosto | 1.400,00 | 47.680,15 | 489.020,30 |
| setembro | 1.400,00 | 44.812,65 | 483.843,43 |
| outubro | 1.400,00 | 46.001,02 | 542.782,32 |
| novembro | 1.400,00 | 44.122,25 | 508.241,29 |
| dezembro | 1.400,00 | 51.729,23 | 564.999,60 |
| Média mensal | | 46.277,26 | 510.228,50 |
| Total anual | | 555.327,08 | 6.122.742,01 |

Fonte: O Autor, 2023.

A partir da avaliação dos dados extraídos da memória de massa disponibilizada pela concessionária local, foi possível observar que, apesar de apresentar um elevado consumo em período noturno, o seu pico de uso acontece entre 9:00 e 16:00. Isso ocorre pelo grande número de atendimentos ambulatoriais durante o dia.

Figura 12 - Gráfico de consumo horário (Máximo, Mínimo e Médio) da unidade consumidora.

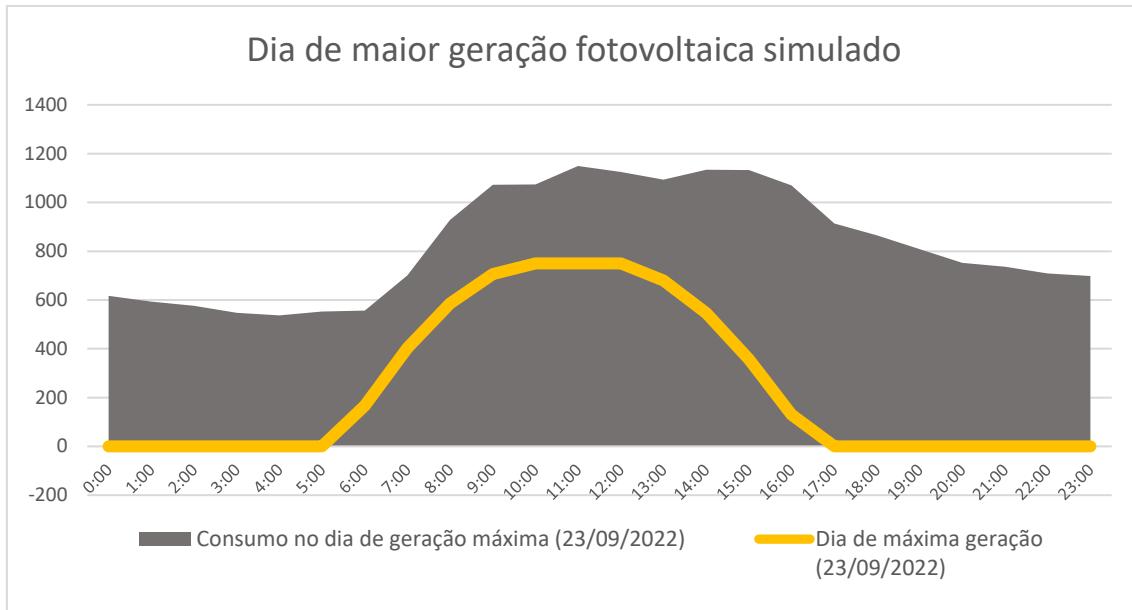


Fonte: O Autor, 2023.

Porém, esse período também coincide com os maiores níveis da geração fotovoltaica. Portanto, toda energia gerada é consumida instantaneamente pela UC. Logo, nem créditos de energia nem perdas (uma vez que clientes livres não fazem parte do SCEE) serão considerados nesse estudo.

A curva representada na Figura 13 demonstra que a geração prevista não ultrapassa o consumo do hospital.

Figura 13 - Gráfico de comparativo de dia de maior geração fotovoltaica com relação ao consumo da unidade no mesmo dia.



Fonte: O Autor, 2023.

Dessa forma, ratificamos que a única funcionalidade adotada será de *load shifting*, ou seja, o sistema será carregado no horário fora ponta, com energia advinda da geração fotovoltaica ou da rede, e o descarregamento acontecerá durante o horário de ponta.

Outras premissas adotadas para o BESS:

- Potência nominal: 2.000kWh (capacidade apresentada em datasheet).
- DoD (*Depth of Discharge*): 90% (capacidade disponível de potência a ser utilizada do equipamento – neste caso 1.800kWh).
- RTE (*Round Trip Efficiency*): 85% (eficiência somada de carga e descarga do BESS no ponto de conexão).

Visando adotar premissas para determinação do custo do projeto, o seu CAPEX foi separado em quatro partes:

- Equipamentos;
- Mão de obra;
- Miscelâneas; e
- Logística.

Essa denominação traz valores determináveis na relação R\$/kWp ou R\$/kWh para fotovoltaico e SAE, respectivamente, como apresentado na Tabela 3, facilitando uma melhor visualização do impacto de cada um dentro do escopo da implementação.

Tabela 3 - Composição de valores de cada item em R\$/kWp ou R\$/kWh.

| | |
|---|-------------------------|
| BESS | R\$ 2.635,09/kWh |
| Média tensão + cabos + proteções + outros | R\$ 440,90/kWh |
| Mão de Obra | R\$ 53,63/kWh |
| Transporte | 0,8% do CAPEX |
| Total BESS | R\$ 3.154,66/kWh |

Fonte: Autor, 2023.

A montagem de cada valor foi incorporada com base em informações de valores cotados de equipamentos que compõem o *BESS*, com fornecedores parceiros de Tier-1 (empresas com maior *trackrecords* de sucesso, que atende a requisitos de qualidade e segurança) do mercado nacional e internacional.

Para os demais valores como miscelâneas e mão de obra (MDO) é embasado em tabelas como o SINAPI e cotações diversificadas.

Assim, o projeto terá um investimento inicial entorno de 6,3 milhões.

$$\text{Valor do projeto} = 2.000\text{kWh} \times \text{R\$3.154,66/kWh} \quad (1)$$

A partir da capacidade instalada do SAE (2.000 kWh), é possível estimar como se comportará a redução de consumo no horário de ponta.

A Tabela 4 traz o resultado dessa simulação, em que é possível demonstrar que 81,7% do consumo na ponta será suprido pelas baterias, ou seja, cerca de 453,6 MWh por ano.

Somado a esse montante de energia, existem as perdas no processo de carregamento, que representa 80,05 MWh/ano e será considerado também no cálculo do RCB.

Com isso, o consumo FP teria um acréscimo de 533 MWh/ano. Contudo, a geração FV local (850 kWp) é capaz para suprir esse consumo adicional e, além disso, ainda é responsável por reduzir o consumo FP para aproximadamente 442 MWh/mês, totalizando uma redução de 13,3%.

Tabela 4 - Simulação do comportamento do consumo da unidade considerando o BESS e o FV.

| Mês | Horário Fora Ponta (FP) | | | | Horário Na Ponta (NP) |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|----------------------------------|-----------------------|
| | Consumo FP (sem BESS) | Recarga (BESS + perdas) | Geração FV | Consumo total FP (com BESS e FV) | Consumo total NP |
| janeiro | 571.787,99 | 40.235,29 | 110.047,89 | 501.975,39 | 4.991,63 |
| fevereiro | 518.222,40 | 46.588,24 | 106.639,18 | 458.171,46 | 3.873,00 |
| março | 580.317,57 | 44.470,59 | 95.196,82 | 529.591,34 | 3.653,72 |
| abril | 478.996,19 | 44.470,59 | 102.933,13 | 420.533,65 | 4.487,03 |
| maio | 452.089,93 | 48.705,88 | 108.795,97 | 391.999,84 | 6.280,15 |
| junho | 454.509,35 | 44.470,59 | 111.674,16 | 387.305,78 | 7.012,65 |
| julho | 477.931,64 | 42.352,94 | 123.030,64 | 397.253,94 | 10.001,02 |
| agosto | 489.020,30 | 42.352,94 | 113.145,21 | 418.228,03 | 8.122,25 |
| setembro | 483.843,43 | 46.588,24 | 118.261,15 | 412.170,52 | 12.129,23 |
| outubro | 542.782,32 | 46.588,24 | 122.484,49 | 466.886,07 | 13.066,51 |
| novembro | 508.241,29 | 38.117,65 | 113.389,27 | 432.969,67 | 13.379,23 |
| dezembro | 564.999,60 | 48.705,88 | 122.359,92 | 491.345,56 | 14.730,66 |
| Média | 510.228,50 | 44.470,59 | 112.329,82 | 442.369,27 | 8.477,26 |
| Total | 6.122.742,01 | 533.647,07 | 1.347.957,83 | 5.308.431,25 | 101.727,08 |
| Redução de consumo | | | | 814,3 MWh/ano | 453,6 MWh/ano |
| | | | | -13,3 % | -81,7 % |

Fonte: O Autor, 2023.

Portanto, com a implementação do BESS e do FV, a unidade consumidora terá uma redução no consumo NP de 453,6 MWh/ano e de 814,3 MWh/ano no consumo FP.

5.1.1. Análise de Viabilidade de Implementação com Recurso de PEE

Projetos desenvolvidos no âmbito do PEE devem, necessariamente, atender aos requisitos estabelecidos pelos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE). O PROPEE é regulado pela ANEEL e é composto por 10 módulos, os quais podem ser acessados facilmente em [seu site](#).

Em seu módulo 7, o PROPEE trata dos diferentes fatores e formas de cálculo da viabilidade econômica de um projeto realizado no âmbito do PEE. Além disso, define que os projetos devem ser avaliados por sua Relação Custo-Benefício (RCB) proporcionada.

- *Cálculo da Relação Custo-Benefício (RCB)*

Para que um projeto com **fonte incentivada** seja considerado viável nesta metodologia, a RCB deve ser igual ou inferior a 1,0, ou seja, os benefícios devem superar os custos.

Para tal avaliação, é considerada a valoração da energia economizada e da redução da demanda na ponta ao longo da vida útil do projeto. Ou seja, os benefícios valorados são:

- EE (energia anual economizada)
- RDP (redução de demanda na ponta).

Esses dois indicadores são valorados a partir do CEE (custo unitário da energia) e o CED (custo unitário da demanda).

Atenção! esses valores variam de acordo com a concessionária.

Atenção! Vale ressaltar que, devido às perdas associadas, o BESS provoca um aumento global de consumo. Ou seja, considerando apenas o BESS, o “benefício” da EE será negativo!

De modo geral, a RCB é calculada pela fórmula abaixo:

$$RCB = \frac{CAt}{BAt} \quad (2)$$

Sendo:

$$CAt = \sum_n CEn \times \frac{CT}{CEt} \times \frac{i(1+i)^u}{(1+i)^u - 1} \quad (3)$$

CAt: Custo anualizado total (R\$/ano)

CEn: Custo de cada equipamento (R\$/ano)

CT: Custo total do projeto (R\$/ano)

CEt: Custo total em equipamentos (R\$/ano)

i: taxa de desconto (% a.a.)

u: vida útil do equipamento (anos)

E, sendo:

$$BAt = (EE \times CEE) + (RDP \times CED)$$

BAt: Benefício anualizado (R\$/ano)

EE: Energia anual economizada (MWh/ano)

CEE: Custo evitado da energia (R\$/MWh)

RDP: Redução de demanda na ponta (kW/ano)

CED: Custo evitado de demanda (R\$/kW/ano)

Para esse estudo de caso, consideramos as seguintes premissas:

- $EE = -80,05 \text{ MWh/ano}$
- $RDP = 600 \text{ kW}$
- $CEE = 359,80 (\text{R\$}/\text{MWh.ano})$;
- $CED = 1.424,66 (\text{R\$}/\text{kW.ano})$;
- Vida útil do banco de baterias = 19 anos
- Vida útil dos inversores = 19 anos
- Taxa de desconto = 8%

Além dos custos diretos com energia, é importante considerar a inclusão de outros custos agregados na análise de viabilidade do projeto, como despesas com marketing, mão de obra própria e terceirizada, entre outros.

Estes custos adicionais devem ser cuidadosamente avaliados para proporcionar uma visão completa do investimento necessário. Para esse caso, adotamos os seguintes valores:

- Mão de obra própria = R\$ 500.000,00
- Mão de obra terceiros = R\$ 123.410,94
- Transporte = R\$ 50.000,00
- Treinamentos = R\$ 50.000,00
- Auditoria = R\$ 6.000,00
- M&V (medição e verificação) = R\$ 110.000,00

Assim, aplicamos todos esses custos na planilha de cálculo que resultou em uma RCB (Relação Custo-Benefício) de 0,95. A Tabela 5 detalha esses valores e a composição dos custos considerados.

Tabela 5 - Composição de custos e cálculo de RCB no padrão da ANEEL

| Custos | | | | | | | |
|--------------------|-------------|--------------|----------|------------------|-----------|------------------------|--------------------------------------|
| Equipamentos | | | | | | | |
| Item | Equipamento | Custo um. | Qtd. | Custo total | Vida útil | Fator recuper. Capital | Custo anualizado com indiretos (CAt) |
| 1 | BESS | R\$ 3.075,99 | 2.000,00 | R\$ 6.151.974,51 | 19 | 0,1036 | R\$ 781.119,52 |
| 2 | Solar FV | | | R\$ 0,00 | 25 | 0,0937 | R\$ 0,00 |
| Total equipamentos | | | | R\$ 6.151.974,51 | | | R\$ 781.119,52 |

| Serviços e demais custos indiretos | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------|------|------------------|
| Descrição | | Custo | Qtd. | Custo total |
| 1 | Material | R\$ 6.151.974,51 | 1 | R\$ 6.151.974,51 |
| 2 | Mão de obra própria | R\$ 500.000,00 | 1 | R\$ 500.000,00 |
| 3 | Mão de obra de terceiros BESS | R\$ 123.410,94 | 1 | R\$ 123.410,94 |
| 4 | Mão de obras de terceiros solar | - | 1 | - |
| 5 | Transporte | R\$ 50.000,00 | 1 | R\$ 50.000,00 |
| 6 | Descarte | - | 1 | - |
| 7 | Marketing | R\$ 550.000,00 | 1 | R\$ 550.000,00 |
| 8 | Treinamento | R\$ 50.000,00 | 1 | R\$ 50.000,00 |
| 9 | Auditoria | R\$ 6.000,00 | 1 | R\$ 6.000,00 |
| 10 | M&V | R\$ 110.000,00 | 1 | R\$ 110.000,00 |
| Total serviços e demais indiretos | | | | R\$ 1.389.410,94 |
| Custo total do projeto | | | | R\$ 7.541.385,45 |
| Custo Anualizado total (CAt) | | | | R\$ 781.119,52 |

| Benefícios | | | | | | |
|------------|---------------------------|-----------------|-----|---------|----------------------------------|-------------|
| 1 | Energia anual economizada | MWh/ano | EE | - | Benefício energia | - |
| 2 | Perdas bateria | 359,8 MWh/ano | EE | - 80,05 | Benefício energia | - 28.801,99 |
| 3 | Demanda evitada na ponta | 1424,66 MWh/ano | RDP | 600,00 | Benefício Demanda | 854.796,00 |
| | | | | | Benefício anualizado total (BAt) | 825.994,01 |
| | | | | | RCB | 0,95 |

Fonte: O Autor, 2023.

Portanto, com uma **RCB de 0,95**, o projeto é considerado **viável** sob a ótica de investimento do PEE, regulado pela ANEEL.

A aplicação de projetos de BESS com a função de deslocamento de consumo demonstrou-se **VIÁVEL** no cenário analisado. Apesar do aumento de consumo devido às perdas intrínsecas do sistema, a solução gerou benefícios significativos para o consumidor, com a **redução direta nos custos com energia**. Além disso, houve contribuição positiva para o sistema elétrico, com o **alívio da demanda no horário de ponta**.

É importante destacar que, como não foi considerado injeção de energia na rede no cenário avaliado, não foram valorados eventuais ganhos adicionais decorrentes da redução de perdas da energia injetada, o que é particularmente relevante para consumidores do Ambiente de Contratação Livre (ACL), que não participam do sistema de compensação de energia (net metering).

Nesse contexto, em situações em que haja **excedente de geração e possibilidade de injeção na rede**, a funcionalidade de **otimização do grid-zero** pode representar um fator adicional de valorização do projeto, melhorando sua **Razão Custo-Benefício (RCB)** e, consequentemente, sua atratividade econômica.

5.1.2. Análise de Viabilidade de Implementação com Recurso Próprio

Para essa segunda análise, será considerado que o investimento será feito com recursos próprios. Sendo assim, avaliaremos indicadores de viabilidade econômica, como por exemplo: *payback* e *TIR* (taxa interna de retorno), sendo este segundo geralmente atrelado a taxa SELIC como valor mínimo.

Como não será considerada a geração FV local, apenas a funcionalidade de *load shifting* será o foco do estudo de viabilidade.

Desta forma, a economia gerada será a redução do custo com a energia na ponta, tendo seu impacto analisado até o 19º ano de funcionamento.

Nesse cenário, vamos realizar duas simulações: uma considerando a UC no ambiente de contratação regulado (ACR) e outra no ambiente livre (ACL).

Levando em consideração perdas de eficiência do sistema e reajustes anuais médios de 4% no valor do preço da energia, tem-se a economia e o fluxo de caixa (FC) anual conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Economia financeira com o load shifting gerada ao ano.

| Ano | Economia Gerada no ACL (R\$) | Saldo do FC | Economia Gerada no ACR (R\$) | Saldo do FC |
|-----|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| 0 | - | -R\$ 6.309.320,00 | - | -R\$ 6.309.320,00 |
| 1 | R\$ 657.940,06 | -R\$ 5.651.379,94 | R\$ 1.203.637,24 | -R\$ 5.105.682,76 |
| 2 | R\$ 667.017,10 | -R\$ 4.984.362,84 | R\$ 1.220.242,80 | -R\$ 3.885.439,95 |
| 3 | R\$ 670.535,78 | -R\$ 4.313.827,06 | R\$ 1.226.679,89 | -R\$ 2.658.760,06 |
| 4 | R\$ 685.459,50 | -R\$ 3.628.367,56 | R\$ 1.253.981,38 | -R\$ 1.404.778,68 |
| 5 | R\$ 692.324,48 | -R\$ 2.936.043,08 | R\$ 1.266.540,19 | -R\$ 138.238,49 |
| 6 | R\$ 708.552,86 | -R\$ 2.227.490,22 | R\$ 1.296.228,43 | R\$ 1.157.989,94 |
| 7 | R\$ 731.441,90 | -R\$ 1.496.048,32 | R\$ 1.338.101,70 | R\$ 2.496.091,64 |
| 8 | R\$ 745.797,61 | -R\$ 750.250,71 | R\$ 1.364.364,07 | R\$ 3.860.455,71 |
| 9 | R\$ 757.350,68 | R\$ 7.099,97 | R\$ 1.385.499,29 | R\$ 5.245.955,00 |
| 10 | R\$ 768.363,24 | R\$ 775.463,21 | R\$ 1.405.645,70 | R\$ 6.651.600,70 |
| 11 | R\$ 776.243,20 | R\$ 1.551.706,41 | R\$ 1.420.061,31 | R\$ 8.071.662,01 |
| 12 | R\$ 794.117,86 | R\$ 2.345.824,27 | R\$ 1.452.761,26 | R\$ 9.524.423,27 |
| 13 | R\$ 822.566,64 | R\$ 3.168.390,91 | R\$ 1.504.805,53 | R\$ 11.029.228,81 |
| 14 | R\$ 824.133,80 | R\$ 3.992.524,71 | R\$ 1.507.672,50 | R\$ 12.536.901,31 |
| 15 | R\$ 843.076,34 | R\$ 4.835.601,05 | R\$ 1.542.326,03 | R\$ 14.079.227,34 |
| 16 | R\$ 858.838,81 | R\$ 5.694.439,86 | R\$ 1.571.161,94 | R\$ 15.650.389,28 |
| 17 | R\$ 874.885,62 | R\$ 6.569.325,48 | R\$ 1.600.518,01 | R\$ 17.250.907,29 |
| 18 | R\$ 898.695,51 | R\$ 7.468.020,99 | R\$ 1.644.075,89 | R\$ 18.894.983,18 |
| 19 | R\$ 915.469,66 | R\$ 8.383.490,65 | R\$ 1.674.762,56 | R\$ 20.569.745,74 |

Fonte: O Autor, 2023.

Portanto, tem-se que o payback simples do investimento é dado com 8,5 anos para o ACL e de 5,5 anos para o ACR. Além disso, a taxa interna de retorno (TIR) é de 10% e 20% no ACL e ACR, respectivamente.

Sendo assim, pode-se considerar que o projeto é economicamente viável, uma vez que o payback é dado dentro da vida útil estimada do projeto.

O payback no ambiente regulado é menor que no ambiente livre pelo fato do preço da energia negociada bilateralmente no ACL é menor que no ACR. Assim, o ganho financeiro com o deslocamento do consumo é maior no ACR.

Considerações finais:

Conclui-se que, no cenário analisado — seja pela ótica do sistema elétrico (via Programa de Eficiência Energética - PEE), seja pela ótica do consumidor com investimento próprio —, o projeto apresenta viabilidade econômica.

Além disso, é importante destacar que essa viabilidade tende a se tornar ainda mais atrativa ao longo do tempo, impulsionada pela evolução tecnológica e pela ampliação da escala

de adoção da solução, fatores que naturalmente contribuem para a redução dos custos envolvidos.

6. DIMENSIONAMENTO DO BESS: PONTOS DE ATENÇÃO

Para a definição dos critérios técnicos e de dimensionamento de um BESS, existem vários pontos a serem analisados, tais como:

- Capacidade e potência do sistema;
- Perfil de uso do sistema;
- Restrições de espaço;
- Critério mínimos de controle e supervisão;
- Funcionalidades;
- Viabilidade econômica.

6.1. REQUISITOS DE POTÊNCIA E CAPACIDADE

Embora a definição da capacidade da bateria seja um aspecto essencial, é imprescindível que este ponto seja apresentado como um requisito técnico de especificação e dimensionamento, especialmente para fins de análise financeira. Para isso, é necessário realizar a coleta estruturada de dados do projeto, incluindo, entre outros elementos:

- ***Funcionalidade a ser aplicada:***

O BESS possibilita atender diversas funções dentro de um projeto, como deslocamento de carga (*load shifting*), retirada de picos de potência predefinidos (*peak shaving*) e suporte a faltas de energia a cargas críticas (*backup*). A definição da atribuição do sistema de armazenamento, ou o conjunto de atribuições, influencia diretamente a capacidade e a potência que deverão ser consideradas no dimensionamento do sistema a ser entregue.

- ***Curva de carga da unidade consumidora:***

Compreender o comportamento da carga que será atendida pelo BESS é essencial para o correto dimensionamento do sistema. Devem ser utilizados dados de consumo com, no mínimo, um ano de histórico e resolução horária. Uma forma de identificar a curva de carga é através da análise da memória de massa, a qual pode ser solicitada à concessionária local.

- ***Perdas no ponto de conexão:***

Embora existam padrões mínimos de eficiência exigidos para os equipamentos durante o processo de aquisição do sistema, é importante considerar que podem ocorrer perdas entre a saída dos equipamentos e o ponto de conexão onde a demanda da carga será

efetivamente atendida. Essas perdas devem ser avaliadas no dimensionamento e na análise de desempenho do sistema.

- ***Tempo de despacho:***

Esse critério está relacionado à funcionalidade atribuída ao sistema de armazenamento. A partir dessa definição, determina-se o intervalo de tempo durante o qual a bateria deverá fornecer a capacidade de carga especificada.

6.2. **PERFIL DE USO DO SISTEMA**

As definições de funcionalidade citadas nos itens anteriores também são relevantes para entender como o perfil de uso emprega delimitações nos critérios de:

- ***Número de ciclos:***

Esse fator pode excluir inúmeras possibilidades de tecnologias de baterias, já que algumas tem baixa durabilidade cíclica de carga e descarga completa até chegar no fim da vida útil, ainda que exista possibilidade de reaproveitamento em uma segunda vida.

- ***Depth of Discharge (DoD):***

É a profundidade de descarga que a bateria poderá dispor, isto é, a porcentagem máxima da capacidade nominal do equipamento que de fato é utilizável. Quanto menor o DoD de uma determinada bateria, maior será a capacidade nominal exigida, aumentando assim o custo de implantação de um projeto.

- ***Temperatura máxima de célula:***

Esse parâmetro depende de fatores internos e externos, pois regiões com temperaturas elevadas podem limitar tecnologias sensíveis ao calor. Em alguns casos, mesmo um sistema de refrigeração eficiente não é capaz de evitar limitações operacionais, como redução na corrente de carga ou descarga e menor profundidade de descarga. Portanto, tecnologias com maior tolerância térmica proporcionam uma operação mais flexível e economicamente vantajosa do sistema de armazenamento.

- ***Tempo de vida útil do projeto:***

Esse item complementa a análise do número de ciclos necessários, uma vez que a vida útil de um BESS está vinculada não somente ao tempo em operação, mas principalmente à quantidade de ciclos completos que o projeto realizará. Por isso, ao definir a vida útil do projeto, é preciso considerar tanto o número de ciclos previstos quanto a vida útil exigida pelo projeto.

Esses são os principais critérios a serem considerados na definição dos parâmetros técnicos do sistema de armazenamento, de acordo com o perfil de uso ao qual ele será destinado.

6.3. RESTRIÇÃO DE ESPAÇO E DESAFIOS LOGÍSTICOS

Dependendo da capacidade e da tecnologia adotada no sistema de armazenamento de energia, podem existir requisitos de espaços físicos para instalação e refrigeração adequada dos equipamentos. Esse aspecto é relevante, principalmente, em locais com infraestrutura preexistente e espaço reduzido, situação comum em projetos.

Equipamentos com baixa densidade energética ou com dimensões físicas maiores exigem maior área de instalação, o que pode comprometer a viabilidade do projeto.

Além disso, certos tipos de baterias requerem metodologias específicas de refrigeração, que dependem de espaço ao redor dos equipamentos para permitir a circulação forçada de ar quente interno, sem afetar a eficiência do sistema.

Restrições logísticas, especialmente relacionadas ao peso, podem ser contornadas através de diferentes estratégias, como a montagem do equipamento diretamente no local de instalação, transportando os componentes desmontados até o destino. Isso é viável em casos específicos, principalmente quando há restrições de transporte, implementação interna ou capacidade física.

6.4. REQUISITOS DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

A definição das ações a serem tomadas pelo sistema supervisório e sua capacidade técnica em controlar ou supervisionar o sistema de armazenamento é particular de cada projeto e tecnologia empregada. Elementos como o tipo de inversor ou carregador, a metodologia de acoplamento e a quantidade de equipamentos instalados são escolhas específicas, que podem variar significativamente de acordo com a marca ou o modelo utilizado.

Por isso, existe um equipamento (*hardware e software*) chamado EMS (*Energy Management System*), que atua com base em parâmetros específicos definidos no projeto. O EMS pode concentrar informações de fontes de geração ou consumo que estejam conectadas ao sistema como um todo, funcionando como o centro de comando da planta elétrica.

Atualmente o uso do EMS é essencial em sistemas acoplados em corrente alternada (CA), onde o BESS é conectado no mesmo barramento das fontes geradoras e da carga. Sem o

EMS, o sistema de armazenamento não possui um “cérebro” capaz de realizar leituras e processar os dados necessários ao seu gerenciamento.

Na topologia de acoplamento em corrente contínua (CC), geralmente são utilizados inversores do tipo híbrido, que possuem capacidade de realizar a tomada de decisões, mesmo que limitada em alguns casos. Nesses casos, o EMS atua como um sistema supervisório, que trabalha como otimizador das funções e como coletor de dados.

Essa ampla capacidade de supervisão e controle permite a tomada de decisões corretas, com foco em ações preventivas e na otimização do desempenho do projeto. Assim, o EMS contribui para a eficiência do sistema, e para prevenir problemas elétricos e garantir o funcionamento adequado dos equipamentos.

6.5. OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DO DIMENSIONAMENTO

Quando se fala em analisar a viabilidade de um projeto no setor elétrico, o melhor Custo Nivelado de Energia, ou LCOE (*Levelized Cost of Energy*), é o objetivo a ser alcançado para que o empreendimento se apresente como financeiramente viável, em comparação a outros cenários possíveis.

Esse valor é definido, de forma básica, pela soma do investimento inicial com os custos totais durante o período de vida útil do projeto sobre a geração total do mesmo neste mesmo período (R\$/kWh), como apresentado na fórmula da Figura 14.

Figura 14 - Fórmula básica do cálculo de LCOE de um projeto.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{NPV of Total Costs Over Lifetime}}{\text{NPV of Electrical Energy Produced Over Lifetime}}$$
$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^{t=T} \frac{(I_t + M_t + F_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{t=T} \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

LCOE: custo nivelado de energia (*levelized cost of energy*);
I(t): capex (investimentos) no projeto (para cada ano t);
M(t): despesas com manutenção (para cada ano t);
F(t): despesas com combustível (para cada ano t);
r: taxa de desconto;
E(t): Montante total de energia gerada ao longo da vida útil do projeto;
T: vida útil do projeto (em anos);

Fonte: Newcharge, 2023.

Se o sistema de armazenamento for muito pequeno, ele pode não conseguir capturar energia suficiente para fornecer os benefícios econômicos desejados. Entretanto, se for muito grande, pode haver desperdício de capital e custos operacionais excessivos.

Portanto, essa metodologia permite aperfeiçoar o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia com base em considerações econômicas, visando a eficiência e a rentabilidade do projeto de energia.

7. PRINCIPAIS CUIDADOS NA ESCOLHA DE FORNECEDORES: BOAS PRÁTICAS

Na seleção dos equipamentos, é necessário considerar o fornecedor do sistema, visto que dependerá dele a entrega e posterior suporte técnico ao longo da vida útil do empreendimento.

Por isso, é crucial que a escolha dos fornecedores seja realizada de forma técnica e estratégica, considerando a viabilidade e os objetivos globais do projeto.

Em seguida, são apresentadas “Boas Práticas” que podem auxiliar essa escolha.

7.1. SUPORTE TÉCNICO

A importância de um suporte técnico eficiente e acessível é fundamental para a operação contínua e confiável dos Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE). A rápida resolução de problemas e a proximidade do fornecedor com a operação do sistema são essenciais para minimizar o tempo de inatividade e garantir a satisfação do cliente.

Portanto, ao selecionar fornecedores, é indispensável considerar os seguintes requisitos básicos de suporte técnico:

- **Equipe Técnica Preparada:**

- O fornecedor deve dispor de uma equipe técnica altamente qualificada, com conhecimento especializado em sistemas de armazenamento de energia.
- É recomendável que a equipe seja composta por profissionais certificados e experientes, capazes de lidar com uma ampla gama de questões técnicas.

- **Disponibilidade de Suporte:**

- Garantir que o suporte técnico esteja disponível 24 horas por dia, 7 dias por semana, para atender a emergências e resolver problemas críticos rapidamente.
- A disponibilidade de suporte deve incluir tanto atendimento remoto quanto presencial, conforme a gravidade e a natureza do problema.

- **Tempo de Resposta:**
 - Definir claramente os tempos de resposta esperados para diferentes níveis de suporte, desde consultas gerais até emergências.
 - Estabelecer um acordo de nível de serviço (SLA) que especifique os tempos máximos de resposta e resolução para garantir um atendimento eficiente.
- **Capacidades de Diagnóstico Remoto:**
 - O fornecedor deve oferecer ferramentas de diagnóstico remoto que permitam a identificação e resolução de problemas sem a necessidade de deslocamento.
 - Essas ferramentas devem incluir monitoramento contínuo do sistema, alertas automáticos e capacidade de atualização de software à distância.
- **Rede de Suporte Local:**
 - Preferencialmente, o fornecedor deve ter uma rede de suporte técnico local ou parceiros regionais capazes de fornecer assistência rápida e presencial.
 - A proximidade com a localização do cliente pode acelerar a resposta a problemas e facilitar a manutenção preventiva e corretiva.
- **Treinamento e Capacitação:**
 - O fornecedor deve fornecer programas de treinamento e capacitação contínuos para a equipe técnica do cliente, garantindo que eles estejam familiarizados com os sistemas e possam realizar manutenções básicas.
 - Incluir sessões de treinamento regular sobre novas atualizações, tecnologias e melhores práticas para a operação e manutenção dos sistemas de armazenamento.
- **Documentação e Suporte Técnico:**
 - Oferecer documentação técnica abrangente, incluindo manuais de operação, guias de solução de problemas e procedimentos de manutenção.
 - A documentação deve ser facilmente acessível e estar disponível em formato digital e impresso.
- **Acompanhamento e Relatórios:**
 - Implementar um sistema de acompanhamento de chamados e fornecer relatórios detalhados de todas as interações de suporte técnico, incluindo diagnóstico, ações tomadas e status de resolução.
 - Estes relatórios devem ser compartilhados regularmente com o cliente para garantir transparência e rastreabilidade dos serviços prestados.

7.2. PRAZOS DE ENTREGA E DE ATENDIMENTO

Atualmente, o número de fornecedores de sistemas de armazenamento de energia atuantes no mercado brasileiro ainda é pequeno. Muitos desses fornecedores ainda possuem pouca maturidade técnica para atender as demandas requisitadas, reflexo do estágio inicial de desenvolvimento desse setor no país. Desse modo, o cronograma do projeto precisa considerar a possibilidade de importação do BESS como alternativa viável.

Em casos em que a fabricação do BESS seja nacional, dependendo do porte do projeto de SAE, os prazos de entrega poderão ser superiores aos da importação, devido à indisponibilidade imediata desse tipo de equipamento no mercado interno. Nesses casos, é necessária a fabricação sob encomenda. Em contraste, o mercado chinês, por exemplo, costuma manter uma alta quantidade de produtos em estoque para exportação, em razão da alta demanda local e internacional.

Assim, é relevante analisar os seguintes aspectos:

- fatores tarifários de importação nos custos;
- metodologia de logística e entrega;
- prazos estipulados e históricos dos casos anteriores nos quais o prazo foi cumprido;
- avaliar se o atendimento prestado pelo fornecedor está sendo realizado de forma fluida e com total prontidão.

7.3. PEÇAS SOBRESSALENTES

Não é comum que fornecedores disponibilizem peças sobressalentes por padrão. Por isso, é essencial analisar quais periféricos e componentes principais devem possuir um percentual de reserva. Isso é uma escolha individual que deve ser tomada visando atender os possíveis problemas de mal funcionamento ou efeitos externos que poderão causar danos e essencial troca da peça.

Com base nessa análise, recomenda-se estabelecer critérios para modularidade e reserva de componentes, como baterias, células e placas eletrônicas. A ausência de sobressalentes pode resultar em perdas significativas, especialmente considerando possíveis atrasos na reposição e a consequente interrupção total ou parcial da operação da planta.

Um padrão que pode ser utilizado, é ter como base de sobressalência equipamentos como baterias, inversores, componentes elétricos e eletrônicos principais. O recomendado é ter, no mínimo, uma peça, ou 10% da quantidade existente no projeto.

Contudo, essa recomendação deve ser ponderada, pelo fato de que, alguns equipamentos, como as baterias eletrolíticas, possuem como um dos critérios de vida útil a tensão de célula. Se essas baterias ficarem inativas por longos períodos, podem atingir níveis abaixo do limite mínimo de tensão, tornando-se inutilizáveis quando finalmente forem acionadas. Isso exige cuidados específicos no armazenamento e monitoramento desses sobressalentes.

7.4. ESTRATÉGIAS DE REPOSIÇÃO DA DEGRADAÇÃO (AUGMENTATION)

Durante o dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia, é imprescindível considerar a possibilidade de expansão do BESS, especialmente diante do potencial aumento das cargas a serem atendidas. Além disso, levando em conta a necessidade de substituir equipamentos que, ao longo do tempo, possam apresentar baixa eficiência e comprometer o desempenho geral do sistema, é recomendada a adoção de uma estratégia conhecida como '*augmentation*'. Esse recurso, na etapa inicial de parametrização do projeto, permite que futuras expansões ou modificações sejam realizadas de forma prática e eficaz. Assim, reformulações complexas são evitadas em modificações futuras.

De modo geral, quando o sistema é projetado com previsibilidade de aumento, é possível reservar espaços físicos, definir conexões elétricas apropriadas e prever proteções específicas. Isso evita que a adição de capacidade futura exija alterações estruturais no projeto original ou até mesmo a elaboração de um novo projeto completo.

7.5. PREÇO GLOBAL

No custo total de um sistema de armazenamento, é essencial compreender que a compra dos equipamentos e a contratação da equipe de instalação não são os únicos fatores relevantes. Processos de modificações estruturais, passagens de cabeamentos e instalações de chaveamento e sistemas de proteção são componentes significativos do preço total do empreendimento.

Dentre os principais elementos que compõem o valor global do projeto, destacam-se:

- *Logística total;*
- *Compra dos equipamentos e periféricos;*
- *Mão de Obra;*
- *Alterações estruturais ou construções civis;*

- *Aquisição de cabeamentos e miscelâneas;*
- *Quadros elétricos (incluindo proteção e medição);*
- *Sistema supervisório (EMS – Energy Management System).*

7.6. HISTÓRICO DE PROJETOS

Projetos de sistemas de armazenamento de energia representam um investimento elevado, principalmente em relação ao *CAPEX* (valor de compra do projeto).

Em vista disso, é imprescindível selecionar fornecedores que possuam um histórico comprovado de projetos bem-sucedidos, abrangendo desde o fornecimento dos equipamentos e a operação, até suporte pós-venda.

Optar por empresas sem experiência consolidada ou que ainda estão em fase de testes com seus produtos pode gerar riscos significativos, como falhas operacionais, atrasos logísticos ou ausência de suporte técnico adequado.

Esses aspectos impactam diretamente todas as etapas do projeto, como aquisição, transporte, implementação, assistência técnica e reposição de componentes, podendo comprometer a confiabilidade e continuidade do empreendimento.

7.7. INSTALAÇÃO E COMISSIONAMENTO

A implementação de projetos de armazenamento de energia no Brasil ainda é escassa. Por isso, a disponibilidade de mão de obra especializada nesse tipo de serviço é restrita. Frequentemente, os profissionais não possuem familiaridade com a tecnologia ou não têm a devida capacitação técnica para realizar as atividades corretamente.

Mesmo que a implementação de um BESS não tenha muita complexidade elétrica e física, uma vez que a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado são *plug-and-play*, existem necessidades específicas de proteção ou modificações elétricas e de supervisórios que exigem conhecimento especializado, como:

- Alteração em proteções de relés de média tensão;
- Estudos de curto-circuito;
- Análises de queda de tensão;
- Sincronização de sistemas de controle e supervisão com outras fontes de geração, como quando incluído em plantas híbridas.

Cada instalação possui particularidades técnicas e estruturais que devem ser levadas em consideração no momento do escopo do fornecimento dos equipamentos e equipes de instalação. Essas singularidades podem variar desde uma simples instalação residencial com inversor híbrido, que se assemelha a projetos fotovoltaicos *on-grid*, até um projeto complexo de hibridização em usinas fotovoltaicas de geração centralizada.

A mesma situação ocorre durante o comissionamento do BESS. É importante validar que cada passo definido em projeto executivo foi seguido e que os critérios técnicos exigidos em normas e manuais dos fornecedores foram fielmente alinhados com a situação da instalação.

Fornecedores de sistemas de armazenamento geralmente disponibilizam procedimentos detalhados de *startup*, que devem ser seguidos com rigor e devidamente registrados. Isso também inclui os procedimentos de medição de temperatura, de tensões e de correntes, e verificações visuais de possíveis problemas na instalação que só são reconhecidos posterior a inicialização do sistema.

7.8. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

7.8.1. Medição e verificação de parâmetros operativos

Existem vários pontos que precisam ser monitorados e medidos durante a operação do sistema. Alguns são críticos e invariáveis, independentemente da tecnologia ou especificações do projeto. Dentre eles, estão:

- **Nível de Carga:** O nível de carga da bateria ou do sistema de armazenamento, que indica quanto da capacidade total de armazenamento de energia está sendo usada. Esse parâmetro é fundamental para garantir que a bateria não seja descarregada completamente, o que pode prejudicar sua vida útil.
- **Tensão de operação:** A tensão elétrica do sistema, que é monitorada para garantir que permaneça dentro de limites seguros durante a carga e a descarga. Variações significativas de tensão podem indicar problemas no sistema, seja do lado CC quanto do lado CA.
- **Corrente de operação:** A corrente elétrica fluindo para dentro ou para fora do sistema de armazenamento de energia. A medição da corrente é importante para controlar a taxa de carga e descarga da bateria visando problemas de surtos ou sobrecorrentes.

- **Potência:** A potência elétrica sendo gerada ou fornecida pelo sistema de armazenamento de energia em tempo real. Isso ajuda a determinar o desempenho atual do sistema.
- **Eficiência:** A eficiência do sistema, que é a relação entre a energia útil fornecida e a energia consumida. A eficiência é uma métrica crítica para avaliar o quanto bem o sistema está convertendo a energia.
- **Temperatura:** A temperatura do sistema de armazenamento de energia, incluindo a temperatura ambiente e a temperatura interna da bateria. O monitoramento da temperatura é essencial para garantir a segurança e a vida útil dos componentes.
- **Ciclos de Carga e Descarga:** Quantifica quantas vezes a bateria foi carregada e descarregada. Isso é importante para avaliar a degradação da bateria ao longo do tempo.
- **Estado de Carga (SOC - State of Charge):** Indica a porcentagem de energia disponível em relação à capacidade nominal da bateria. Ajuda a determinar a quantidade de energia que ainda pode ser armazenada ou retirada da bateria.
- **Estado de Saúde da Bateria (SOH - State of Health):** Reflete a saúde geral da bateria ao longo do tempo, considerando fatores como perda de capacidade e eficiência. Esse parâmetro ajuda a determinar quando a bateria pode precisar ser substituída.
- **Densidade de Energia:** A quantidade de energia armazenada em relação ao volume ou peso do sistema. É um parâmetro importante para avaliar o tamanho e a portabilidade do sistema.
- **Sinais de Falha:** Os sistemas de armazenamento de energia monitoram sinais de falha, como curtos-circuitos, sobreaquecimento e tensão fora dos limites de segurança. Esses sinais podem acionar medidas de proteção para evitar danos ao sistema.
- **Comunicação e Monitoramento Remoto:** Os sistemas frequentemente incluem recursos de comunicação para permitir o monitoramento remoto e a supervisão, além de relatórios de dados em tempo real.

7.8.2. Principais rotinas de O&M

Os sistemas de armazenamento de energia apresentam particularidades físicas e operacionais distintas no que diz respeito às rotinas de O&M (operação e manutenção). Por exemplo, sistemas baseados em armazenamento de energia cinética exigem cuidados divergentes em relação a sistemas que usam baterias eletroquímicas. Porém, existem rotinas comuns, que se aplicam à maioria dos projetos e tecnologias.

Uma das atividades mais fundamentais na O&M de um BESS é o monitoramento em tempo real. Isso envolve a supervisão constante do sistema para garantir que ele esteja operando dentro dos parâmetros especificados. Sensores são usados para coletar dados sobre tensão, corrente, temperatura e estado de carga das baterias, permitindo uma análise contínua do desempenho do sistema.

Além do monitoramento contínuo, testes de desempenho periódicos precisam ser realizados. Esses testes avaliam a capacidade de carga e descarga do sistema, garantindo que os requisitos de ciclo de vida sejam atendidos. O objetivo é identificar qualquer degradação precoce das baterias ou outros componentes e tomar medidas corretivas apropriadas.

Além disso, monitorar o número de ciclos e a profundidade de descarga (DoD) das baterias é essencial para prolongar sua vida útil e otimizar o desempenho.

O gerenciamento térmico também é uma parte crítica da O&M de um BESS, pois temperatura influencia diretamente a eficiência e a vida útil dos componentes. Manter a temperatura das baterias dentro de limites seguros é essencial para a segurança e durabilidade do conjunto. Assim, sistemas de refrigeração ou aquecimento podem ser necessários, dependendo das condições ambientais e da tecnologia utilizada.

Outra parte importante da O&M é a manutenção preventiva. Isso envolve inspeções regulares de todos os componentes do sistema, incluindo cabos, conexões, inversores e baterias. Qualquer peça desgastada ou defeituosa deve ser substituída antes que possa causar falhas no sistema. A calibração regular dos sensores de monitoramento também é uma etapa crítica para garantir que os dados coletados sejam precisos e confiáveis. Isso ajuda a evitar diagnósticos errôneos e assegura que as ações corretivas sejam apropriadas.

Além disso, testes de segurança precisam ser realizados para garantir que os sistemas de proteção, como disjuntores e sistemas de extinção de incêndio, funcionem corretamente em emergências. Manter a área ao redor do BESS limpa e livre de detritos é fundamental para a prevenção de danos e o bom funcionamento do sistema. Além disso, a documentação completa de todas as operações de O&M, incluindo inspeções, testes e

manutenção, é essencial para o registro de histórico e o acompanhamento do desempenho ao longo do tempo.

O treinamento regular da equipe de operação e manutenção é fundamental para garantir familiaridade com os procedimentos e protocolos de segurança. Manter estoques de peças sobressalentes críticas também é uma prática inteligente para permitir a substituição rápida em caso de falhas.

Por fim, manter o software e o firmware atualizados é importante para garantir o desempenho ideal e a segurança do sistema, bem como estabelecer um sistema eficaz de gerenciamento de alarmes para identificar e responder a falhas ou eventos anormais de imediato.

7.9. GESTÃO DE RESÍDUOS E DESCARTE DO SAE

A implementação de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) exige uma avaliação criteriosa não apenas dos aspectos técnicos e econômicos, mas também das implicações ambientais ao longo do ciclo de vida das tecnologias empregadas.

Embora ainda não existam normas específicas voltadas para o descarte de sistemas de armazenamento de energia elétrica, a escolha de fornecedores que adotam práticas sustentáveis de gestão de resíduos é essencial para minimizar os impactos ambientais desses sistemas.

Um marco regulatório que pode servir de referência para o descarte deste tipo de tecnologia é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2010), que estabelece diretrizes importantes para a gestão integrada e o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos. Essa lei promove a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares de serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos.

Portanto, ao selecionar fornecedores para projetos de SAE, é **fundamental considerar aqueles que demonstram conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos**, ou que possuam programas robustos de reciclagem e descarte adequado.

Essa escolha não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também pode agregar valor ao projeto, garantindo alinhamento com práticas regulatórias e de responsabilidade socioambiental.

Além disso, fornecedores comprometidos com essas práticas tendem a oferecer maior transparência e confiabilidade com a gestão ambiental de longo prazo.

8. PROCEDIMENTOS E EXIGÊNCIAS TÉCNICAS PARA CONEXÃO ELÉTRICA DE BESS

Atualmente não existem definições de critérios técnicos ou normativas nacionais que determinam qual o tipo de proteção, estabilidade, limitação de potência ou até possibilidade ou não de injeção de energia despachada na rede conectada. Desta forma, alguns métodos podem ser aplicados para que haja alinhamento e eficácia na tratativa de instalação e entrada em operação de sistemas de armazenamento no método *on-grid*.

8.1. DEFINIÇÃO DE REQUISITOS TÉCNICOS PARA CONEXÃO

As definições devem seguir pontos alinhados com a distribuidora de energia responsável pelo fornecimento de energia no local onde se deseja instalar o SAE.

Possibilidades como workshops, reuniões com empresas instaladoras com cases de êxito, fornecedores com projetos similares e até mesmo outros players do exterior, poderão levantar informações que trarão respostas práticas e robustas para responder critérios como:

- Necessidades de proteções específicas;
- Requisitos de estabilidade e controle;
- Certificações específicas;
- Limitações de potência;
- Controle de Operação remota pela concessionária;
- Iteração com outras fontes renováveis ou térmicas;
- Tempo máximo para desconexão por falhas;
- Possibilidade de injeção de excedente na rede;
- Critérios de topologia de conexão.

Esses pontos são apenas alguns dos itens que deverão ser avaliados em conjunto com o corpo técnico que estará envolvido desde a concepção do projeto até a operação e manutenção do ativo.

8.2. ATENDIMENTO A NORMAS TÉCNICAS INTERNACIONAIS

Devido à falta de normas nacionais para projetos de sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil, a metodologia utilizada nos parâmetros de detalhamento técnico dos equipamentos fica baseada em normas internacionais. Essa definição não afeta o escopo

dos projetos, principalmente pelo fato dessas normas serem a base de várias definições normativas brasileiras. A robustez e a confiabilidade dessas normas ficam evidentes em projetos internacionais bem-sucedidos e em plena expansão, servindo como referência segura e validada para o mercado nacional.

As normas mais recorrentes variam conforme o tipo de tecnologia empregada, mas entre as principais, destacam-se:

- IEC 60086 - *Primary batteries*.
- IEC 62619 - *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications*.
- IEC 62040 - *Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements*.
- UN 38.3 - *Certification for Lithium Batteries* (específica para baterias de lítio).
- UL 1973 - *Batteries for Use in Stationary and Motive Auxiliary Power Applications*.
- IEEE 1547 - *Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interface*.
- IEC - *Flow battery energy systems for stationary applications - Part 1: Terminology and general aspects*.
- UL 9540 - *Standard for Energy Storage Systems and Equipment*.
- UL 9540A - *Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems*.

Existem diversas outras normas que podem ser adotadas como critério técnico na definição de escopo do projeto. Entretanto, é preciso entender que cada tecnologia tem influências distintas na escolha dessas referências normativas. Por exemplo, as UHRs não têm apenas as normas de armazenamento como base, mas também normas envolvendo a implementação de usinas geradoras de energia hídrica.

É importante lembrar que, como a maioria dos fornecedores são internacionais, os equipamentos geralmente seguem os padrões internacionais, garantindo compatibilidade com as exigências técnicas do mercado brasileiro.

8.3. PRAZOS E CONFORMIDADES

Toda a metodologia de definição de critérios técnicos deverá ser contemplada no processo de solicitação e liberação do projeto, formalizada por meio de parecer de acesso. Esse documento deve conter todas as informações pertinentes e discriminantes para que o processo de homologação e autorização do projeto possa ser efetivamente liberado pela concessionária.

Dessa forma, recomenda-se que seja feito um alinhamento prévio com a distribuidora de energia, com o objetivo de determinar quais documentos serão exigidos. Essa ação pode reduzir significativamente o tempo de liberação do processo e facilitar o entendimento de ambas as partes, resultando na fluidez e eficácia da instalação do projeto.

Referências

ALUKO, A.; KNIGHT, A. **A Review on Vanadium Redox Flow Battery Storage Systems for Large-Scale Power Systems Application.** IEEE Access, vol. 11, pp. 13773-13793, 2023.
DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243800.

ASSUNÇÃO, Milton J. **Modelagem matemática de baterias redox de vanádio**, 2015.
Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - USP, São Carlos SP.

BERRADA, A.; EMRANI, A.; AMEUR, A. **Life-cycle assessment of gravity energy storage systems for large-scale application.** Journal of energy storage, v. 40, n. 102825, p. 102825, 2021.

BLOOMBERG. BloombergNEF. Disponível em: <https://about.bnef.com/>.

CANALLES et al. **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicações e perspectivas.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, DOI: 10.5902/2236117016002, 04/03/2015.

CASTRO, N. J.; BRANDAO, R.; CATÓLICO, A. C. C. **Usinas hidrelétricas reversíveis - um novo negócio?** 2018; Disponível em: https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/12_castro178.pdf.

DANIEL, Luciano; POLASEK, A. **Aplicações de SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) em Sistemas de Potência.** In: XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2014, Foz do Iguaçu.

EA TECHNOLOGY (United Kingdom). **A Good Practice Guide on Electrical Energy Storage.** Energy Storage Operators Forum, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://eatechnology.com/media/xiolqqqa/good-practice-guide-file-size-reduced-1.pdf>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Caderno de Monitoramento: Mercado de Mini e Microgeração Distribuída - Baterias. 2^a ed. [S.I.]: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topicos-591/Caderno_MMGD_Baterias_rev2022.pdf.

GOVERNO FEDERAL. Ministério de Minas e Energia. Sistemas de Armazenamento em Baterias: Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento. Novembro de 2019.

GREENER e NEWCHARGE. Estudo Estratégico do Mercado de Armazenamento de Energia no Brasil 2021. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-do-mercado-de-armazenamento-de-energia-no-brasil-2021/>.

JACINTO JUNIOR, S. G.; QUINTELLA, S. A.; ALVES, D. R.; CONDE, I. B.; CASTRO, J. S. de; LEITINHO, J. L. **Fuel cells: possibilities and limitations.** Research, Society and Development, [S. I.], v. 11, n. 5, p. e40111528522, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i5.28522.

LANE, A. **Can gravity batteries solve our energy storage problems?** BBC, 17 maio 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20220511-can-gravity-batteries-solve-our-energy-storage-problems>.

MOORE, S. K. **Gravity energy storage will show its potential in 2021.** Disponível em: <https://spectrum.ieee.org/gravity-energy-storage-will-show-its-potential-in-2021>.

OLIVEIRA, J. **Sistema de Armazenamento de Energia em Bobinas Supercondutoras,** 2010. TESE: (Mestrado em Física). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

SANTOS, A. **Sistemas de armazenamento de energia: o que são e para que servem? -** ABB Loja Online. Disponível em: <https://loja.br.abb.com/blog/post/sistemas-de-armazenamento-de-energia>.

SENGE-PI. Conheça as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs), 5 ago. 2020. Disponível em: <http://www.senge-pi.org.br/artigo/conheca-as-usinas-hidreletricas-reversiveis-uhrs>.

SPITTHOFF, L.; SHEARING, P. R.; BURHEIM, O. S. Temperature, Ageing and Thermal Management of Lithium-Ion Batteries. Energies 2021, 14, 1248. DOI: 10.3390/en14051248.

TOSHIBA. How lithium-ion batteries works? Disponível em: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/module/sip/download/batteryschool/episode1.html>.

UFES. Dimensionamento de um sistema de baterias de fluxo redox de vanádio para um shopping center, 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - UFES, Vitória.

ZHANG, J.W.; WANG, Y.H.; LIU, G.C.; TIAN, G.Z. A review of control strategies for flywheel energy storage system and a case study with matrix converter. Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 3948-3963, ISSN 2352-4847.

ZEH, Alexander; WITZMANN, Rolf. Operational Strategies for Battery Storage Systems in Low-voltage Distribution Grids to Limit the Feed-in Power of Roof-mounted Solar Power Systems. Energy Procedia, Volume 46, 2014, Pages 114-123, ISSN 1876-6102.

Manual de Boas Práticas em Sistemas de Armazenamento de Energia

Lições aprendidas e recomendações



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

