

# Análise de Tecnologias para Sistemas de Armazenamento de Energia

Rayssa Silva Leal\* Lucas Vinicius Hartmann\*  
Camila Seibel Gehrke\* Fabiano Salvadori\*

\* Universidade Federal da Paraíba - UFPB  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR  
Smart Grid Group - SG2  
João Pessoa - PB - Brasil (e-mail: salvadori.fabiano@cear.ufpb.br).

**Abstract:** Currently, energy storage is fundamental in terms of the supply and maintenance of electricity. This is mainly due to the fact that energy storage systems (ESS) can provide grid stability, increase the insertion of distributed energy resources, conserve fossil fuels and, consequently, reduce the environmental impact of power generation. In this sense, this paper shows a review of different storage systems, as well as technologies associated with those systems. Thus providing greater focus to ESS which are composed of batteries. In this way, the study was promoted through the scientific analysis of several references that address the theme of storage. In which, through these studies, it was possible to obtain the characterization of such technologies from the perspective of functioning, in order to provide a clearer view on the applicability of ESS for different purposes.

**Resumo:** Atualmente, o armazenamento de energia apresenta-se como fundamental no que se refere ao suprimento e manutenção da energia elétrica. Isso se deve, principalmente, ao fato de que sistemas de armazenamento de energia (*ESS - Energy Storage System*) podem proporcionar estabilidade da rede, aumento da inserção de recursos de energia renovável, conservação de recursos energéticos fósseis e reduzir o impacto ambiental de geração de energia. Nesse sentido, este trabalho apresenta uma revisão sobre diferentes sistemas de armazenamento, bem como tecnologias associadas a esses sistemas. Fornecendo assim maior enfoque aos *ESS* que são compostos por baterias. Desse modo, o estudo foi fomentado através da análise científica de diversas referências que abordam a temática de armazenamento. Em que, por meio desses estudos, foi possível obter a caracterização de tais tecnologias sob a perspectiva de funcionamento, de modo a fornecer uma visão mais clara sobre a aplicabilidade de *ESS* para diferentes fins.

**Keywords:** Batteries; Distributed energy resources; Storage systems.

**Palavras-chaves:** Baterias; Recursos energéticos distribuídos; Sistemas de armazenamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Na atualidade é percebido que a demanda energética mundial é crescente. O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas impulsionou o consumo de energia elétrica e a necessidade de desenvolver sistemas para que essa possa ser armazenada. Desse modo, para que se possa atender as necessidades atuais, a energia elétrica deve ser disponível a todos em tempo integral e em quantidade precisa e necessária. Sendo assim, pode-se concluir a grande necessidade de que não haja falhas no fornecimento de energia elétrica que alimenta os sistemas vitais de empresas, hospitais, indústrias entre outros. Portanto, a energia deve ser estável, de boa qualidade, e essencialmente, não deve sofrer interrupções durante o fornecimento dessa, tendo em vista que estas interrupções podem acarretar em grandes prejuízos, com perdas materiais, econômicas e até mesmo humanas (Bueno and Brandão, 2015).

Destaca-se que, a inserção de fontes de energia renováveis (*renewable energy sources - RES*) e de outras formas de potenciais fontes de geração distribuída está aumentando, em 2019, estas fontes possuíam uma capacidade instalada mundial de 2.536.853 (MW) (IRENA, 2020). Tais tecnologias, de modo geral, dependem de condições naturais para funcionar de forma eficaz. É o caso da energia eólica e da energia solar que caracterizam-se por serem fontes de geração com comportamento intermitente, dependentes do vento e do sol respectivamente.

Assim, o crescente aproveitamento destas fontes de energias caracterizadas como intermitentes, torna necessário o armazenamento da energia gerada para que se mantenha o equilíbrio entre demanda e oferta. Nesse sentido, pode haver grandes flutuações na produção de energia em ciclos diários, mensais ou mesmo anuais. Da mesma forma, a demanda pode variar diariamente, mensalmente ou anualmente. Assim, para que essas novas fontes se tornem mais confiáveis como fontes primárias de energia, a inserção de

\* Rayssa Silva Leal é aluna PIBIC/CNPq.

tecnologias para o armazenamento de energia torna-se um fator essencial (Seibel Gehrke et al., 2019).

Neste cenário, surge a tendência da aplicação de sistemas de armazenamento de energia (*energy storage system - ESS*). As tecnologias *ESS* refere-se ao processo de conversão de energia, que de modo geral relaciona-se à energia elétrica, para uma forma de energia que possa ser estocada em um meio material, de modo que essa energia possa ser convertida novamente para energia elétrica quando necessário (Luo et al., 2015). Os *ESSs* podem ser aplicados para gerenciamento de energia, “*peak shaving*”, fluxo de carga, suporte de tensão, “*black start*”, regulação de frequência, qualidade de energia, confiabilidade de energia entre outras funcionalidades (Faisal et al., 2018).

Existem várias tecnologias associadas aos *ESSs*, e nem toda tecnologia para armazenamento é apropriada para determinado tipo de aplicação. É necessário que haja um estudo adequado de modo que possam ser melhor atendidos os requisitos necessários para cada situação (EPE, 2019). No que se refere a diferentes aplicações e capacidades, o sistema de armazenamento por meio de baterias (*battery energy storage system - BESS*) apresenta grande potencial e destaca-se como uma das principais tecnologias a ser utilizada.

Esse potencial corresponde ao fato de que os *BESSs* apresentam rapidez de resposta, queda no custo, podem prover maior autonomia energética, maior segurança de suprimento, fornecendo reserva para cargas prioritárias e oportunidade de otimização dos custos com a conta de energia (EPE, 2019; Silva and Silva, 2016).

O presente trabalho apresenta uma revisão do estado da arte acerca dos diferentes métodos de armazenamento, de modo particular ao *BESS* e as respectivas tecnologias de baterias utilizadas. Desse modo, ao decorrer deste documento serão apresentadas as particularidades de *ESS*, e como ocorre o funcionamento desses, fazendo uma análise de fatores importantes, dentre eles a densidade de energia, densidade de potência, bem como ao custo associado a essas tecnologias.

## 2. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Há várias tecnologias de armazenamento disponíveis no mercado, e, em diversos estágios de maturidade, desde a pesquisas de ponta até aplicações comerciais. Tecnologias de *ESS* podem ser categorizadas em: (a) mecânicas (armazenamento hidroelétrico bombeado, ar comprimido e volantes de inércia); (b) eletroquímicos (baterias recarregáveis, baterias de fluxo); (c) elétricas (capacitores, supercapacitores e armazenamento de energia magnética supercondutora); (d) termoquímica (combustíveis solares); e, (e) armazenamento através da energia térmica (veja Figura 1) (Luo et al., 2015).

### 2.1 Sistemas de Armazenamento Mecânico

**Hidroelétrico Bombeado** Consistem do aproveitamento hidroelétrico reversível (*pumped hydro storage - PHS*), provêm ao sistema armazenamento de energia potencial através da transferência de água entre dois reservatórios a



Figura 1. Classificação das tecnologias *ESS*

alturas diferentes. A reversibilidade permite utilizar o excesso de energia da rede para bombear a água para o reservatório com maior energia potencial. Apresenta vantagens tais como: grandes quantidades de energia armazenada a baixo custo e elevado rendimento. Pode-se mencionar como desvantagens: a necessidade de locais específicos para instalação e o impacto ambiental para implantação dos reservatórios (Connolly et al., 2011; Rehman et al., 2015).

**Ar Comprimido** A tecnologia composta pelo armazenamento de ar comprimido (*compressed air energy storage - CAES*), consiste na estocagem de energia na forma de ar comprimido, fazendo-o através de um compressor elétrico. O ar ao ser liberado é então aquecido através de uma queima de gás natural, o que provoca o acionamento de uma turbina/gerador *CAES*. Apresenta vantagens como: elevado nível de energia e potência e baixo custo por MWh. Apresentam como desvantagens: a grande dependência de condições geológicas, além de que, normalmente fazem o uso da queima de gás (Luo et al., 2015; Martins Pastuch et al., 2019).

**Volantes de Inércia - Flywheel** Sistemas de armazenamento compostos por volantes de inércia (*flywheel energy storage - FES*), realizam o armazenamento de energia cinética rotacional num rotor (*flywheel*), que ao girar permite ao sistema reutilizar sua rotação para que haja a conversão em energia elétrica. Este sistema apresenta benefícios de elevada densidade de potência, baixo impacto ambiental e elevado tempo de vida útil. Por outro lado, apresentam como desvantagens desse sistema, a baixa densidade de energia e alto custo de manutenção (Faisal et al., 2018; Mahlia et al., 2014).

### 2.2 Sistemas de Armazenamento Elétrico

**Capacitores e Supercapacitores** Sistemas de armazenamento que são desenvolvidos através de capacitores e supercapacitores exibem vantagens por apresentar rapidez de resposta, rendimento elevado, maior vida útil média quando comparado a outros sistemas, além de elevado número de ciclos. Possuem a desvantagem da necessidade de realizar o condicionamento da potência e baixa capacidade de energia armazenada (Seibel Gehrke et al., 2019; Luo et al., 2015).

**Supercondutores Magnéticos** Sistemas de armazenamento compostos por elementos supercondutores magné-

ticos (*superconducting magnetic energy storage - SMES*), realizam o armazenamento de energia na forma de um campo magnético gerado por uma bobina supercondutora. São vantagens desse sistema o rápido tempo de resposta e carregamento e elevada densidade de potência. Por outro lado, os *SMES* apresentam baixo níveis de energia, e, são complexos e de alto custo se comparados a outras tecnologias *ESS* (Luo et al., 2015; Xin Zhou et al., 2011).

### 2.3 Sistemas de Armazenamento Termoquímico

**Combustível Solar** Tecnologia *ESS* (*fuel solar*) relativamente nova, ainda em desenvolvimento, consiste na utilização da luz solar, capturada por fotossíntese, que é armazenada em ligações químicas. Apresentam-se como vantagens desse sistema a necessidade de altas temperaturas e de uma grande área para instalação do sistema. A tecnologia *fuel solar* pode vir a ser rentável para aplicações *ESS* no futuro (Luo et al., 2015).

### 2.4 Sistemas de Armazenamento Eletroquímico

**Baterias Secundárias** Dispositivos de armazenamento de energia elétrica em que o princípio de funcionamento consiste na conversão de energia química em energia elétrica através de reações eletroquímicas de redução e oxidação (Mahlia et al., 2014). As baterias são classificadas como primárias (não podem ser recarregadas) e secundárias (quando podem ser recarregadas). Os *BESS*, proporcionam ao sistema elevado rendimento e possibilidade de aplicações portáteis. Por outro lado, exibem problemas de segurança e ambientais, em casos de avaria no equipamento e tempo de vida limitado (Boicea, 2014).

**Baterias de Fluxo Regenerativo** Possuem a capacidade de armazenar energia através de uma reação química entre duas soluções eletrolíticas líquidas. Configuram-se como soluções químicas mais comuns o brometo de Zinco (*ZnBr*), polissulfeto de brometo (*PSB*) e Redox de vanádio (*VRB*). Sistemas compostos por essa tecnologia apresentam vantagens por possuir valor de potência e energia independentes, tempo de vida longa e etc.. Em contrapartida, as baterias de fluxo resultam em sistemas mais complexos em comparação a sistemas que utilizam baterias convencionais (Faisal et al., 2018; Mahlia et al., 2014).

### 2.5 Sistemas de Armazenamento Químico

**Hidrogênio** Nesse tipo de tecnologia a energia elétrica é convertida em hidrogênio e armazenada em tanques de alta pressão, tanques criogênicos ou no estado sólido. Posteriormente pode então ser convertida em eletricidade através de células combustíveis. Esse sistema apresenta a vantagem de produzir baixo impacto ambiental e pode ser viável para aplicações de geração distribuída em larga escala. Por outro lado, possui elevado custo de capital, e também apresenta baixa densidade de energia em determinadas temperaturas (Beaudin et al., 2010; Luo et al., 2015).

### 2.6 Sistemas de Armazenamento Térmico

**Sensível ao Calor** Essa tecnologia pode ser considerada o método mais comum de armazenamento de energia térmica (*thermal energy storage - TES*). Recorre à transferência de energia entre matéria, aumentando sua temperatura

sem que haja alteração de estado, no caso mais comum a energia solar é transferida para um sal fundido. Quando necessário o sal fundido circula até um gerador de vapor alimentando desse modo um gerador/turbina (Luo et al., 2015). Pode-se citar como vantagens desse sistema a possibilidade de aplicação em larga escala e custo relativamente baixo. Por outro lado, apresenta a desvantagem de ser utilizada apenas em centrais solares térmicas (Mahlia et al., 2014).

## 3. TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICO: BATERIAS

Baterias são o resultado da junção de várias células eletroquímicas e podem ser classificadas como secundárias ou primárias. As secundárias configuram-se como baterias recarregáveis, sendo essa um dos *EES* que apresentam maior atuação na indústria e na vida cotidiana. A figura 2 mostra o processo simplificado do princípio operacional de um sistema *BESS* típico. Um sistema *BESS* consiste de um número de baterias conectadas em série ou paralelo, que produzem eletricidade com a tensão desejada, fazendo-o a partir de uma reação química. Nesse seguimento, uma célula pode converter bidirecionalmente a energia disponível entre energia elétrica e química. Durante a descarga as reações eletroquímicas ocorrem nos ânodos e nos cátodos de forma simultânea. Para o circuito externo, elétrons são fornecidos a partir dos ânodos e são coletados nos cátodos. Durante o carregamento, as reações reversas acontecem e a bateria é recarregada aplicando uma tensão externa aos dois eletrodos (Luo et al., 2015). Os dispositivos de armazenamento eletroquímico estão disponíveis em diferentes proporções de tamanho, fato que corresponde a umas das principais vantagens dessas tecnologias. Assim, os sistemas de armazenamento eletroquímico (*Electrochemical Storage Systems - EcSS*) podem ser compostos por diversas tecnologias (Faisal et al., 2018). Essas que serão discutidas nas subseções a frente.

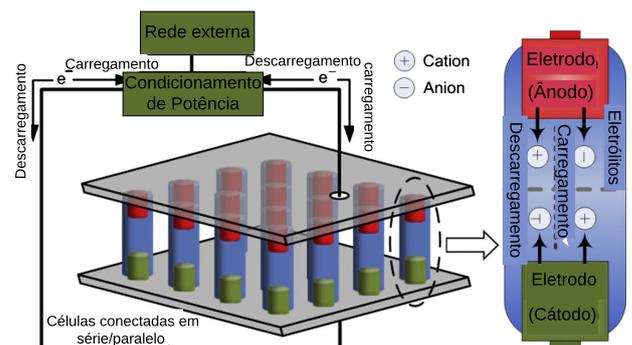


Figura 2. Diagrama esquemático da operação de *BESS* adaptada de Luo et al. (2015)

### 3.1 Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido (*Lead-Acid Battery*), são consideradas uma das tecnologias mais antigas, no que se refere a baterias recarregáveis, seu uso nos setores industriais e domésticos ocorre desde de meados do século XIX. Nesse tipo de bateria, o cátodo é feito de dióxido de

chumbo e ânodo de chumbo metálico, esses que são imersos em um eletrólito de ácido sulfúrico diluído. As principais vantagens do uso de baterias de chumbo-ácido são a alta eficiência energética, pequenas taxas de auto-descarga, eficiências de ciclo relativamente altas, e o baixo custo de capital inicial. Contudo, sofre algumas desvantagens que incluem tempos de ciclos relativamente baixos (até 2000), baixa vida útil, baixa densidade de energia e baixa taxa de energia específica. Ademais, sistemas compostos por essa tecnologia podem necessitar de um sistema de gerenciamento térmico, pois baterias de chumbo-ácido podem apresentar um desempenho menor do que esperado, quando expostas a temperaturas baixas, fato que pode vir a aumentar o custo total de um *ESS* (Bueno and Brandão, 2015; Luo et al., 2015; Faisal et al., 2018).

Baterias de chumbo-ácido são adequadas para sistemas que requeiram tempos de armazenamento curtos ou médios e principalmente nos casos em que a relação custo-benefício, a confiabilidade e a tolerância a mau uso são consideradas críticas, mas, fatores como a densidade de energia e vida útil são consideradas importantes. Os maiores mercados para esta tecnologia são a indústria automotiva e os sistemas de *back-up* (*no-breaks*) para telecomunicações (Bueno and Brandão, 2015; Seibel Gehrke et al., 2019).

### 3.2 Baterias de Íons de Lítio (*Li-íon*)

Apresenta-se como uma tecnologia de bateria recarregável avançada, desenvolvida comercialmente pela empresa Sony<sup>TM</sup>, durante o início dos anos 90. Em uma bateria desse tipo, o cátodo é feito de óxido metálico de lítio, e o ânodo é feito de carbono grafítico. O eletrólito é normalmente um líquido orgânico não aquoso contendo sais de lítio dissolvidos. Baterias de íons de lítio apresentam alta eficiência, alta densidade de energia, bom tempo de resposta (em milissegundos) e baixa taxa de auto descarga (Faisal et al., 2018). Entretanto, as desvantagens da bateria de íons de lítio são a profundidade do ciclo de descarga (*depth of discharge - DoD*), sensibilidade a altas temperaturas e elevado custo. Contudo, o custo das células de íons de lítio tende a diminuir com grandes produções em larga escala (Mahlia et al., 2014; Faisal et al., 2018; Bueno and Brandão, 2015).

Devido as suas características operacionais as baterias de íons de lítio são os principais dispositivos de armazenamento de energia para eletrônicos portáteis, como *smartphones*, *notebooks*, *TVs* e *tablets*. Além disso, essas características também tornam essas baterias propícias para aplicações de tração elétrica de veículos, ferramentas elétricas e armazenamento de energia renovável disponível intermitente (Luo et al., 2015; Bueno and Brandão, 2015; Mahlia et al., 2014; Seibel Gehrke et al., 2019).

### 3.3 Baterias de Sódio Enxofre (*NaS*)

Esses tipos de baterias são compostas por eletrodos fundidos (sódio e enxofre) e eletrólito de beta alumina em estado não aquoso. O sódio é usado como eletrodo negativo e o enxofre é tratado como eletrodo positivo. Nesse tipo de tecnologia é requisitado uma temperatura de 300 a 350 °C (574 a 624 K), para que ocorram as reações, garantido desse modo que os eletrodos estejam em estado líquido.

São vantagens dessa bateria a alta densidade de energia, baixo índice de auto-descarga diárias, capacidade nominal alta, quando comparada a outras tecnologias empregadas em baterias. Contudo, apresentam limitações devido ao alto custo operacional, devido a, entre outros fatores pela necessidade de um sistema de aquecimento que mantenha sua temperatura para operação (Faisal et al., 2018; Luo et al., 2015; Seibel Gehrke et al., 2019).

Baterias NaS encontram aplicação na operação da rede elétrica de distribuição, integração de geração intermitente (eólica e solar) e serviços ancilares. A tecnologia NaS tem potencial para aplicação em serviços ancilares devido a seu longo tempo de descarga (até 6 horas) e baixa auto-descarga. Essas baterias são capazes fornecer resposta rápida, adequadas às necessidades do sistema elétrico, como a mitigação de eventos de *power quality*. Ainda, a bateria NaS é considerada uma das mais promissoras para aplicações *ESS* de alta potência (Bueno and Brandão, 2015; Faisal et al., 2018).

### 3.4 Baterias de Níquel Cádmio (*NiCd*)

Cronologicamente, baterias de NiCd foi o segundo tipo de bateria recarregável desenvolvida. Foi introduzida pelo engenheiro sueco Waldemar Jungner em 1899. Baterias de NiCd utilizam hidróxido de níquel e cádmio metálico para os dois eletrodos e uma solução alcalina aquosa como eletrólito. Normalmente baterias de NiCd, possuem alta robustez e baixos custos de manutenção. Todavia, os materiais níquel e cádmio são metais tóxicos ao meio ambiente, fato que resulta em riscos ambientais e baterias que utilizam a tecnologia NiCd também estão sujeitas ao "efeito de memória", isto é, a capacidade máxima da bateria pode ser reduzida drasticamente caso essa seja recarregada repetidamente após ser apenas parcialmente descarregada. Por esses motivos, baterias de NiCd estão cada vez mais em desuso e não há cotação dessa tecnologia para aplicações *ESS* em larga escala futuramente (Bueno and Brandão, 2015; Boicea, 2014).

### 3.5 Baterias de Níquel-Metal Idreto (*NiMH*)

Uma bateria de NiMH consiste de um eletrodo positivo à base de óxido de oxi-hidróxido, um eletrodo negativo com base em cádmio metálico e um eletrólito alcalino (geralmente hidróxido de potássio). Trata-se de uma evolução da bateria de de níquel-cádmio (NiCd), a bateria NiMH tem maior densidade de potência e energia, tem menor impacto ambiental, bem como é menos propensa a sofrer efeitos de memória (Bueno and Brandão, 2015; Mahlia et al., 2014).

As baterias NiMH têm uma vida útil mais longa em comparação com baterias de íon de lítio. Possuem uma grande variedade de aplicações, que vão de produtos portáteis a carros elétricos, essa tecnologia também apresenta potencial para aplicações industriais. No entanto, a barreira significativa para aplicações desta em *EES* é a alta taxa de auto-descarga. Baterias NiMH também apresentam sensibilidade em ciclos profundos, assim o desempenho diminui após algumas centenas de ciclos completos (Luo et al., 2015).

### 3.6 Baterias de Fluxo Regenerativo

**Vanadium Redox Batteries (VRB)** Baterias de redução e oxidação de Vanádio (*Vanadium Redox*, em inglês) são derivadas de uma tecnologia onde o elemento ativo é dissolvido no eletrólito. Neste caso, os íons de vanádio permanecem na solução ácida aquosa durante todo o processo. Seu funcionamento é baseado na reação de oxirredução de diferentes formas do vanádio. A tecnologia de baterias VRBs têm a vantagem de apresentar respostas rápidas ao sistema, bem como eficiência relativamente alta. No entanto, apresentam alguns desafios que precisam ser resolvidos, como por exemplo, baixa estabilidade e solubilidade de eletrólitos, levando a baixa qualidade da densidade de energia. Além disso, o custo operacional necessita ser reduzido para se tornar uma alternativa financeiramente atrativa (Luo et al., 2015; Faisal et al., 2018).

VRBs, apresentam grande número de aplicações, e é utilizada principalmente para o aprimoramento da qualidade de energia, aplicações estacionárias e dispositivos de fonte de alimentação ininterrupta (*uninterruptible power supply - UPS*), melhorando assim o nível de carga e aumentando a confiabilidade de energia (Bueno and Brandão, 2015; Faisal et al., 2018).

**Baterias de Brometo de Zinco (ZnBr)** Em baterias de brometo de zinco, o zinco encontra-se no estado sólido quando a bateria está carregada e dissolvido, quando essa está descarregada. O brometo é sempre dissolvido no eletrólito aquoso. Desse modo, cada célula é composta por duas superfícies de eletrodo e por dois fluxos de eletrólito separados por um filme microporoso. O separador microporoso permite que os íons de zinco e os íons brometo migrem para o fluxo de eletrólito oposto para equalizar a carga elétrica. Aplicações que utilizam baterias de ZnBr encontram-se no estágio inicial de demonstração e comercialização (Bueno and Brandão, 2015; Mahlia et al., 2014; Luo et al., 2015).

## 4. COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS ESS

### 4.1 Densidade de Energia e de Potência

A densidade de potência de qualquer das tecnologias de armazenamento expostas nesse trabalho é definida como:

$$D_P = \frac{P_{Nom}}{Vol} \quad (1)$$

onde:  $D_P$  é a densidade de potência;  $P_{Nom}$  é a potência nominal; e,  $Vol$  é o volume do dispositivo de armazenamento.

Já a densidade de energia é definida como:

$$D_E = \frac{E_{Real}}{Vol} \quad (2)$$

onde:  $D_E$  é a densidade de energia;  $E_{Real}$  é a energia real armazenada; e,  $Vol$  é o volume do dispositivo de armazenamento.

O volume do dispositivo é considerado como o volume do ESS completo, incluindo o elemento de armazenamento de

energia, entre outros equipamentos necessário a um ESS (Aneke and Wang, 2016). De acordo com dados extraídos de Luo et al. (2015), é apresentada a figura 3, em que é comparada a densidade de potência, a densidade de energia e o volume de algumas das tecnologias para dispositivos de armazenamento mencionadas anteriormente.

Da análise do gráfico (Figura 3), é possível visualizar que para determinado valor de potência quanto maior a densidade de potência por unidade de volume menor será espaço ocupado pelo sistema de armazenamento, isto é, menor será o espaço requisitado pela tecnologia para que essa possa realizar o armazenamento numa determinada potência requisitada pelo ESS. Na região superior direita da figura encontram-se as tecnologias mais compactas, essas que são adequadas para aplicações com volume restrito. Na figura também observa-se no canto inferior esquerdo, onde estão localizadas a maioria das tecnologias de baterias, volantes de inércia e célula combustível. Essas tecnologias apresentam valores de densidades de energia e potência medianos. PHS e CAES, apresentam densidades mais baixas de ambos os requisitos, desse modo, enquadram-se como tecnologias que requisitam grandes espaços para instalação, quando essas forem aplicadas em ESS em larga escala. Enquanto que sistemas de armazenamento de energia por capacitores e supercapacitores têm a maior densidade de potência, as células de combustível garantem os maiores valores de densidade de energia. É possível observar que baterias de íons de lítio possuem alta densidade de energia, bem como alta densidade de potência, fato que impulsiona essa tecnologia a ser utilizada em dispositivos portáteis. (Luo et al., 2015; Dehghani-Sani et al., 2019).

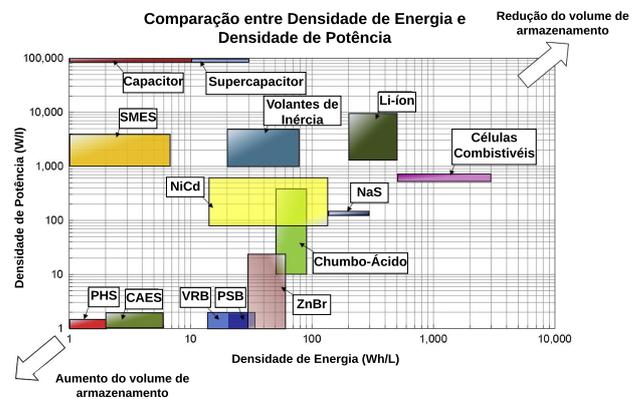


Figura 3. Comparação da densidade de potência com a densidade de energia. Figura adaptada de (Luo et al., 2015).

### 4.2 Energia Específica e Potência Específica

Energia específica e potência específicas são fatores de grande influência, na análise de ESS, pois dependendo da funcionalidade aplicada a esse sistema, os valores requisitados para tal irão mudar. Nesse sentido, na figura 4 é mostrada a comparação entre energia específica e potência específicas de diversos dispositivos de armazenamento mostrados ao longo desse trabalho. Da figura 4 é possível ter a percepção que para adquirir uma certa quantidade de energia, quanto maior a potência específica e a energia específica, menor será o peso do sistema ESS. Desse

modo, é perceptível que para aplicações leves encontram-se no canto superior direito. Capacitores e supercapacitores possuem alta potência, entretanto o valor de potência específica é baixo, essas características devem-se ao seu rápido tempo de resposta em sistemas, assim essas tecnologias são mais direcionadas ao uso em qualidade de energia, no que se refere ao fornecimento de energia elétrica. Volantes de inércia, baterias de fluxo e maioria das baterias secundárias localizam-se com valores médios das especificações mencionadas nessa seção, fato que justifica as diversas vertentes de aplicações de baterias. Dentre as baterias, destacam-se baterias de li-íon que apresentam alta energia específica e também alta potência específica, em razão disso existe uma grande gama de desenvolvimento e aplicações para baterias de íons de lítio (Aneke and Wang, 2016; Dehghani-Sanij et al., 2019).

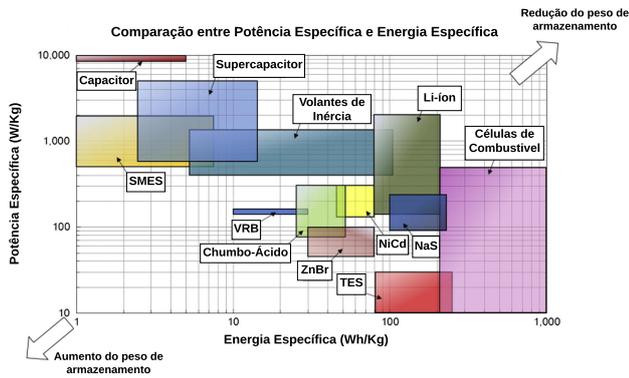


Figura 4. Comparação entre energia específica e potência específica. Figura adaptada de (Lue et al., 2015).

#### 4.3 Capacidade e duração de armazenamento

Capacidade de armazenamento refere-se à quantidade de energia disponível no dispositivo que pode ser utilizada. Assim, a capacidade de armazenamento é a energia total que pode ser armazenada no dispositivo. Essa capacidade de armazenamento é diferente da energia recuperada do dispositivo de armazenamento, tendo em vista que a descarga geralmente é incompleta. Os dispositivos de armazenamento de energia em escala comercial geralmente têm grandes capacidades de armazenamento. Devido a problemas de descargas automáticas, a duração do armazenamento também é considerado um dos elementos essenciais a serem considerados na análise de uma determinada tecnologia de armazenamento de energia (Aneke and Wang, 2016). A figura 5 apresenta dados retirados de Luo et al. (2015), e mostra uma comparação das classificações de potência e das capacidades de energia nominal das tecnologias *EES*. A duração nominal do tempo de descarga na potência nominal também é mostrada na faixa de segundos a meses. Na figura 5, as tecnologias de *EES* podem ser categorizadas pelo tempo nominal de descarga na potência nominal: (1) tempo de descarga inferior a 1 hora, em que são apresentados os volantes de inércia, supercapacitores e *SMES*; (2) tempo de descarga até cerca de 10 horas, onde encontram-se o *CAES* em pequena escala, baterias de ácido-chumbo, baterias de íons de lítio, baterias de NiCd, baterias de ZnBr e *PSB*; (3) tempo de descarga superior a 10 h: *PHS*, *CAES* subterrâneo em grande escala, armazenamento de energia líquida, *VRB*, combustível solar,

célula de combustível e *TES* (Seibel Gehrke et al., 2019; Luo et al., 2015)

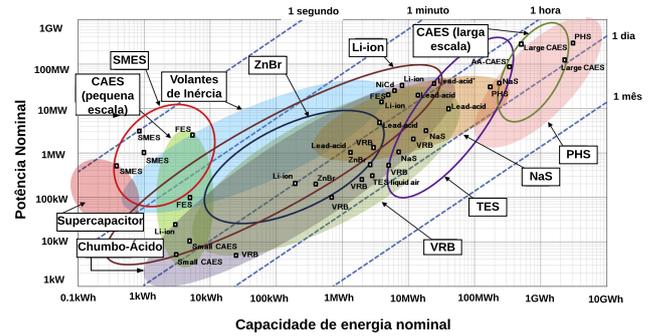


Figura 5. Comparação da potência e capacidade nominal com a duração do tempo de descarga de tecnologias *ESS*. Figura adaptada de (Lue et al., 2015).

#### 4.4 Análise Financeira

O custo de uma tecnologia de armazenamento de energia é um dos fatores mais importantes para a implantação de um sistema de armazenamento. Uma análise detalhada acerca do custo de qualquer tecnologia de armazenamento deve incluir o gasto relacionado a custos operacionais. O custo operacional engloba o custo da operação, manutenção, descarte e substituição. Os componentes auxiliares usados por algumas tecnologias de armazenamento de energia podem vir a adicionar mais despesas ao sistema. Como resultado disso, alguns *ESS* tendem a ser economicamente viável apenas acima de um determinado valor de energia e potência mínima (Aneke and Wang, 2016). A tabela 1 mostra os custos relacionados ao valor em dólares da energia em quilo watts por hora (kWh) e potência (kW) de alguns dos sistemas de armazenamento apresentados anteriormente. Esses dados foram retirados de Luo et al. (2015); Aneke and Wang (2016); Dehghani-Sanij et al. (2019). Em termos de custo de energia, *PHS* e *CAES* estão na faixa de menor valor. A tabela 1 mostra ainda que o *CAES* tem um custo menor por kWh do que o *PHS*. A Figura 6 utiliza dados retirados de Luo et al. (2015), e demonstra graficamente a comparação entre custo de energia e o custo relacionado a operação e manutenção de tecnologias *ESS*. Em que pode ser visualizado que embora o custo de energia da bateria de chumbo-ácido seja relativamente baixo, pode não ser a melhor opção para aplicações de *EES* em larga escala devido ao seu custo de operação e manutenção (O&M) ser relativamente alto e vida útil curta. Na Fig. 6, entre as técnicas já consolidadas e comercializadas, o *PHS* e o *CAES* têm custos mais baixos de de energia em comparação com todas as outras tecnologia de armazenamento; NaS, *VRB* e bateria de chumbo-ácido têm um custo relativamente alto de O&M. Conforme mostrado na Tabela 1 o *SMES* e o volante de inércia são adequados para aplicações de alta potência e em pequena escala, pois são baratos em termos de custo de potência, mas caros em termos de custo de energia. Deve-se atentar ainda, que o custo de capital de um sistema *EES* específico varia em termos de escala de tempo da construção do sistema, da localização da planta, bem como a instalação e do tamanho do sistema. O custo de *EES* tende a diminuir com o esforço contínuo de

Tabela 1. Comparação de tecnologias ESS em termos de custo.

Sistema	Custo da energia (\$/kW h)	Custo da Potência (\$/kW)
<i>PHS</i>	5-100, 10-12	2500-4300, 2000-4000
<i>CAES</i>	2-50	400-800
Volantes de Inércia - <i>FES</i>	1000-14000	250-350
Capacitor	500-1000	200-400
Supercapacitor	300-2000	100-300, 250-450
<i>SMES</i>	1000-10000	200-300, 380-489
Células de Hidrogênio	15	500,1500-3000
Íons de Lítio	240-2500	1200-4000, 900-1300, 1590
NaS	300-500, 350, 450	1000-3000, 350-3000
NiCd	800-15000, 400-2400	500-1500
<i>VRB</i>	150-1000, 600	600-1500
ZnBr	150-1000, 500	700-2500, 400, 200

pesquisa e desenvolvimento, e alguns avanços tecnológicos importantes podem levar a mudanças drásticas no custo (Luo et al., 2015; Aneke and Wang, 2016; Dehghani-Saniq et al., 2019).

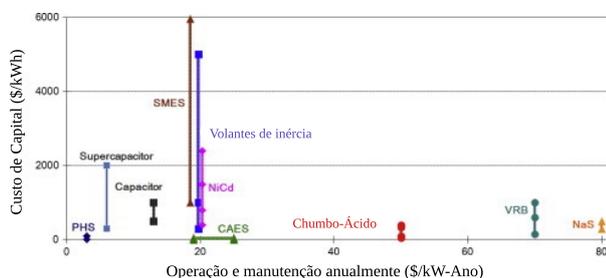


Figura 6. Comparação entre custo de energia e potência com o custo de manutenção e operação. Figura adaptada de (Lue et al., 2015).

## 5. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma revisão sobre diversos sistemas para armazenamento de energia com ênfase nos baseados em baterias. Foi possível obter a caracterização de diversos *ESS*, de modo que fosse possível realizar uma análise comparativa, de como estas tecnologias se encontram em termos de maturidade e aplicação, levando em conta fatores operacionais e também o custo associado a essas. Muitas soluções em armazenamento estão disponíveis, entretanto, essas tecnologias apresentam diferenças em termos de especificação e características, o que dificulta a seleção de uma única tecnologia para todas as aplicações em armazenamento.

Assim, foram apresentados dados que pudessem facilitar estudos posteriores, bem como a tomada de decisão sobre a aplicação de tecnologias *ESS* para uma dada operação. Com base no que foi exposto, apresentam-se como conclusões dessa revisão os seguintes resultantes: *PHS* possui densidades de potência e energia relativamente baixas. Desse modo, essa tecnologia é usada principalmente em aplicações *ESS* em grande escala. Também apresenta maior número de implementações em todo o mundo, devido a sua maturidade tecnológica. O tamanho resultante dos sistemas de armazenamento, implica em diferentes tipos de aplicação, e por esse motivo, esse é um fator que pode vir provocar mudanças na tomada de decisão sobre

a tecnologia de armazenamento a ser utilizada. Nesse sentido, ao analisar *BESS* fica clara a grande implementação da tecnologia de baterias de íons de lítio em eletroportáteis e em sistemas de armazenamento de pequena escala, isso se deve principalmente as suas características quanto a relativa alta densidade de energia e potência, bem como altos valores no que se refere a energia e potência específicas.

Ainda sobre as perspectivas de sistemas de armazenamento compostos por baterias, é possível perceber que baterias que apresentam metais pesados e substâncias tóxicas em sua composição, podem ser consideradas inadequadas devido ao risco ambiental. Sendo esse fato decisivo na implementação do sistema, apresentando desse modo, menor utilização. A capacidade energética e a auto-descarga de sistemas de armazenamento são os principais fatores para decidir a duração adequada do armazenamento associado.

Pela visão geral, demonstra-se que atualmente não há tecnologia comercializada adequada para armazenamento de energia de modo sazonal. Várias tecnologias de *ESS*, como *PHS*, células de combustível e *TES*, apresentam o potencial de ser aplicado nessa área. Além dos fatores mencionados acima, o custo associado a tecnologias *ESS* apresenta um grande impacto na escolha da tecnologia associada ao *ESS*. Desse modo, é possível observar que as tecnologias atuais apresentam características tecnológicas variadas, como foi mostrado na tabela 1. No entanto, além do *PHS* e *CAES*, grande parte das tecnologias não apresentam custos aplicáveis para uma ampla implementação.

Algumas tecnologias de armazenamento compostas por tecnologias como *fuel solar*, hidrogênio e *PSB* encontram-se ainda em fase de demonstração ou fase de pesquisa, e portanto ainda não pode haver uma mensuração exata quanto a capacidade de aplicação para armazenamento de energia, este fato também influencia no custo associado a aplicações. Ciente do exposto, é possível concluir que embora vários projetos de demonstração de tecnologias *ESS* tenham sido concluídos. A implantação generalizada de *ESS* dependerá dos avanços em tecnologias relevantes na construção dessas, bem como no progresso de outros benefícios trazidos pela implementação de *ESS*.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e incentivo à iniciação científica e financiamento do projeto processo nº 312646/2017-8.

## REFERÊNCIAS

- Aneke, M. and Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – a state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350 – 377. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916308728>.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., and Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 302 – 314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082610000566>.
- Boicea, V.A. (2014). Energy storage technologies: The past and the present. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1777–1794.
- Bueno, A.F.M. and Brandão, C.A.L. (2015). Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no brasil. <http://www.abaque.com.br>.
- Connolly, D., Lund, H., Finn, P., Mathiesen, B., and Leahy, M. (2011). Practical operation strategies for pumped hydroelectric energy storage (phes) utilising electricity price arbitrage. *Energy Policy*, 39(7), 4189 – 4196.
- Dehghani-Sani, A., Tharumalingam, E., Dusseault, M., and Fraser, R. (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 192 – 208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119300334>.
- EPE (2019). Sistemas de armazenamento em baterias. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
- Faisal, M., Hannan, M.A., Ker, P.J., Hussain, A., Mansor, M.B., and Blaabjerg, F. (2018). Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *IEEE Access*, 6, 35143–35164.
- IRENA (2020). Renewable capacity statistics. Technical report, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511 – 536.
- Mahlia, T., Saktisahdan, T., Jannifar, A., Hasan, M., and Matseelar, H. (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 532 – 545. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.068>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000902>.
- Martins Pastuch, L.F., Francisco Coelho, R., Lazzarin, T.B., and Antonio Salvador, M. (2019). Small scale compressed air energy storage (ss-caes) strategies overview. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 1–6.
- Rehman, S., Al-Hadhrani, L.M., and Alam, M.M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 586 – 598.
- Seibel Gehrke, C., Salvadori, F., and Rocha, N. (2019). Tecnologias de armazenamento aplicadas à rede elétrica. Technical report, CEMIG (Centrais Elétricas Minas Gerais), ALSOL Energias Renováveis and Smart Grid Group (SG2)/UFPB.
- Silva, D.E. and Silva, L.C.P. (2016). Avaliação técnica e econômica da inserção massiva de geração distribuída e de sistemas de armazenamento de energia em redes de distribuição. In *XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA2016*.
- Xin Zhou, Chen, X.Y., and Jin, J.X. (2011). Development of smes technology and its applications in power grid. In *2011 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, 260–269.