

SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDES INTELIGENTES: CARACTERÍSTICAS, OPORTUNIDADES E BARREIRAS

Yáscara F. F. Costa e Silva¹

Edson C. Bortoni²

RESUMO

O armazenamento de energia em sistemas elétricos é uma tendência que se torna cada vez mais viável ao se considerar o advento das redes elétricas inteligentes. Neste sentido, este trabalho faz uma revisão das soluções atualmente disponíveis para o armazenamento de energia elétrica, bem como traça um perfil das principais oportunidades e barreiras para a sua implantação, considerando aplicações, custos e aspectos regulatórios. O trabalho visa fornecer subsídios para a aplicação de técnicas de tomada de decisão.

ABSTRACT

The energy storage in the electrical systems is a tendency that has gaining feasibility mainly when considering the advent of the smart grids. Therefore, this work makes a review of the presently available solutions for the electrical energy storage, providing a profile of the main opportunities and barriers to its implantation, considering their application, costs, and regulatory aspects. The work aims at supplying subsidies for decision-making techniques application.

1. INTRODUÇÃO

O armazenamento de energia elétrica por muito tempo tem sido considerado uma tecnologia crítica, mas nos dias de hoje, essas tecnologias podem ser utilizadas de forma a conseguir explorar intensamente recursos energéticos convencionais ou renováveis, de modo que os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) possuem um papel importante na unificação, distribuição e ampliação da capacidade dos sistemas de geração distribuída (GD) (Farret e Simões, 2006).

Por meio dos SAEs é possível a disseminação efetiva do uso das energias solar, eólica e outras renováveis de maneira sustentável, já que são aliviados congestionamento na rede, contornando os problemas da aleatoriedade de disponibilidade de energia, aumentando a eficiência do sistema como um todo, contribuindo para redução de

1 Centro de Excelência em Eficiência Energética - Universidade Federal de Itajubá

2 Centro de Excelência em Eficiência Energética - Universidade Federal de Itajubá

impactos ambientais. Entende-se que as aplicações dos sistemas de armazenamento não são direcionadas somente ao setor elétrico, mas também ao setor de transportes, como é o caso dos carros elétricos.

Apesar de seu grande potencial, a capacidade de armazenamento de energia elétrica instalada mundialmente ainda é de apenas 2% da capacidade elétrica total (Zareipour, 2015). Destes 2%, 99% refere-se ao armazenamento por bombeamento hidráulico em centrais hidrelétricas reversíveis.

As expectativas para o futuro dos SAEs são otimistas e consideram o desenvolvimento de outras tecnologias, como baterias residenciais, as variadas baterias de fluxo redox, etc. Existem oportunidades econômicas no mercado da gestão de redes elétricas, que fazem o armazenamento de energia atrativo em performance e custo, embora este ainda tenha que competir com outras alternativas (Zareipour, 2015). Para avaliar as vantagens e desvantagens de um SAE, de modo a poder considerá-lo uma solução técnica de gestão, é preciso entender as tecnologias de armazenamento disponíveis, como elas são classificadas, que serviços podem oferecer, seus custos, etc.

A Figura 1 apresenta alguns tipos principais de tecnologias de armazenamento, relacionando os valores típicos de potência e tempo de descarga.

Além de entender as tecnologias de armazenamento, é preciso que regras de mercado sejam estabelecidas, e neste sentido, ainda existem muitas barreiras a serem vencidas mundialmente. Não somente no que diz respeito a regulação, mas também ao desenvolvimento dos modelos de negócios para concessionárias e empreendedores, criadores de políticas energéticas, dentre outros.

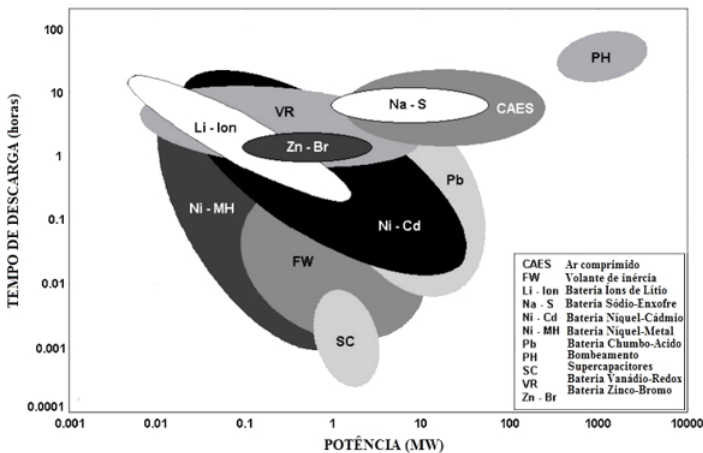


Figura 1 - Comparativo das tecnologias de armazenamento (Faias et al., 2009)

Dando continuidade a desenvolvimentos anteriores (Dias et al., 1006), este trabalho faz uma revisão das soluções atualmente disponíveis para o armazenamento de energia elétrica, bem como traça um perfil das principais oportunidades e barreiras para a sua implantação, considerando aplicações, custos e aspectos regulatórios. O trabalho visa fornecer subsídios para a aplicação de técnicas de tomada de decisão.

2. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Armazenar significa: guardar ou recolher, conter em depósito, acumular(-se), fazer provisões. Desde a descoberta da eletricidade, se tem procurado métodos efetivos para armazenar energia elétrica eficientemente. A indústria do armazenamento tem evoluído consideravelmente, no intuito de se adaptar aos requisitos e avanços da tecnologia. Atualmente, os sistemas de armazenamento de energia fornecem uma grande variedade de abordagens tecnológicas para gerir o fornecimento de energia e criar uma infraestrutura energética mais resistente.

Pode-se dividir as tecnologias de armazenamento em seis principais categorias (ESA, 2015): baterias de estado sólido; baterias de fluxo; volantes de inércia; ar comprimido; térmico; e bombeamento hidráulico. Contudo, existem também outras tecnologias ainda não convencionais, que se encontram em fase de pesquisa e desenvolvimento, como por exemplo: a *Advanced Rail Energy Storage* (ARES), que garante o armazenamento de energia renovável por via de locomotivas elétricas; o armazenamento híbrido, que consiste em utilizar dispositivos de armazenamento diferentes, por exemplo para carros elétricos; variações das tecnologias já convencionais, etc. A seguir serão detalhadas algumas tecnologias de armazenamento e suas características.

Enquanto existem diversas tecnologias de armazenamento, tais como ar comprimido, bombeamento hidráulico, super condutores, volantes de inércia e hidrogênio, este trabalho se concentrará na análise de SAE na forma elétrica, tais como baterias do tipo chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd), sódio-enxofre (NaS), íons de lítio, fluxo redox, zinco-bromo (ZnBr), vanádio redox (VR), capacitores e super capacitores.

Uma bateria é um acumulador químico, que tem a capacidade de transformar, através de reações químicas, a energia química em energia elétrica, ou vice-versa, com baixo valor de emissões prejudiciais ao ambiente, sem ruído, e solicitando pouca manutenção (Silva, 2008).

A maneira e as condições sob as quais são usadas baterias afetam sua performance, custo, e vida útil. A capacidade de uma bate-

ria é dada em potência, e geralmente denotada em kW ou MW. Em muitos casos, a quantidade da capacidade que pode ser usada de uma bateria, também chamada de profundidade de descarga, afeta dramaticamente sua vida operacional (IRENA, 2015). Outros fatores que afetam a performance de uma bateria são a temperatura ambiente, e o serviço para o qual será empregada a bateria.

A vida operacional da bateria pode ser medida em ciclos, ou em anos. A vida cíclica da bateria é o número de vezes (ciclos) em que ela poderá ser carregada e descarregada sem que isso afete sua performance. A vida cíclica é especificada para uma dada profundidade de descarga e temperatura. Considerando a vida de uma bateria em anos, os fatores principais a serem considerados são temperatura e tempo.

De uma perspectiva tecnológica, o armazenamento por baterias atualmente pode ser considerado estabelecido, mas isso não significa que o desenvolvimento desta tecnologia, em suas variadas instâncias, se encontra estagnado. Pelo contrário, existem ainda muitas barreiras a serem ultrapassadas e que já estão sendo estudadas para que o armazenamento por baterias seja completamente integrado ao setor elétrico.

Entraves relacionados às questões estéticas, de performance e segurança, barreiras regulatórias, competitividade de custos, e aceitação por parte da indústria e das concessionárias, vêm obtendo cada vez mais progresso, principalmente nos países líderes do setor, como Estados Unidos, Japão, Alemanha e China (IRENA, 2015). A Figura 2 apresenta um gráfico da capacidade instalada e planejada do armazenamento por baterias, por país.

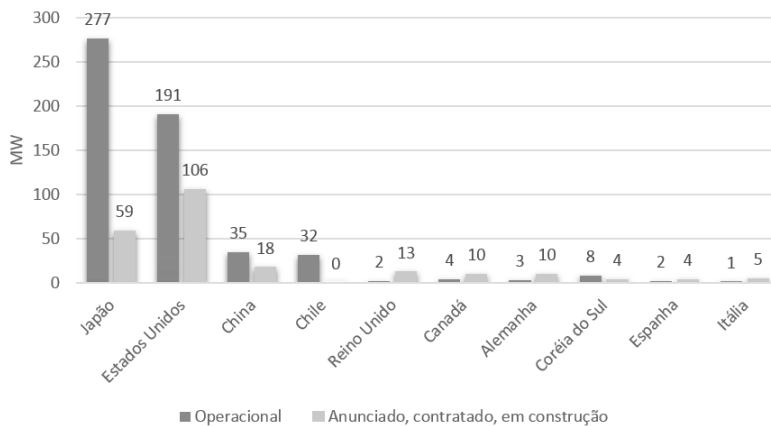


Figura 2 - Capacidade instalada e planejada do armazenamento por baterias ao redor do mundo (IRENA, 2015)

A bateria, individualmente, é apenas uma parte de um sistema maior, o qual contém vários componentes primários, os sistemas de monitoramento e controle, e um sistema de conversão de potência. O sistema de monitoramento e controle gerencia o sistema de armazenamento, garantindo segurança em sua utilização e maximizando sua performance. Este sistema de gerenciamento previne células individuais de sobrecarregarem, bem como controla carga e descarga da bateria.

A importância do sistema de conversão de potência consiste no fato de que as baterias geram energia em corrente contínua (CC), enquanto a maioria dos sistemas elétricos convencionais funcionam em corrente alternada (CA). O sistema de conversão possui inversores para converter a energia CC em CA durante períodos de descarga. Por meio do uso de retificadores, é possível que a energia CA retorne à bateria para carregá-la.

Nos dias de hoje, os sistemas de gerenciamento do armazenamento por baterias são consideravelmente caros e complexos, para soluções em sistemas mais robustos. Por exemplo, desenvolvem-se softwares e ferramentas que possibilitam monitoramento e controle à distância para estes sistemas. Além disso, é possível otimizar e criar ferramentas para gerenciamento da carga, considerando atualização instantânea de informações da geração, nível de carregamento do sistema de baterias, etc. A Figura 3 apresenta uma representação de um sistema de gerenciamento completo.

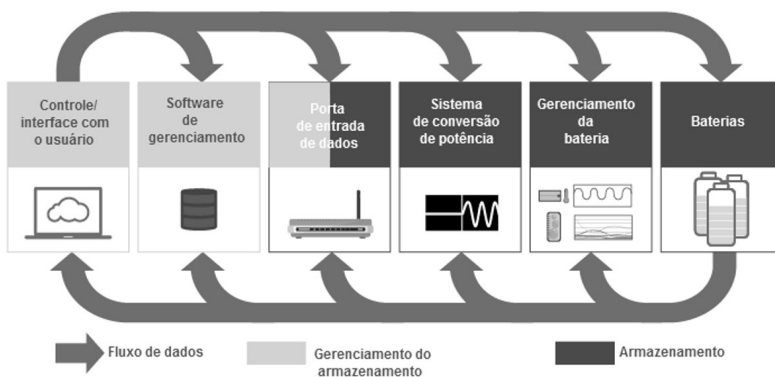


Figura 3 - Representação de um Sistema de Gerenciamento de Baterias completo

Existem centenas de tipos de baterias disponíveis no mercado hoje em dia, e suas características técnicas e performance diferenciam-se por tipo de tecnologia, fabricante e fornecedor. O tempo de descarga de baterias pode variar de segundos até dias, enquanto a capacidade pode variar de quilowatts até dezenas de megawatts. Exis-

tem ainda variações em cada tipo de tecnologia, de acordo com o nível de tensão, a profundidade de descarga desejada, requisitos de manutenção e da carga (IRENA, 2015).

Não existe um único tipo de bateria que sirva para uma única aplicação particular; existem muitas opções, a depender dos critérios de decisão, dentre os quais pode-se citar: requisitos de performance; eficiência; limitações de espaço; infraestrutura de instalação; condições ambientais; segurança; disponibilidade e custo dos componentes; requisitos e custos de manutenção; ciclo de vida da tecnologia; profundidade de descarga; requisitos da rede/concessionária; custo das baterias; ciclo de vida da tecnologia; confiabilidade do fabricante e do fornecedor.

Considerando a grande variedade de tecnologias, princípios de operação e materiais que compõem as baterias, é importante distinguir dois conceitos importantes, de acordo com (Faias et al., 2009): baterias eletroquímicas e baterias de fluxo redox.

As baterias eletroquímicas usam eletrodos, positivos e negativos, como parte do processo de transferência de elétrons em uma solução condutora, chamada de eletrólito. As principais baterias nessa categoria são: chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd), sódio-enxofre (NaS), e íons de lítio.

As baterias de fluxo redox armazenam energia por meio de reações entre duas soluções condutoras separadas por uma membrana semipermeável. Esta membrana permite o fluxo de íons, mas não deixa as soluções se misturarem. Enquanto os íons fluem pela membrana, uma corrente elétrica é induzida nos condutores. As principais baterias nessa categoria são: zinco-bromo (ZnBr) e redox de vanádio (VR).

2.1. Baterias Eletroquímicas

Um tipo de bateria eletroquímica é a de chumbo-ácido. Devido ao seu baixo custo e pronta disponibilidade, as baterias de chumbo-ácido tem sido aceitas como uma opção padrão para o armazenamento de energia em novas aplicações. Essa popularidade vem em contraste com muitas desvantagens já percebidas, incluindo baixa energia específica (Wh/kg), potência específica (W/kg), baixa vida útil cíclica, altos requisitos de manutenção, e muitos perigos ambientais associados ao chumbo e ao ácido sulfúrico (EPRI e DOE, 2003).

Melhorias contínuas nos quesitos químicos, design mecânico e elétrico, técnicas operacionais e de manufatura tem mitigado muitas destas desvantagens, fazendo com que as baterias de chumbo-ácido continuem bastante usadas em muitas aplicações.

Existem duas categorias principais de baterias de chumbo-ácido: ventiladas, nas quais os eletrodos ficam imersos em reservatórios

com excesso de líquido eletrolítico; e as seladas, ou reguladas por válvula (VRLA), nas quais o eletrólito é imobilizado em um separador absorvente ou em gel. Estes dois tipos são significativamente diferentes em termos de design, manufatura, características operacionais, expectativa de vida, e custo. Ainda dentro destas categorias, existem subcategorias, cada uma otimizada para servir a um grupo de aplicações em particular.

Uma das instalações utilizando baterias de chumbo-ácido em larga escala mais antigas do mundo se localiza em Chino, EUA. Esta foi instalada em 1988, usada para nivelamento de carga. Sua capacidade é de 10 MW / 40 MWh. Alguns comercializadores e desenvolvedores são: Alcad, Bolder Technologies, EnerSys, GNB Batteries, HAGEN Batterie AG, Japan Storage Battery e Varta.

Outro tipo de bateria é a de Níquel-Cádmio (NiCd). Vários materiais têm sido combinados com o níquel para produzir uma variedade de tecnologias de baterias, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Alguns exemplos de baterias que usam o níquel, além das baterias NiCd são: níquel-ferro (NiFe), níquel-hidrogênio (NiH₂), níquel-hidreto metálico (NiMH), e níquel-zinco (NiZn). Destas, as baterias NiCd e NiMH são as mais comuns e melhor conhecidas (EPRI e DOE, 2003). Baterias de níquel-cádmio existem em diversas formas, têm uma maior densidade de energia, ciclo de vida mais longo e exigem menos manutenção do que as baterias de chumbo-ácido, com um custo um pouco maior. Um dos maiores projetos com esse tipo de baterias se encontra no Alasca, aplicado para melhorar a confiabilidade em uma instalação de 6,7 MWh.

Alguns comercializadores e desenvolvedores deste tipo de baterias são: Panasonic, Saft, Tudor, Varta, Marathon Power Technologies Company, Hoppecke Batterien GmbH, EnerSys, ElectroEnergy, Inc., Acme Electric Corporation, Alcad, etc.

Existem ainda na categoria das eletrolíticas, as baterias de Sódio-Enxofre (NAS). Essas baterias são uma tecnologia de armazenamento de energia comercial, que possui aplicações de apoio a redes elétricas em concessionárias, na integração de energia eólica e solar, e em serviços de rede de alto valor (EPRI e DOE, 2013).

Esta tecnologia detém potencial para uso em serviços de rede por causa de seu período de descarga longa (cerca de 6 horas). Um fator positivo é sua capacidade de resposta precisa para mitigação de transtornos na qualidade de energia.

O maior sistema que utiliza este tipo de baterias é de 34 MW, 245 MWh, e encontra-se no norte do Japão, numa fazenda eólica de 51 MW (Farret e Simões, 2006).

Por fim, podem ser mencionadas as baterias de íons de lítio. Este tipo de baterias obteve um crescimento exponencial em seu desenvolvimento desde o início de sua comercialização, em 1991. Inicial-

mente eram utilizadas para pequenos produtos de consumo, mas atualmente muitas companhias já as desenvolvem em formatos maiores.

Estas baterias se constituem de diferentes elementos químicos, que são caracterizados pela transferência de íons de lítio entre seus eletrodos durante reações de carga e descarga. Células de íons de lítio não necessariamente contém lítio metálico, mas íons que são inseridos na estrutura de outros materiais, que formam o cátodo e o ânodo.

Suas aplicações podem variar desde as que necessitam de poucos kWh em sistemas residenciais, até grandes baterias, da ordem de MW, para suprimento de serviços auxiliares na rede elétrica. Uma aplicação importante deste tipo de tecnologia possui 12 MW, e encontra-se no deserto do Atacama, no Chile, tendo sido finalizado em 2009.

Embora as baterias de íons de lítio estejam sob constante desenvolvimento, e seus custos são esperados para diminuir consideravelmente no futuro, esta solução para armazenamento é ainda vista como um investimento de risco, já que sua performance, longevidade e custo benefício não podem ser facilmente avaliados pelas partes interessadas (Bhatnagar et al., 2013a).

Neste sentido, o mercado de carros elétricos pode ser considerado um propulsor ao mercado de baterias, principalmente para as baterias de íons de lítio, já que estas tem sido amplamente utilizadas nos carros híbridos, e existem empresas investindo massivamente em sua produção para aplicações em carros elétricos, como a Tesla.

2.2. Baterias de fluxo redox

As baterias de fluxo redox consiste da utilização de dois tanques separados, os quais serão preenchidos com soluções eletrolíticas, uma positiva e uma negativa. Estas soluções são bombeadas para uma célula de reação, na qual as soluções ficarão separadas por uma membrana semipermeável, que permite a troca de íons entre as mesmas. O fluxo de íons por esta membrana induz uma corrente elétrica, a ser direcionada à carga com a qual este sistema esteja acoplado.

Algumas das baterias de fluxo mais conhecidas são: ferro-cromo (FeCr), ferro-zinco (FeZn), zinco-bromo (ZnBr) e vanádio redox (VR). Dentre essas, as mais desenvolvidas são as baterias de vanádio redox e as de zinco-bromo. Essas, em comparação com as tecnologias apresentadas anteriormente, podem ser consideradas como armazenadores de longa duração, de mínima degradação ambiental e alta expectativa de vida. Além disso, possuem custos mais baixos do que as populares baterias de íons de lítio.

De acordo com (Zareipour, 2015) as baterias ZnBr apresentam tempo de resposta de ordem inferior a milissegundos, o que as tornam interessantes em aplicações com geração variável e na qualidade de

energia. As baterias VR também podem ser utilizadas para as mesmas aplicações, como é o caso da instalação na Tomamae Wind Village, uma usina eólica japonesa de 32 MW de potência, que faz uso de baterias VR de potência total de 4 MW, com fornecimento de 6 MWh.

Tanto as baterias ZnBr, quanto as VR possuem eficiência da ordem de 75% à 80%, mas as primeiras estão em desvantagem no que diz respeito a vida útil em termos de ciclos, que variam entre valores de 1000 à 3650, enquanto as baterias VR podem chegar a 12000 ciclos.

2.3. Capacitores e super capacitores

O capacitor é um dispositivo que armazena energia por meio do acúmulo de cargas positivas e negativas. Os capacitores possuem placas separadas por um material dielétrico, o que os diferencia dos super capacitores, que são separados por uma solução eletrolítica, como ocorre com baterias.

Quando comparados com baterias, super capacitores apresentam ciclo de vida extremamente alto, além de maior densidade de potência. Isto os torna ideais para aplicações que envolvem sistemas de armazenamento de alta potência durante curtos intervalos de tempo.

Essa tecnologia está sendo introduzida principalmente em veículos híbridos, mas um grande desafio de sua implementação ainda é seu alto custo.

Existem ainda sistemas de armazenamento híbridos que combinam super capacitores com baterias, no intuito de prolongar o tempo de vida de ambos. Capacitores convencionais apresentam menor eficiência quando comparados aos super capacitores, e por apresentarem baixa densidade de energia, suas aplicações são limitadas.

2.4. Análise comparativa

Vistas estas tecnologias de armazenamento, a Tabela 1 apresenta um sumário de suas características técnicas importantes.

Tabela 1 - Sumário de características das tecnologias de armazenamento (Farret e Simões, 2006)

Tecnologia	Vida Útil (anos)	Vida Útil (ciclos)	Eficiência por Ciclo (%)	Capacidade Nominal (MW)
PHS	40 – 60	10000 – 30000	71 – 85	100 – 5000
CAES	20 – 40	8000 – 12000	70 – 89	5 – 300
Chumbo-Ácido	5 – 15	500 – 1000	70 – 90	0 – 20
Níquel-Cádmio	10 – 20	2000 – 2500	72	0 – 40
Sódio-Enxofre	10 – 15	2500	75 – 90	0,050 – 8
Íons de Lítio	42125	1000 - +10000	75 – 90	0 – 0,1
Redox Vanádio	5 – 10	12000	85	0,03 – 3
Zinco-Bromo	5 – 10	2000	75	0,05 – 2
Hidrogênio	5 – 15	1000	20 – 50	0 – 50
Supercondutores	20	100000	75 – 80	0,1 – 10
Volante de inércia	15	20000	90 – 95	0 – 0,250
Capacitor	5	50000	60 – 70	0 – 0,05
Supercapacitor	28	100000	84 - 95	0 – 0,3

3. APLICAÇÕES E BENEFÍCIOS

Conhecidas as tecnologias de armazenamento, pode-se tratar dos variados serviços e benefícios oferecidos por elas. Esses dependem de fatores como: o tamanho dos sistemas, sua localização dentro do sistema elétrico, função que irão desempenhar, etc.

De modo geral, os serviços gerados pelo armazenamento de energia podem ser divididos em cinco grandes categorias, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Serviços e benefícios do armazenamento de energia

		Categorias				
Serviços de energia em massa		Serviços Auxiliares	Infraestrutura de transmissão	Infraestrutura de distribuição	Gerenciamento energético do consumidor	
Serviços	Arbitragem	Arbitragem	Adiamento de atualização no sistema de transmissão	Adiamento de atualização no sistema de distribuição	Qualidade da energia	
		Regulação de frequência			Confiabilidade da energia	
		Reservas	Alívio em momentos de congestionamento	Suporte de tensão	Energia em varejo (Arbitragem)	
	Suporte de tensão	Black-start			Gestão da demanda	
Fornecimento de potência	Rastreamento de carga					

Além da principal utilidade do SAE, que é a de fornecimento de potência, existem ainda outros muitos serviços, como a arbitragem. Esse serviço envolve o conceito do termo inglês *time-shifting*, que se refere a armazenar energia durante os períodos de preços baixos, descarregando-a do armazenador durante períodos de preços elevados (DOE e SANDIA, 2012).

Para a operação de um sistema elétrico de potência com segurança, quantidades de reservas operativas com diferentes níveis de resposta devem estar disponíveis, e podem ser fornecidas por SAEs. Considera-se que os serviços de reservas são classificados segundo uma hierarquia em que reservas de maior qualidade podem atender mercados de menor qualidade, quando isto for viável e economicamente eficiente. Em relação às reservas, tem-se a reserva girante e a reserva não-girante, ou suplementar.

As reservas girantes relacionam-se às unidades geradoras que estão sincronizadas à rede e operam em um patamar mais baixo que seu limite máximo, ou seja, possuem um montante de potência ainda disponível. Sua função é de prover energia adicional a rede em um curto intervalo de tempo para cobrir perdas e atender mudanças não programadas de carga, garantindo assim a segurança na operação. As reservas não-girantes ou reservas suplementares são caracterizadas por montantes de reserva não sincronizadas à rede. Elas têm como objetivo substituir ou complementar o montante de reserva girante com um tempo de resposta mais longo, geralmente estabelecido em 30 mi-

nutos para viabilizar a sincronização (Schier, 2007).

O serviço de suporte de tensão refere-se à injeção ou absorção de energia reativa para manter tensões nos sistemas de transmissão ou distribuição dentro dos padrões exigidos (ANEEL, 2001). Já o serviço de regulação de frequência diz respeito a reconciliação momento a momento do fornecimento e da procura de eletricidade, a qual é feita a cada poucos segundos. Se a demanda excede a oferta de energia elétrica, a oferta é aumentada pelo armazenamento, para atender à demanda. E, se a procura é menor do que a oferta, esta é, então, diminuída.

O rastreamento de carga, ou *load following*, refere-se também ao sistema de armazenamento equilibrar a oferta de energia, principalmente a geração, e a demanda do usuário final (carga) dentro de uma região ou área específica, ao longo intervalos de tempo que variam de minutos a algumas horas. Embora os serviços de regulação de frequência e rastreamento de carga pareçam semelhantes, existem diferenças técnicas entre estes dois serviços (Kirby, 2004).

O serviço de *black-start* também é conhecido como auto restabelecimento. Em caso do acontecimento de uma falha catastrófica na rede, o sistema de armazenamento pode atuar no processo de restauração de uma estação de energia, sem depender da rede de transmissão de energia elétrica externa (NERC, 2015).

Um SAE pode também aliviar o sistema em momentos de congestionamento, pelo fato de o sistema de armazenamento poder descarregar nos casos em que a rede se encontra já saturada, ou seja, durante picos de demanda (DOE e SANDIA, 2012).

O serviço de gestão da demanda diz respeito à redução da demanda vista pela rede, já que o consumidor final pode utilizar o sistema de armazenamento, reduzindo seus custos durante horários de pico (SANDIA, 2015).

É importante mencionar que, para que os benefícios trazidos por tais serviços sejam alcançados, deve ser selecionada a(s) melhor(es) tecnologia(s) de armazenamento para cada caso a ser analisado, ou seja, para cada tipo de uso que o sistema armazenador poderá ter. Para discutir os tipos de usos dos sistemas de armazenamento dentro da rede elétrica, é necessário primeiro entender como estes podem ser conectados numa rede.

Escolher cuidadosamente onde os sistemas de armazenamento serão localizados dentro da rede elétrica pode evitar fluxos de potência indesejados, bem como congestionamento na rede, melhorando a flexibilidade e eficiência da rede. Neste sentido, entende-se que os sistemas de armazenamento poderão ser conectados Em frente ao medidor e Antes do medidor (LAZARD, 2015). Estes termos foram traduzidos e derivam, respectivamente, do inglês *In front of the meter* e *Behind the meter*.

A Figura 4 representa a conexão direta, ou em “Em frente ao medidor”. Esta se constitui de uma configuração em paralelo, onde a energia gerada é direcionada à rede elétrica. Também é conhecida em inglês pelo termo *grid-oriented*.

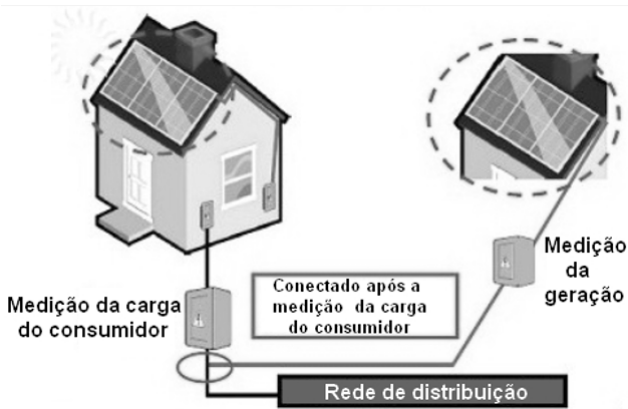


Figura 4 – Ilustração da configuração “Em frente ao medidor”

Já na Figura 5 é mostrada a conexão indireta, ou “Antes do medidor”. Esta se constitui de uma configuração em série. Neste caso, a energia gerada pode ser direcionada ou à rede de distribuição ou à própria carga. Este tipo de configuração é mais utilizado por unidades individualmente.

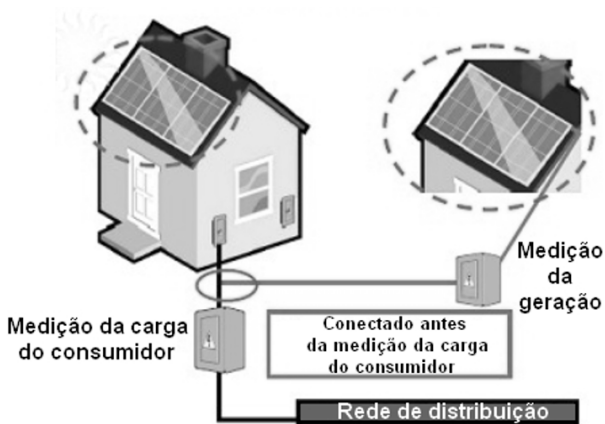


Figura 5 – Ilustração da configuração “Antes do medidor”

É importante observar que um sistema de armazenamento de energia único pode prestar serviços em vários casos de uso, embora a viabilidade do uso do sistema em múltiplas aplicações possa ser limitada, por fatores operacionais e de projeto. Por exemplo, o dimensionamento para um caso de uso particular poderia excluir a participação em outro (LAZARD, 2015).

Podem ser citados cinco usos principais do armazenamento para aplicações em frente à medição:

- **Em sistemas de transmissão:** Melhorar o desempenho da rede de transmissão e apoiar a integração de geração renovável em grande escala;
- **Substituição de Plantas de Pico:** Substituir uma instalação que funciona apenas quando a demanda por energia é muito alta, as quais são geralmente movidas a gás natural. O termo Planta de Pico vem do termo em inglês *Peaker Plants*;
- **Regulação de frequência:** Balancear a potência para manter a frequência dentro de um limite de tolerância especificada;
- **Serviços de distribuição:** quando localizados em subestações, para flexibilizar a capacidade e atenuar problemas de estabilidade;
- **Integração de sistemas fotovoltaicos:** Reduzir desafios potenciais da integração fotovoltaica ou melhorar o valor da geração de energia solar.

Além disso, podem ser citados cinco usos principais do armazenamento para aplicações antes da medição:

- **Em micro redes:** Aumentar a estabilidade e eficiência de uma micro rede, com objetivos locais específicos, tais como confiabilidade, a diversificação das fontes de energia e/ou redução de custos, especialmente no contexto de perfil de descarga relativamente curta;
- **Em sistemas isolados:** Apoiar a estabilidade e eficiência do sistema elétrico isolado com objetivos locais específicos, tais como confiabilidade, a diversificação das fontes de energia e/ou redução de custos, especialmente no contexto da integração das energias renováveis (ou seja, perfil de descarga longa);
- **Em aplicações comerciais e industriais:** Fornecer corte de pico de demanda e redução da tarifa de demanda para aplicações comerciais ou industriais;
- **Aplicação comercial:** Proporcionar reduções na tarifa de demanda, numa escala menor e com uma duração inferior a casos de uso comercial e industrial;
- **Aplicação residencial:** Projetado para fornecer energia de reserva e aumento da auto geração.

Observa-se que, cada caso de uso de um sistema de armazenamento é solução para a necessidade particular de uma rede ou de um determinado usuário, a qual será mais facilmente obtida por meio de um subconjunto de tecnologias de armazenamento disponíveis. As Tabelas 3 e 4 a seguir apresentam as opções convencionais e com uso do armazenamento para cada tipo de aplicação:

Tabela 3 - Usos dos sistemas de armazenamento Em frente ao medidor em contraste com opções convencionais (NERC, 2015)

	Uso em frente ao medidor	
	<i>Opções com armazenamento</i>	<i>Opções convencionais</i>
Sistema de transmissão	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco, PHS, CAES	Aprimoramento da linha de transmissão, Turbinas à gás
Substituição de <i>Plantas de ponta</i>	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco	Motor a diesel, Turbinas à gás
Regulação de frequência	Volantes de inércia, Lítio	Turbinas à gás
Serviços de distribuição	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco	Aprimoramento da linha de distribuição, Turbinas à gás
Integração PV	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco	Motor a diesel, Turbinas à gás, Alteração do perfil de geração de energia solar

Tabela 4 - Usos dos sistemas de armazenamento Antes do medidor em contraste com opções convencionais (NERC, 2015)

	Usos antes do medidor	
	<i>Opções com armazenamento</i>	<i>Opções convencionais</i>
Micro redes	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco	Motor a diesel, Turbinas à gás, Alteração do perfil da carga
Sistemas isolados	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco	Motor a diesel, Turbinas à gás, Alteração do perfil da carga
Comercial e industrial	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco	Motor a diesel, Turbinas à gás, Alteração do perfil da carga, Aprimoramento do serviço da concessionária
Aplicação comercial	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio, Zinco	Motor a diesel, Alteração do perfil da carga, Aprimoramento do serviço da concessionária
Residencial	Chumbo-ácido, Sódio, Baterias de Fluxo, Íons de Lítio	Alteração do perfil da carga, Gerador de reserva

4. ASPECTOS ECONÔMICOS E DE MERCADO

Os SAEs não podem ainda ser considerados de instalação consolidada dentro dos sistemas de potência no mundo inteiro, e existem vários fatores que influenciam neste fato. Buscando entender esta situação, será tratado neste capítulo os modelos de propriedade de um SAE, em seguida, serão discutidas barreiras a implementação destes nas redes elétricas, e por fim, serão apresentados valores de custos e perspectivas financeiras futuras.

4.1. Modelos de propriedade de um sistema de armazenamento

Em relação aos modelos de propriedade de um sistema de armazenamento, podem ser citados dois: Propriedade pela concessionária ou Propriedade privada (Lahairi e Kleiberg, 2015).

Quando a concessionária é proprietária do sistema, o projeto, licitação e construção do sistema são feitos pelo empreendedor; ele desenvolve, financia, constrói e testa o projeto, até que este seja transferido à concessionária por um preço especificado. Nesse caso, o projeto deve ser desenvolvido dentro da área de concessão da concessionária. Em relação à manutenção das instalações, são possíveis variados tipos de acordo entre as partes.

Quando a propriedade é privada, o sistema e seus dispositivos são de propriedade do vendedor de energia. A concessionária paga ao proprietário do sistema (vendedor) pela potência e energia, havendo uma taxa diferente para cada uma dessas.

No caso em que a propriedade é privada, isto pode ocorrer por meio de Contratos de Trabalho por Encomenda (*Tolling Contracts*) ou Acordos de Compra de Energia (*Power Purchase Agreements – PPAs*).

O PPA é um acordo de compra de energia; um contrato entre duas partes, uma que gera eletricidade (o vendedor) e uma que compra eletricidade (o comprador). O PPA define todos os termos comerciais para a venda de energia elétrica entre as duas partes, incluindo quando o projeto começará a operação comercial, cronograma de entrega de energia elétrica, as penalidades para menos entrega, condições de pagamento e rescisão. Este é o tipo de contrato principal que define receitas e de crédito a qualidade de um projeto de geração e é, portanto, um instrumento-chave de financiamento de projetos. Há muitas formas de PPA em uso hoje e eles variam de acordo com as necessidades das contrapartes comprador, vendedor e financiamento (Thumann e Woodroof, 2008).

4.2. Barreiras ao armazenamento de energia

Existem várias barreiras para a implantação de recursos de armazenamento de energia e estabelecimento de seus mercados. O termo barreira é amplamente definido como um problema que dificulta a implementação de tecnologias. Em alguns casos, uma barreira pode impedir a implantação; e em outros, pode limitar a implantação, limitar a receita ou limitar considerações para a implantação (Bhatnagar et al., 2013b).

Embora a principal barreira para a implantação de recursos de armazenamento de energia, em muitos casos, possa ser os elevados custos de capital, existem barreiras adicionais incorporadas em regras e regulamentos que impedem a implantação dos recursos de armazenamento em situações em que estes são a alternativa economicamente preferida de mercado.

Podem ser considerados 5 tipos principais de barreiras ao mercado do armazenamento (Bhatnagar et al., 2013a), as quais podem ser subdivididas, como observa-se na Tabela 5.

As barreiras são: regulatórias, econômicas, na modelagem de negócios, *crosscutting* e tecnológicas.

Em relação às subdivisões, tem-se:

Tabela 5 - Barreiras a implantação dos SAEs (Bhatnagar et al., 2013a)

		Barreiras				
		Regulatórias	Econômicas (de mercado)	Modelagem de negócios	Crosscutting*	Tecnológicas
Subdivisões	Questões administrativas		Mecanismos de compensação de receita		Conhecimento limitado das partes interessadas	
	Restrições de classificações funcionais e questões de alocações de custos		Ausência de mercados	Incertezas e riscos para concessionárias e desenvolvedores	Restrições de modelo e falta de recursos de modelagem	Altos custos das tecnologias
	Discrepâncias de regras entre os mercados		Ausência de sinais de preço			

*O termo *crosscutting* não possui tradução em português, mas refere-se à ideia de transversalidade. Neste caso, pode-se admitir que são barreiras que atingem todas as partes interessadas.

- Questões administrativas: o atraso administrativo em implementar regulação ao setor constitui-se em uma barreira. Isso ocorre, em parte, devido à complexidade das questões regulatórias com as quais se depara o armazenamento de energia, como também da necessidade de uma avaliação compreensiva sobre as mudanças propostas às regras operacionais e de mercado.

- **Restrições de classificações funcionais e questões de alocações de custos:** Recursos de armazenamento de energia são tecnicamente capazes de fornecer serviços em cada uma das classificações funcionais de produção (geração), transmissão e distribuição (T&D). No entanto, as restrições regulamentares, juntamente com as práticas e exigências contábeis, e a falta de clareza e transparência nestas práticas e requisitos, efetivamente impede que um utilitário ou desenvolvedor possa obter receita com um recurso de prestação de serviço sob múltiplas classificações. O problema ocorre na impossibilidade de utilizar o sistema simultaneamente para mais de um serviço. Um detentor potencial de um SAE pode não considerar o sistema como apto a desempenhar múltiplas funções, por causa dos recursos financeiros envolvidos na apresentação do projeto antes de ser comissionado. Isto pode resultar na determinação que a fonte de armazenamento não é uma opção econômica, quando ela pode ser.

- **Discrepância de regras entre mercados:** No intuito de maximizar sua receita potencial, muitos desenvolvedores pretendem operar em vários mercados diferentes. Esta é uma questão cada vez mais difícil, à medida que cada um destes mercados tem as suas características próprias em relação aos sistemas, às partes interessadas, regulamentos e modelos de mercado. Esta inconsistência adiciona um nível de complexidade para os desenvolvedores que desejam implantar recursos do sistema de armazenamento em vários mercados. Análises separadas são necessárias para cada mercado, de modo a determinar o panorama regulamentar, as necessidades do mercado e o lucro potencial. Para lidar com esta questão e incertezas do mercado, os desenvolvedores exploram o desenvolvimento em vários mercados. Esse problema, apesar de se aplicar a outros recursos, talvez seja mais importante para o armazenamento de energia, devido à dificuldade de criar modelos de negócio, com fluxos de receitas que são difíceis de prever.

- **Mecanismos de compensação de receita:** refere-se à impossibilidade de receber uma compensação adequada em prestação de serviços auxiliares. Mercados de serviços auxiliares são inerentemente projetados em torno do conceito de que os serviços auxiliares são fornecidos como adicionais requeridos pelo sistema de potência, ou seja, serviços que vão além da missão principal de fornecimento de energia. Preços dos serviços auxiliares refletem custo de oportunidade para os geradores, quando eles retêm a capacidade do mercado de energia, a fim de fornecer serviços auxiliares. Sistemas de armazenamento de energia que prestam serviços auxiliares não são compensados pelo seu desempenho. Esta configuração pode dissuadir a seleção eficiente dos recursos

e, assim, a eficiência do mercado.

- **Ausência de mercados:** A falta de mercados e preços de mercado para serviços de resposta inercial, *black-start* e potência reativa, torna difícil e às vezes impossível, dependendo da situação, que um desenvolvedor de armazenamento de energia considere um recurso para a prestação destes serviços, de forma independente ou como parte da prestação de outros serviços do sistema, o que recai na dificuldade de implantação do modelo de negócio.

- **Ausência de sinais de preço:** diz respeito também aos mercados de serviços auxiliares. A dificuldade na determinação dos preços de mercado para estes serviços torna difícil para os desenvolvedores independentes considerarem os recursos de armazenamento de energia competitivos em relação a outros recursos para contratos. O que pode ajudar os desenvolvedores e reguladores é olhar para os preços nos mercados próximos para estimar o valor disponível para fornecer serviços diferentes. Concessionárias podem ajudar os desenvolvedores e reguladores a avaliar a economia do sistema. Em geral, uma maior transparência dos preços e procedimentos de compensação devem ajudar a aumentar a eficiência do sistema e reduzir os custos para os contribuintes.

- **Incertezas e riscos:** concessionárias e desenvolvedores consideram as seguintes questões como fatores de incerteza, que podem impedi-los de considerar a implementação de SAE: Economia, capacidades técnicas, desempenho do ciclo de vida e longevidade dos recursos de armazenamento de energia não são bem compreendidos por muitos intervenientes do sistema de potência; Incertezas econômicas levam à variabilidade nos preços da demanda, energia e serviços auxiliares; A variabilidade dos preços dos combustíveis, especialmente nos preços do gás natural, os quais podem mudar; Regulamentos sobre a poluição e proteção ambiental, que ainda não existe para estes casos, e nem se sabe de que forma serão implementados; Continuidade do desenvolvimento tecnológico de recursos do sistema de energia atuais e novos, incluindo o desenvolvimento de tecnologia de armazenamento de energia; Continuidade das mudanças regulatórias.

- **Conhecimento limitado das partes interessadas:** É preciso educar as concessionárias e indústria sobre as funções e benefícios dos SAEs. A inexperiência daqueles em relação aos recursos de armazenamento de energia ainda é relativamente usual e pode ser um desafio para uma maior implantação. Inexperiência com tecnologias de armazenamento pode levar a uma falta de consideração dos recursos de armazenamento entre os serviços públicos, promotores e autoridades reguladoras que não podem compreender totalmente as tecnologias e as suas capacidades.

- **Restrições de modelo e falta de recursos de modelagem:** Embora a capacidade de modelagem esteja a aumentar em sofisticação, os recursos de modelagem de muitas concessionárias estão limitados a modelagem de recursos tradicionais para um sistema de energia tradicional com geração previsível e carga previsível. Com a implantação de geração variável renovável, armazenamento de energia e outras tecnologias do lado da geração, e resposta à demanda, programas de eficiência energética gerenciamento pelo lado da demanda, esses recursos não são mais suficientes. As ferramentas são muitas vezes inadequadas para a comparação do armazenamento de energia em relação a outros investimentos.

- **Altos custos das tecnologias:** Em vários casos, as concessionárias e desenvolvedores têm experiência com o armazenamento de energia e avaliaram o uso dos SAEs para fornecer vários serviços, mas ainda não veem uma justificativa econômica para a sua utilização. Nessas situações, alternativas para recursos de armazenamento de energia são mais competitivos. A continuação da investigação em tecnologias de armazenamento de energia, para reduzir custos, é crucial para torná-la mais competitiva. Ao invés do processo típico de melhorias marginais para a obtenção de ganhos marginais no desempenho, tais pesquisas poderiam ser orientadas para tecnologias que proporcionem capacidades de desempenho específicos, e que atendam às necessidades do sistema de energia aos mais baixos custos possíveis.

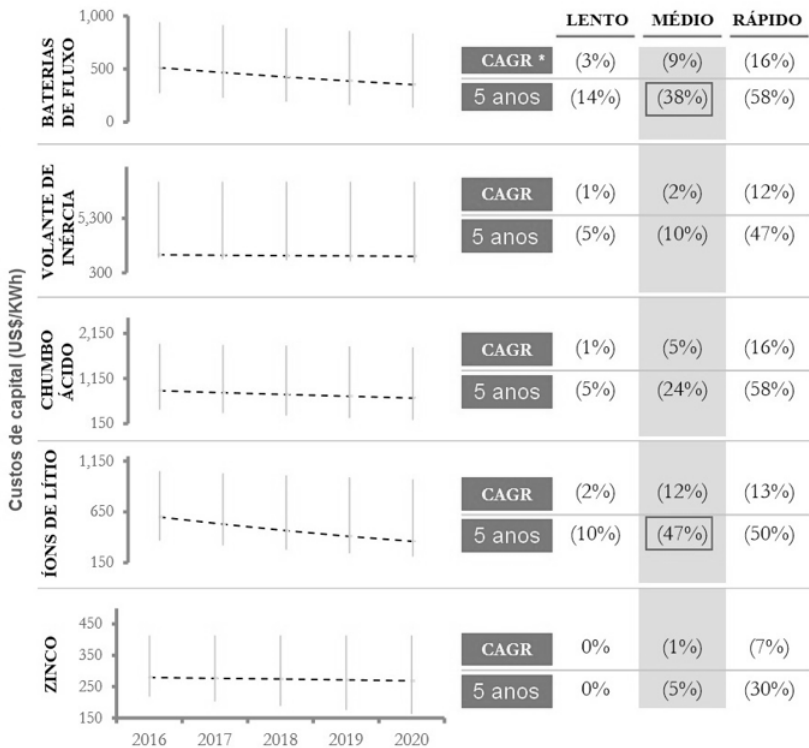
Discutidas essas barreiras, entende-se que, de maneira mais ampla, as soluções consistem no estabelecimento de mercados, tecnologias, políticas e incentivos apropriados. Além disso, é necessário o financiamento de programas de P&D na área, com o intuito de fomentar o desenvolvimento tecnológico. Por fim, o estímulo à comercialização também seria importante, já que o aumento da produção contribuiria para a queda do preço das alternativas de armazenamento.

Para tal, é necessário um esforço conjunto dos governos, indústria, universidades, centros de pesquisa, empresas, e da comunidade financeira.

4.3. Custos e perspectivas

Apesar das barreiras apresentadas anteriormente, pesquisas indicam que os participantes da indústria esperam declínios do custo de capital significativos para as tecnologias de armazenamento de energia ao longo dos próximos cinco anos, impulsionados principalmente pelo aumento da escala de produção e melhorias de design/engenharia (LAZARD, 2015).

A Figura 6 apresenta as diminuições projetadas para os custos de capital (US\$/kWh) de cinco tecnologias, anualmente e num horizonte de 5 anos, de acordo com (LAZARD, 2015). São apresentados três cenários para o decrescimento percentual dos custos: lento, médio e rápido. Observa-se que para as tecnologias das baterias de íons de lítio e baterias de fluxo, as expectativas são otimistas. Alguns fatores que devem contribuir para estas estimativas são melhorias na produção e design destas baterias, bem como a redução de materiais de alto custo que são requeridos na manufatura das mesmas. No caso específico das baterias de íons de lítio, pode-se citar o aumento da escala de produção nos próximos anos.



*CAGR é a taxa composta de crescimento anual ou taxa de rentabilidade interna, derivada do inglês Compound Annual Growth Rate.

Figura 6 - Diminuições projetadas para o custo de capital no horizonte anual e em 5 anos (LAZARD, 2015)

Já em relação às outras tecnologias apresentadas, podem ser considerados outros direcionadores prováveis ao decrescimento apresentado para cada uma. Por exemplo, no caso dos volantes de inércia, um direcionador trará melhorias na sustentabilidade operacional

(na capacidade de remover o calor, maior eficiência do motor/ gerador, etc.). Já para as baterias de zinco, que já são alternativas de relativo baixo custo, mas que ainda não utilizadas comercialmente, a redução de custos não será tão expressiva, e dependerá de sua manufatura em escala, de melhorias para reduzir os custos de seus subcomponentes, e melhorias químicas que aumentem a longevidade e faixa de operação das mesmas.

Se considerado o desenvolvimento do armazenamento de energia entre o terceiro quadrimestre de 2013 e 2015 nos Estados Unidos, para aplicações Em frente ao medidor e Antes do medidor, observa-se um crescimento de aproximadamente 20 MW para o primeiro, e 14 MW para o último, como mostra a Figura 7 (US-ESM, 2015).

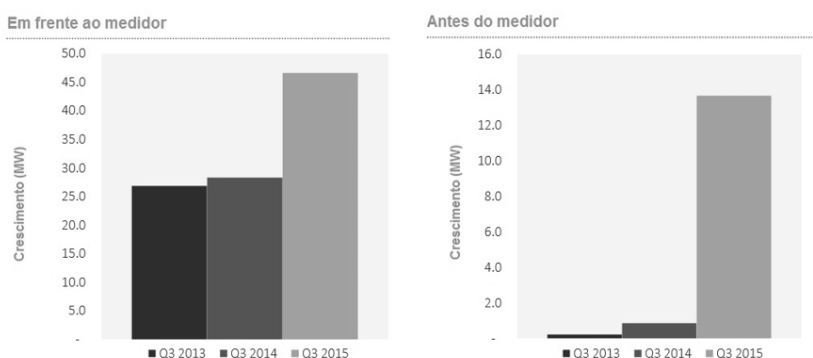


Figura 7 - Crescimento entre quadrimestres das aplicações do armazenamento (US-ESM, 2015)

O crescimento total, apresentado na Figura 8, para o terceiro quadrimestre de 2015, foi 46% maior que o valor para o segundo quadrimestre do mesmo ano, e aproximadamente o dobro do crescimento observado para o mesmo quadrimestre em 2014.

A seguir, são apresentadas ilustrações comparativas entre os custos de capital (US\$) atuais de algumas tecnologias de armazenamento, de acordo com as estimativas de (US-ESM, 2015). A Figura 9 apresenta estes custos para aplicações Em frente ao medidor, e a Figura 10 apresenta custos para aplicações Antes do medidor.

Observa-se que, para aplicações residenciais, por exemplo, as baterias de fluxo possuem, comparativamente, o menor custo, enquanto as baterias de chumbo-ácido possuem o valor mais elevado. Outro fator a ser percebido é o menor valor de custo em várias aplicações, atribuído às baterias de zinco, que apesar de terem sido representadas no estudo, ainda não são comercializadas em larga escala.

Considerando a maioria das aplicações, as baterias de chumbo-ácido se apresentam como a de maior custo, exceto pelos casos em que podem ser utilizados volantes de inércia, para regulação de

frequência ou baterias de fluxo para aplicações em micro redes.

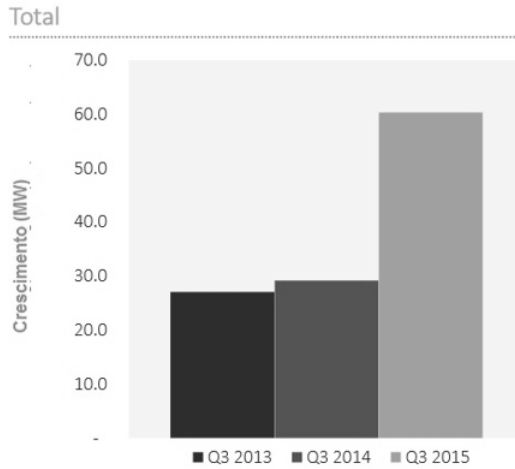


Figura 8 - Crescimento total entre quadrimestres das aplicações do armazenamento (US-ESM, 2015)

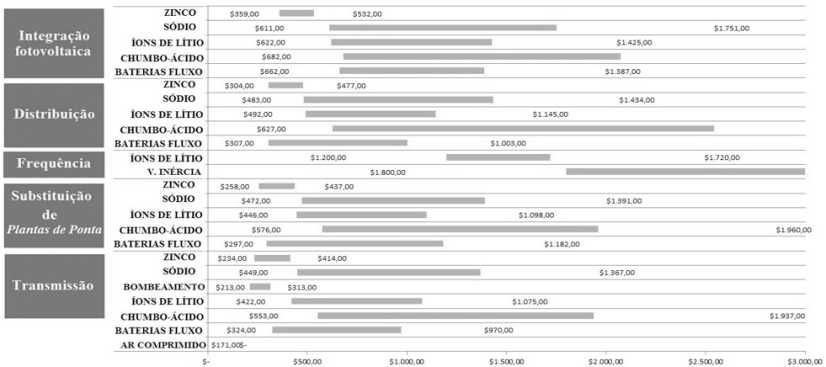


Figura 9 - Custo de capital (US\$) comparativo para aplicações Em frente ao medidor (US-ESM, 2015)



Figura 10 - Custo de capital (US\$) comparativo para aplicações Antes do medidor (US-ESM, 2015)

5.CONCLUSÕES

Pode-se concluir com este trabalho que as tecnologias de armazenamento são variadas e encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento. Essas podem ser aplicadas em situações diversas, de acordo com suas particularidades, e de acordo com a aplicação, existirão vantagens e desvantagens em seu uso. Conclui-se que existem muitas barreiras em relação às aplicações modernas dos sistemas de armazenamento na rede elétrica. Apesar disso, espera-se uma penetração considerável dessas aplicações em diferentes mercados. Entende-se que, considerando as barreiras tecnológicas, o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos sistemas de otimização dos sistemas de armazenamento são fatores que impulsionam o crescimento dos mercados onde o armazenamento pode ser aplicado. Percebe-se que, para avaliar determinado tipo de armazenamento, uma metodologia deve considerar diversidade em localização e aplicação, modelos de propriedade, operação e controle, informação local sobre regulação, tarifas, regras de mercado, clima, etc. Estas metodologias precisam de visibilidade operacional em alta fidelidade para capturar reciprocidade entre dispositivos e suas aplicações, considerando a rede elétrica moderna e complexa atual; além de necessitar de um sistema de avaliação complexo para calcular impactos. Além disso, entende-se que a avaliação financeira do sistema de armazenamento é também complexa e precisa de integração dos benefícios para o proprietário/operador e para a sociedade/rede. Considerando o cenário atual, os objetivos futuros dos países líderes podem ser reunidos em: Expansão da indústria do armazenamento e das aplicações das tecnologias, seja na rede elétrica ou no setor de transportes; Geração de emprego por meio dessas indústrias; Garantir a liderança e propriedade intelectual

de novas tecnologias na área; Estabelecer regras claras e eficientes para estes mercados emergentes. Todos estes objetivos estão interligados, e podem ser atingidos se aproveitadas as oportunidades de mercado. Espera-se que a indústria do armazenamento cresça para US\$19 bilhões até 2017, e que o mercado de armazenamento de energia dos Estados Unidos sozinho atinja em torno de 240 GW até o ano de 2030, excluindo-se o setor dos carros elétricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL (2001) Procedimentos de Rede. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Distrito Federal, 2001.

BHATNAGAR, D.; Currier, A.; Hernandez, J.; Ma, O.; Kirby, B. (2013a). Market and Policy Barriers to Energy Storage Deployment - A Study for the Energy Storage Systems Program. Sandia Report SAND2013-7606.

BHATNAGAR, D.; Currier, A.; Hernandez, J.; Ma, O.; Kirby, B. (2013b). Market and Policy Barriers to Energy Storage Deployment. Sandia Report 2013-7606.

DIAS, M.V.X; Bortoni, E.C.; Haddad, J. (2006). Geração Distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras. Revista Brasileira de Energia, Itajubá-MG, v. 11, n.2, p. 137-156.

DOE e SANDIA (2012). Global Energy Storage Database. U.S. Department of Energy e Sandia National Laboratories.

EPRI e DOE (2003) Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications. Electric Power Research Institute e U.S. Department of Energy.

EPRI e DOE (2013) Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. Electric Power Research Institute e U.S. Department of Energy.

ESA (2015), Energy Storage Association - ESA. Info. Disponível online em: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-technologies>.

FAIAS, S.; Sousa, J.; Castro, R. (2009). Embedded Energy Storage Systems in the Power Grid for Renewable Energy Sources Integration. Renewables Energy, T J Hammonds (Ed.), ISBN: 978-953-7619-52-7, InTech. Dezembro de 2009.

FARRET, F.A.; Simões, M.G. (2006), Integration of Alternative Sources of Energy. John Wiley & Sons. University of Michigan. 504 p.

IRENA (2015) Battery storage for renewables: market status and technology outlook. International Renewable Energy Agency.

KIRBY, B. (2004) Frequency Regulation Basics and Trends. Oak Ridge National Laboratory.

LAHAIRI, S. e Kleiberg, M. (2015) Tutorial Energy Storage: An Introduction to Technologies, Applications and Best Practices. Part 3. IEEE PES General Meeting 2015. Denver/CO, USA.

LAZARD (2015) Levelized cost of storage analysis – version 1.0. Lazard Corporation Report.

NERC (2015) Glossary of Terms Used in NERC Reliability Standards. North American Electric Reliability Corporation.

SANDIA (2015) Electricity Storage Handbook (ESHB 3RG). Sandia National Laboratories Report SAND2015-4982 M.

SCHIER, J. (2007) Análise Comparativa de Metodologias de Alocação de Serviços Ancilares de Reserva em Mercados de Energia Elétrica. Dissertação de mestrado UFSC.

SILVA, B. F. G. (2008), Estudo de Soluções Alternativas de Armazenamento de Energia para Diferentes Horizontes Temporais. Dissertação de mestrado. Universidade do Porto.

THUMANN, A.; Woodroof, E. A. (2008). Energy Project Financing: Resources and Strategies for Success. Fairmont Press, University of Michigan, 462 p.

US-ESM (2015). Q3 2015 Executive Summary. U.S. Energy Storage Monitor.

ZAREIPOUR, H. (2015). Tutorial Energy Storage: An Introduction to Technologies, Applications and Best Practices. Part 1. IEEE PES General Meeting 2015. Denver/CO, USA.

