

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Yáscara Fabrina Fernandes da Costa e Silva

**Um modelo para seleção e operação otimizada de sistemas de
armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes**

Itajubá, maio de 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Yáscara Fabrina Fernandes da Costa e Silva

**Um modelo para seleção e operação otimizada de sistemas de
armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Gestão e Planejamento de Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Itajubá, maio de 2016.

RESUMO

Esta dissertação refere-se ao estudo dos sistemas de armazenamento de energia, sua seleção e aplicação otimizada num contexto de redes inteligentes. Nos dias atuais, a viabilização da implantação desses sistemas na rede elétrica do futuro é um tema bastante discutido globalmente. No Brasil, as tecnologias de armazenamento ainda não são amplamente implementadas, considerando-se as aplicações mais modernas na rede elétrica. Portanto, considera-se importante a realização desta dissertação, já que são necessárias ainda as bases para o estabelecimento eficiente de tais tecnologias, bem como a regulação deste novo mercado, o qual já começa a se desenvolver em países como Estados Unidos, Alemanha e Japão. A partir da escolha do tema, foram definidos os objetivos do estudo, e realizada a revisão da literatura, a qual é composta pela explanação acerca dos seguintes pontos principais: características das tecnologias de armazenamento; incluindo seus serviços, vantagens e desvantagens; aspectos econômicos e de mercado relacionados a estas tecnologias; e ferramentas de otimização. A parte prática da dissertação inicia-se com a proposição da lógica do problema, a partir daí será desenvolvida a formulação de um modelo matemático básico para otimização, a ser implementado por meio do software LINDO.

PALAVRAS-CHAVE:

Armazenamento de energia, Otimização, Programação linear.

ABSTRACT

This paper refers to the study of energy storage systems, its selection and optimized application in the context of smart grids. Nowadays, the feasibility of implementing these systems in the future electrical grid is a topic much discussed globally. In Brazil, as in many other countries, storage technologies are not yet widely implemented, considering the latest applications in the electrical grid. Therefore, it was considered important carrying out this paper, since the basis for the efficient establishment of such technologies are still required, as well as the regulation of this new market, which is beginning to be developed in countries such as the United States, Germany and Japan. After choosing this subject, the main study objectives were defined and a literature review was prepared, which consists of the explanation on the following main points: characteristics of storage technologies; including its services, advantages and disadvantages; economic and market aspects related to these technologies; and optimization tools. The practical part of the paper begins with the proposition of the problem's logic, so it could be developed the formulation of a basic mathematical model for optimization to be implemented using the software LINDO.

KEYWORDS:

Energy Storage, Optimization, Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais usos dos sistemas de armazenamento na sociedade.....	7
Figura 2 - Capacidade do armazenamento (MWe) instalada mundialmente.....	8
Figura 3 - Comparativo das tecnologias de armazenamento em relação à potência e tempo de descarga.	8
Figura 4 - Ilustração do ciclo convencional em uma instalação de ar comprimido.	12
Figura 5 - Planta típica de armazenamento por bombeamento hidráulico.	14
Figura 6 - Capacidade (MW) instalada e planejada do armazenamento por baterias ao redor do mundo.	15
Figura 7- Sistema de armazenamento por baterias e seus componentes.	15
Figura 8 - Representação de um Sistema de Gerenciamento de Baterias completo.....	16
Figura 9 - Esquema ilustrativo das baterias de fluxo redox.	20
Figura 10 - Esquema do SMES.	21
Figura 11 - Comparação capacitor/supercapacitor/baterias em geral.....	21
Figura 12 - Sistema HESS.	23
Figura 13 - Ilustração da configuração <i>Em frente ao medidor</i>	26
Figura 14 - Ilustração da configuração <i>Antes do medidor</i>	27
Figura 15 - Diminuições projetadas para o custo de capital no horizonte anual e em 5 anos. .	35
Figura 16 - Crescimento entre quadrimestres das aplicações do armazenamento.	36
Figura 17 - Crescimento total entre quadrimestres das aplicações do armazenamento.	36
Figura 18 - Custo de capital (US\$) comparativo para aplicações <i>Em frente ao medidor</i>	38
Figura 19 - Custo de capital (US\$) comparativo para aplicações <i>Antes do medidor</i>	39
Figura 20 - Situações operacionais possíveis consideradas no item 2.	47
Figura 21 - Fluxograma referente à lógica de operação do sistema.	49
Figura 22 - Encadeamento temporal do sistema de armazenamento.....	51
Figura 23 - Gráfico da oferta da fonte renovável (todos os testes).....	55
Figura 24 - Gráfico da demanda da carga (todos os testes).....	56
Figura 25 - Gráfico de variabilidade do preço para os Testes 1 e 2.	56
Figura 26 - Consumo da concessionária no Teste 1.	57
Figura 27 - Consumo da concessionária no Teste 2.	58
Figura 28 - Consumo da concessionária no Teste 3.	58
Figura 29 - Consumo da concessionária no Teste 4.	59
Figura 30 - Consumo da concessionária no Teste 5.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sumário de características das tecnologias de armazenamento.	23
Tabela 2 - Serviços e benefícios do armazenamento de energia.	24
Tabela 3 - Usos dos sistemas de armazenamento <i>Em frente ao medidor</i> em contraste com opções convencionais.	28
Tabela 4 - Usos dos sistemas de armazenamento <i>Antes do medidor</i> em contraste com opções convencionais.	29
Tabela 5 - Barreiras a implantação dos SAEs.	31
Tabela 6 - Dados de entrada dos armazenadores.	53
Tabela 7 - Valores de preços utilizados.	56
Tabela 8 - Valores de consumo (kW) para todos os testes.	59

LISTA DE SIGLAS

ARES	<i>Advanced Rail Energy Storage</i>
CA	Corrente Alternada
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> (Custo de investimento)
CC	Corrente Contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
FESS	<i>Flywheels Energy Storage System</i>
FO	Função Objetivo
GD	Geração Distribuída
HESS	<i>Hydrogen Energy Storage System</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> (Custo de manutenção)
PHS	<i>Pumped Hydro Storage</i>
PPA	<i>Power Purchase Agreements</i>
RHS	<i>Right Hand Side</i>
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
VRLA	<i>Valve-regulated Lead-acid</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Justificativa	9
1.2 Metodologia	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Geral	10
1.3.2 Específicos	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Definição e características	11
2.1.1 Armazenamento por ar comprimido	11
2.1.2 Bombeamento hidráulico	13
2.1.3 Baterias	14
2.1.4 Supercondutores	20
2.1.5 Capacitores e supercapacitores	21
2.1.6 Volantes de Inércia	22
2.1.7 Armazenamento por hidrogênio	22
2.2 Aplicações e benefícios	24
2.3 Aspectos econômicos e de mercado	29
2.3.1 Modelos de propriedade de um sistema de armazenamento	29
2.3.2 Barreiras ao armazenamento de energia	30
2.4 Custos e perspectivas	34
2.5 Otimização de sistemas de armazenamento de energia elétrica	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 Lógica do Problema de Otimização proposto	46
3.2 Modelo energético para baterias	50
3.2.1 Balanço de potências	50
3.2.2 Balanço de carregamento do armazenamento	50
3.2.3 Níveis mínimos e máximos (limites)	51
3.3 Implementação do modelo e testes	52
3.4 Resultados	57
4 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	62
REFERÊNCIAS	64

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 alternativos. Os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) possuem um papel importante na unificação, distribuição e ampliação da capacidade dos sistemas de geração distribuída (GD)[1].

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, é aprimorada a efetividade dos recursos existentes, é aumentada a eficiência, e são reduzidos os impactos ambientais.

Entende-se que as aplicações dos sistemas de armazenamento não são direcionadas somente ao setor elétrico, mas também ao setor de transportes; é o caso dos carros elétricos. A Figura 1 mostra alguns exemplos de aplicações dos SAEs.



Figura 1 - Principais usos dos sistemas de armazenamento na sociedade.

Apesar de seu grande potencial, a capacidade de armazenamento de energia elétrica instalada mundialmente ainda é de apenas 2% da capacidade elétrica total[2]. Destes 2%, 99% refere-se ao armazenamento por bombeamento hidráulico, como mostra a Figura 2:

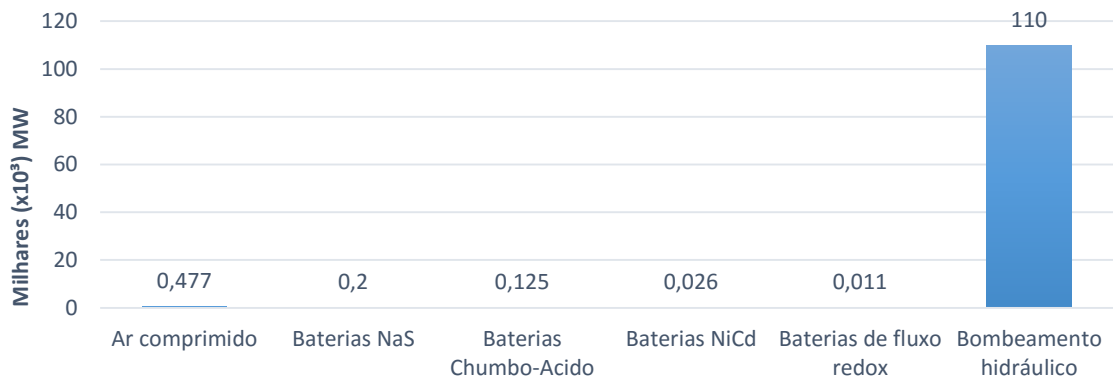


Figura 2 - Capacidade do armazenamento (MWe) instalada mundialmente.

Fonte: Adaptado de [2]

As expectativas para o futuro dos SAEs são otimistas e consideram o desenvolvimento de outras tecnologias, como baterias residenciais Tesla, 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[2]. Para avaliar as vantagens e desvantagens de um SAE, de modo a poder considera-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 3 apresenta alguns tipos principais de tecnologias de armazenamento, relacionando os valores típicos de potência e tempo de descarga.

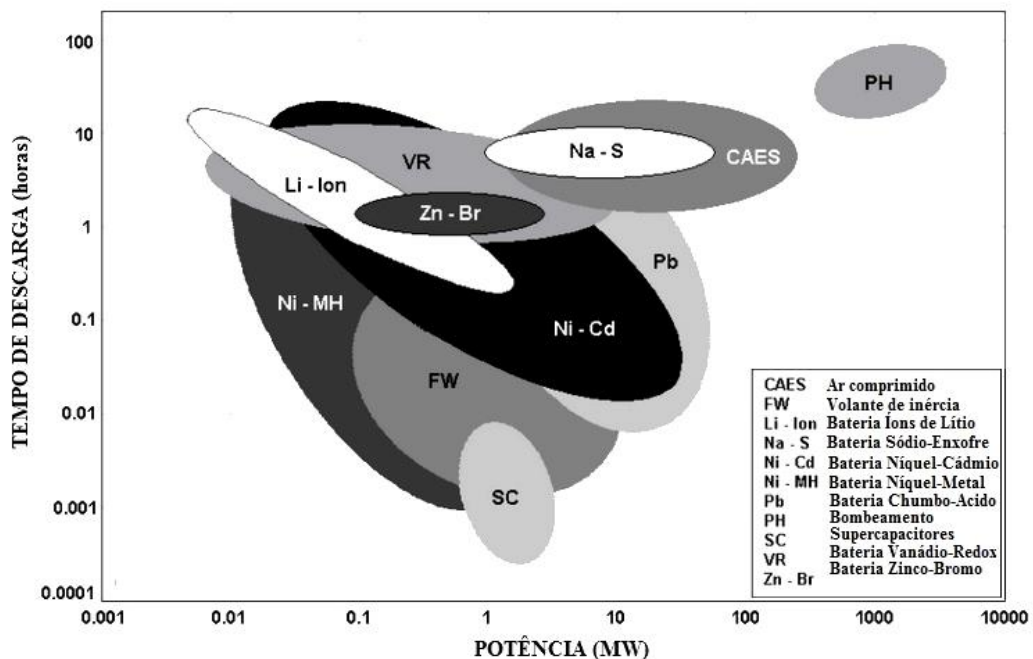


Figura 3 - Comparativo das tecnologias de armazenamento em relação à potência e tempo de descarga.

Fonte: [3]

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, etc.

Esta dissertação busca discutir de modo geral estes aspectos, estudando o problema da gestão integrada da geração de eletricidade com os SAEs. De modo mais específico, a dissertação abordará a parte técnica relacionada à seleção do melhor dispositivo de armazenamento para a situação proposta, bem como otimizará a operação deste dispositivo.

Esta dissertação é composta de 4 capítulos. No presente capítulo é feita uma introdução aos demais, mostrando o cenário geral em que se aplicam as tecnologias de armazenamento; o capítulo 2 consiste numa revisão bibliográfica, na qual se apresentam definições e características de variadas tecnologias de armazenamento, suas aplicações, bem como se discutem fatores econômicos e de mercado relacionados às mesmas. Para o finalizar o capítulo 2, trata-se de modelos e métodos de otimização aplicados a sistemas de armazenamento de energia elétrica.

O capítulo 3 consiste em Materiais e Métodos, no qual é formalizado o problema de otimização, descrita a implementação do modelo e apresentados os resultados dos testes. A descrição e avaliação dos objetivos alcançados, bem como sugestões para futuros trabalhos são apresentadas na Conclusão, o último capítulo desta dissertação.

1.1 Justificativa

A motivação desta dissertação é iniciar, considerando a pesquisa na Universidade Federal de Itajubá, a investigação dos sistemas de armazenamento de energia, num contexto de redes inteligentes. Justifica-se a realização deste dissertação por meio esforço acadêmico que vem a contribuir para o desenvolvimento do estudo e aplicação dos sistemas de armazenamento de energia elétrica, como também a elaboração de ferramenta que possa servir na difusão do conhecimento a respeito desses.

1.2 Metodologia

A pesquisa partiu do levantamento de um problema tratado globalmente: a inserção dos sistemas de armazenamento de energia elétrica nas redes inteligentes de maneira otimizada. Considera-se importante a realização desta dissertação, pois no Brasil são necessárias ainda as

bases para a inserção eficiente de tais tecnologias na rede elétrica, bem como a regulação deste novo mercado, o qual já começa a se desenvolver em países como Estados Unidos, Alemanha e Japão.

A partir da elaboração do problema, são definidos os objetivos do estudo e realizada a revisão da literatura, a qual é composta pela explanação acerca de três pontos principais: características das tecnologias de armazenamento; aspectos econômicos e de mercado relacionados a estas tecnologias; e ferramentas de otimização.

Finalizado o referencial teórico, é desenvolvida a lógica do problema, a qual é implementada através de um modelo matemático de otimização; este é utilizado para realizar testes às quais se relacionam com os objetivos geral e específicos desta pesquisa, apresentados no item 1.3.

1.3 Objetivos

Os itens 1.3.1 e 1.3.2 apresentam, respectivamente, os objetivos geral e específicos desta dissertação.

1.3.1 Geral

O objetivo geral desta dissertação é otimizar a seleção e operação de um sistema de armazenamento, de modo que este atenda a uma carga residencial, proporcionando à esta redução de custos com energia elétrica.

1.3.2 Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

1. Realizar um estudo bibliográfico sobre as tecnologias de armazenamento, abordando um breve histórico de sua existência, definição, características principais, vantagens e desvantagens, seu campo de aplicação, aspectos econômicos e de mercado;
2. Apresentar modelos de otimização aplicados especificamente aos problemas que envolvem sistemas de armazenamento;
3. Formular matematicamente um modelo de otimização que apresente uma solução ótima para seleção e operação de sistemas de armazenamento visando retorno para o investidor;
4. Realizar testes com este modelo, analisando sua aplicabilidade.

2 Revisão Bibliográfica

“Armazenar” significa: guardar ou recolher, conter em depósito, acumular(-se), fazer provisões.[4] 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 [5]: 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.

2.1 Definição e características

Nesta seção são apresentadas as definições e características de algumas tecnologias de armazenamento, tais como: ar comprimido (CAES); bombeamento hidráulico (PHS); baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd), sódio-enxofre (NaS), íons de lítio, fluxo redox, zinco-bromo (ZnBr) e vanádio redox (VR); super condutores (SMES); volantes de inércia; capacitores e super capacitores; e hidrogênio.

2.1.1 Armazenamento por ar comprimido

O conceito tecnológico de armazenamento de energia por ar comprimido, também conhecidos por CAES *Compressed Air Energy Storage*, tem mais de 40 anos. O CAES foi seriamente investigado na década de 1970, como um meio para fornecer rastreamento de carga e para atender a demanda de pico, e encontra-se disponível comercialmente desde os anos 80. Estes sistemas vêm sendo implantados para fornecer energia sob demanda para cidades e indústrias [2]. Exemplos de plantas de armazenamento por ar comprimido são:

- Huntorf, Alemanha: capacidade de 290MW por 2 horas, em operação desde 1978, usada para suprimento da rede durante aproximadamente 3 horas por dia. Seu tempo de partida (entrada em operação) é de aproximadamente 8 minutos;
- McIntoch, Estados Unidos da América: capacidade de 110MW por 26 horas, usada em horários de pico. Tempo de partida entre 10 e 12 minutos.

Como o próprio nome sugere, neste tipo de sistema a energia é armazenada em um gás comprimido, que normalmente fica contido em um reservatório subterrâneo. Esta energia será aproveitada através da retirada deste ar do reservatório, do aquecimento e, em seguida, da expansão deste em turbinas de alta pressão, as quais estão conectadas a um gerador elétrico [6]. De modo geral, os componentes de uma instalação convencional de CAES incluem: sistema motor/gerador; turbo compressor(es); turbo expensor(es); resfriador(es); sistema de controle; equipamentos auxiliares (sistema elétrico, mecânico, de resfriamento, trocadores de calor, armazenamento de combustível, etc); e o reservatório subterrâneo, incluindo tubulações e acessórios.

Estes componentes podem variar, a depender do ciclo termodinâmico empregado em determinada instalação, mas os turbo compressores e expansores são os mais importantes. Alguns exemplos de fabricantes destes componentes são: Alstom, ABB, Dresser-Rand, etc.

A seleção de qualquer um dos ciclos (convencional, com recuperação, combinado, com injeção de vapor, com umidificação e adiabático) leva em conta características específicas do local e requisitos de funcionamento, o que tem um impacto significativo sobre os custos da planta, a seleção de seus componentes e características gerais de funcionamento/desempenho.

A Figura 4 a seguir apresenta o ciclo convencional do CAES.

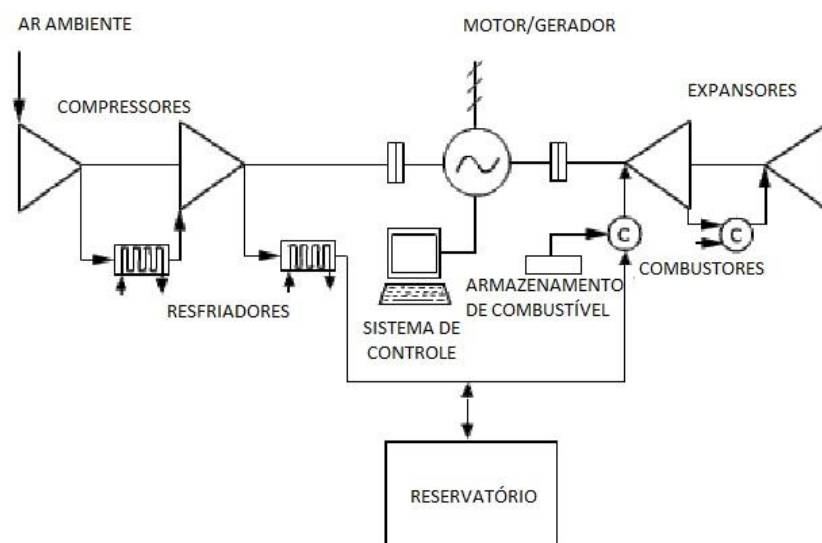


Figura 4 - Ilustração do ciclo convencional em uma instalação de ar comprimido.

Fonte: [6]

O método convencional utilizado para o aproveitamento do ar comprimido é o diabático, no entanto, está prevista para 2018 a primeira usina utilizando método adiabático, na Alemanha. Também são investigados outros dois métodos ainda não comerciais: o adiabático avançado e o isotérmico [5].

Atualmente, as plantas de armazenamento por ar comprimido podem ser consideradas substitutas das plantas de armazenamento por bombeamento, já que estas tecnologias são bastante semelhantes em termos de aplicações, produção e capacidade de armazenamento, como também em relação ao custo de investimento (CAPEX) e manutenção (OPEX).

2.1.2 Bombeamento hidráulico

Na maior parte do último século, o armazenamento por bombeamento hidráulico ou PHS *Pumped Hydro System*, tem sido utilizado nos Estados Unidos e ao redor do mundo. Atualmente, esta é uma das tecnologias de armazenamento mais bem estabelecidas, e a mais comumente utilizada em escala de rede. Existem mais de 250 instalações em todo o mundo, acumulando um total de 127GW de capacidade de geração[2]. Alguns exemplos são:

- Cabin Creek, Colorado (USA), constituída de duas unidades de 324MW construídas em 1967;
- Racoon Mountain, operacional desde 1979, com capacidade de 1620MW.

O princípio utilizado neste tipo de armazenamento é que, dados dois reservatórios com cotas diferentes, durante os períodos fora de pico, é bombeada água do reservatório com cota inferior para o outro com cota maior. Quando se necessita de energia, a água do reservatório superior é turbinada ao reservatório inferior, produzindo energia. A capacidade de armazenamento irá depender basicamente da altura da queda de água e do volume de água armazenada. Esta tecnologia de armazenamento tem a maior capacidade de todas as tecnologias de armazenamento avaliadas, porque o seu tamanho é limitado apenas pelo tamanho dos reservatórios superior e inferior disponíveis. [7]

Algumas variações na aplicação do armazenamento por bombeamento são[5]:

- **Bombeamento com reservatório sub-superfície:** um ou ambos reservatórios se localizam sub-superfície. São atrativos pela maior disponibilidade de local e potencial para redução de impactos ambientais;
- **Bombeamento com velocidade variável:** Possuem como maior benefício a sintonização com a frequência da rede, o que possibilita estabilidade e regulação de frequência, importantes quando se trata de geração renovável intermitente. A

opção por esta alternativa deve confrontar este benefício em relação à desvantagem de um esquema de controle mais complicado necessário.

A Figura 5 ilustra o diagrama de uma planta de bombeamento hidráulico básica.

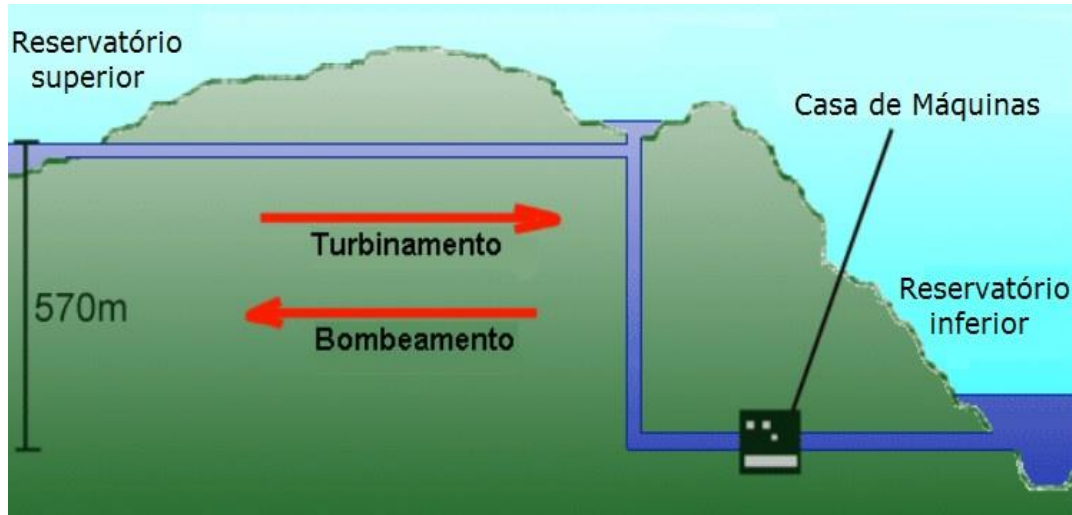


Figura 5 - Planta típica de armazenamento por bombeamento hidráulico.
Fonte: [7]

2.1.3 Baterias

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. [8]

A maneira e as condições sob as quais são usadas baterias afetam sua performance, custo, e vida útil. A capacidade de uma bateria 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[9]. 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. [9] A Figura 6 apresenta um gráfico da capacidade instalada e planejada do armazenamento por baterias, por país.

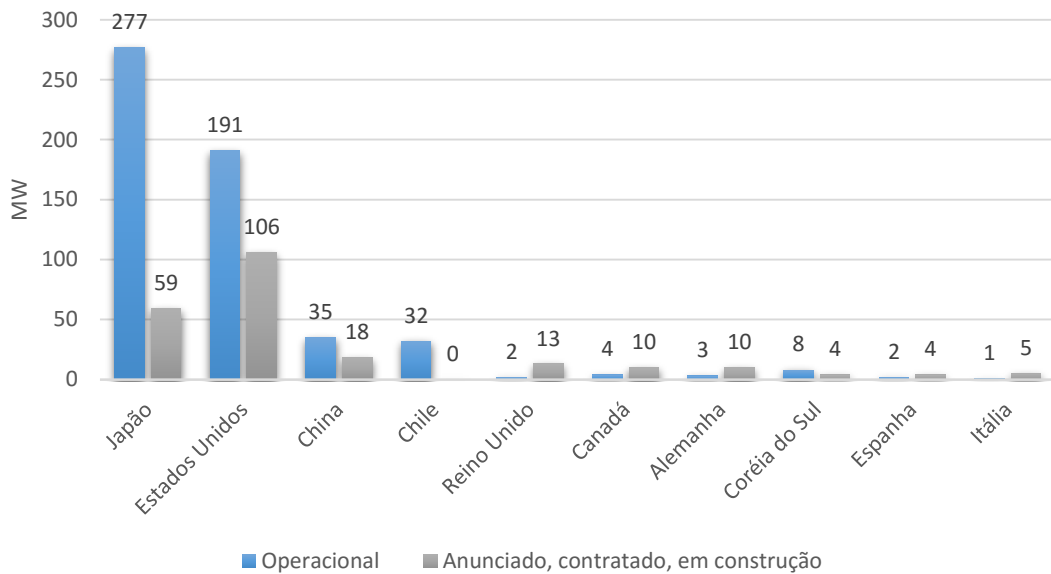


Figura 6 - Capacidade (MW) instalada e planejada do armazenamento por baterias ao redor do mundo. Fonte: [9]

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, os quais são ilustrados na Figura 7.

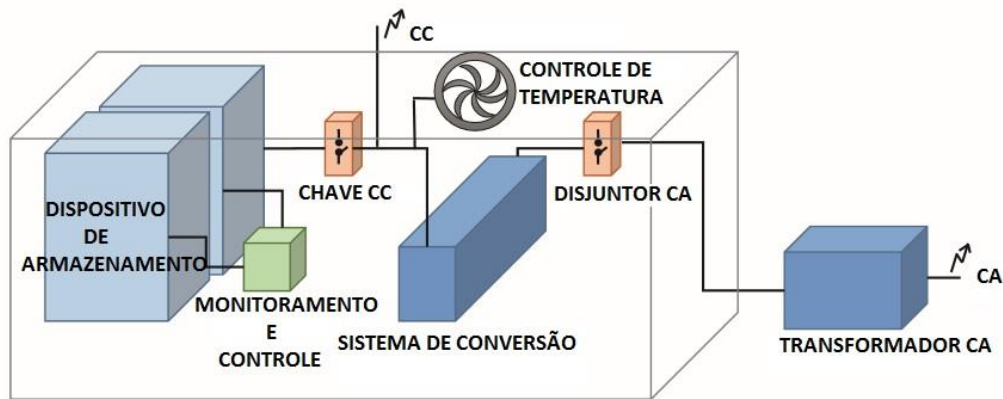


Figura 7- Sistema de armazenamento por baterias e seus componentes.

Fonte: Adaptado de [9]

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, o sistema 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 8 apresenta uma representação de um sistema de gerenciamento completo.

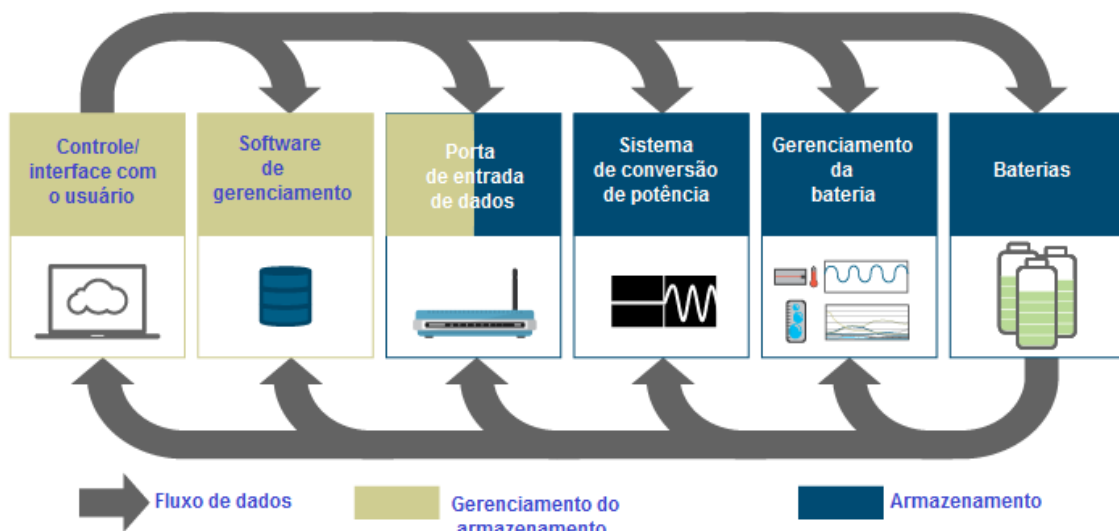


Figura 8 - Representação de um Sistema de Gerenciamento de Baterias completo.

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. Existem 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. [9]

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 [3]: 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).

A seguir serão descritas as baterias eletroquímicas e de fluxo redox.

2.1.3.1 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. [6]

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 sub-categorias, 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 10MW/40MWh.

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[6].

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 6,7MWh.

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. [7]

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 34MW, 245MWh, e encontra-se no norte do Japão, numa fazenda eólica de 51MW.[1]

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. Inicialmente 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 contem 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 12MW, e encontra-se no deserto do Atacama, no Chile, tendo sido finalizado em 2009.

As baterias de íons de lítio estão sob constante desenvolvimento, e espera-se que seus custos diminuam consideravelmente no futuro. Apesar disso, 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. [10]

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.

2.1.3.2 Baterias de Fluxo Redox

O funcionamento das baterias de fluxo redox consiste na 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. Esse funcionamento está ilustrado na Figura 9.

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.

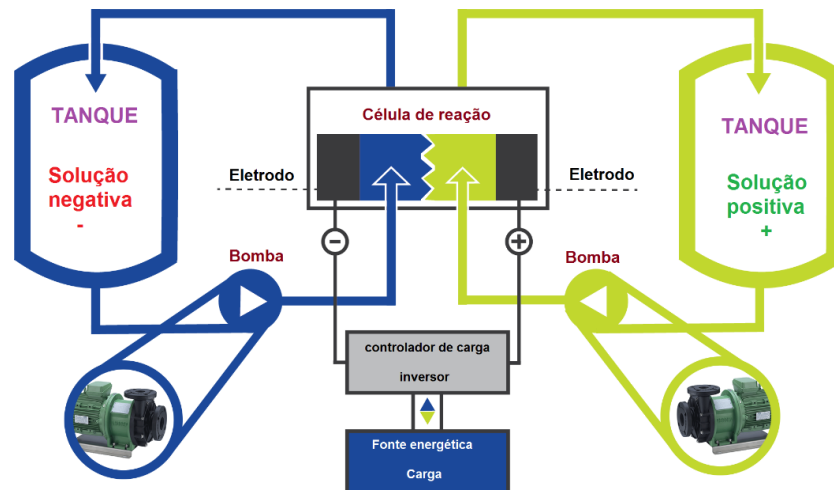


Figura 9 - Esquema ilustrativo das baterias de fluxo redox.

De acordo com [2] 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 32MW de potência, que faz uso de baterias VR de potência total de 4MW, com fornecimento de 6MWh.

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.

2.1.4 Supercondutores

O sistema de armazenamento por material supercondutor, ou SMES *Superconducting Magnetic Energy Storage*, armazena energia em um campo magnético gerado por uma corrente contínua que flui sobre uma bobina supercondutora. Estes dispositivos geram eletricidade em capacidade nominal apenas por alguns segundos. Eles se assemelham aos capacitores na velocidade de descarga de energia, mas são limitados pela densidade de energia armazenada[11].

A Figura 10 apresenta um modelo básico do funcionamento dos supercondutores.

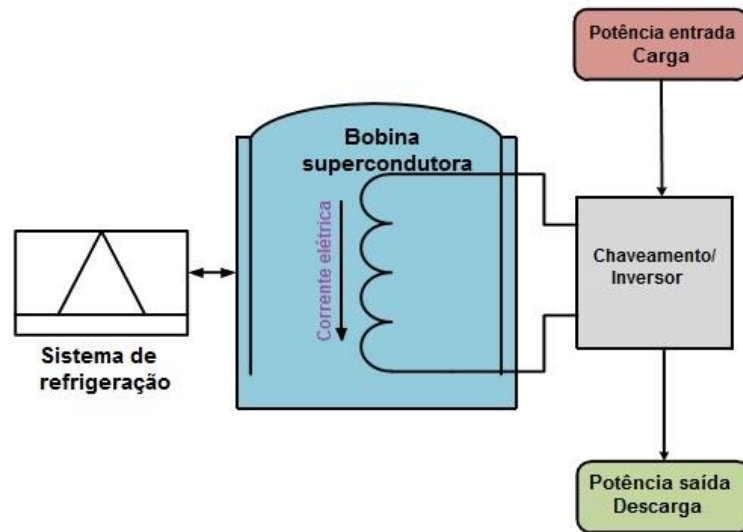


Figura 10 - Esquema do SMES.

Devido à necessidade de permanência do sistema imerso em Hélio líquido a -260°C , há maiores perdas da carga armazenada nas bobinas. Já existem pesquisas buscando reduzir a demanda de resfriamento do sistema, de maneira que se reduzam as perdas, mas como a aplicação desta tecnologia é muito limitada, sua competitividade no mercado perante outras soluções se encontra ameaçada[12].

2.1.5 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 supercapacitores, que são separados por uma solução eletrolítica, como ocorre com baterias. A Figura 11 apresenta esta comparação.

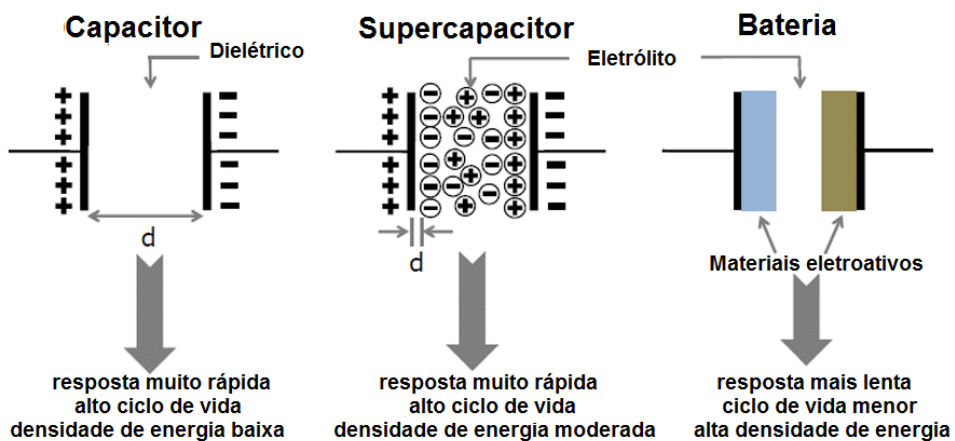


Figura 11 - Comparação capacitor/supercapacitor/baterias em geral.

Quando comparados com baterias, supercapacitores 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 supercapacitores com baterias, no intuito de prolongar o tempo de vida de ambos. Capacitores convencionais apresentam menor eficiência quando comparados aos supercapacitores, e por apresentarem baixa densidade de energia, suas aplicações são limitadas.

2.1.6 Volantes de Inércia

O volante de inércia ou *Flywheel Energy Storage System* (FESS) é um dispositivo que armazena ou recupera energia de acordo com sua mudança em velocidade rotacional. Quanto maior o momento de inércia e velocidade angular do rotor, maior a capacidade inercial adquirida e maior a quantidade de energia armazenada.

Tipicamente o sistema é composto por um motor elétrico, o volante e um conversor eletrônico, os quais fazem a conversão de energia mecânica em elétrica e vice-versa. Para maior eficiência do sistema são utilizadas técnicas de redução de atrito e resistência ao rolamento através de mancais magnéticos no eixo do volante e um invólucro a vácuo em torno dos componentes rotativos.

Os volantes são utilizados em aplicações que requerem alta descarga para a estabilização de uma rede, durante um curto intervalo de tempo. Esta tecnologia pode, por exemplo, ser empregada em metrô, armazenando e descarregando energia de acordo com as fases de frenagem e aceleração dos vagões. Isto implica nos volantes apresentarem ciclos de vida extremamente altos, na faixa dos milhões de cargas e descargas.

2.1.7 Armazenamento por hidrogênio

O armazenamento por hidrogênio ou *Hydrogen Energy Storage System* (HESS), ilustrado na Figura 12, constitui-se de células de hidrogênio, que se assemelham às baterias. Ambas são tecnologias de transformação de energia química em energia elétrica. A reação química em uma célula de hidrogênio consiste na reação espontânea entre oxigênio e hidrogênio, para produzir eletricidade e água.

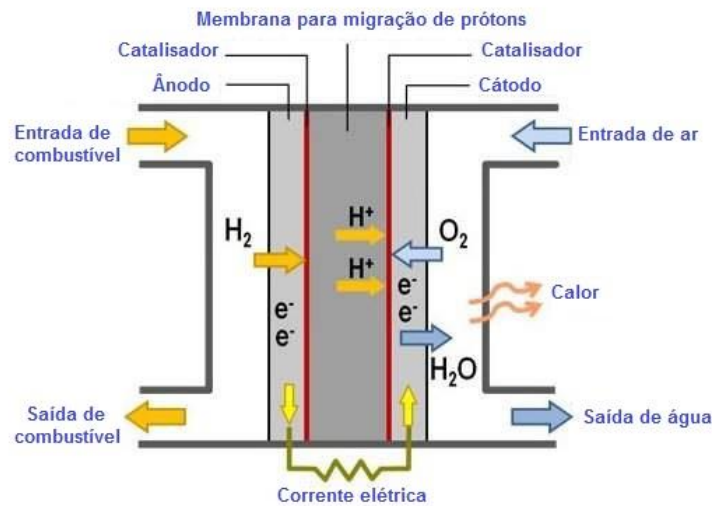


Figura 12 - Sistema HESS.

A volatilidade do hidrogênio e o reduzido tamanho de seus átomos fazem com que o tamanho do reservatório do combustível seja o fator crítico no rendimento desta tecnologia. Além disso, essa ainda é uma tecnologia de preço elevado, e a carga e descarga do sistema é limitada, restringindo as possibilidades de seu uso.

Atualmente, algumas companhias de ônibus de transporte público tem instalado células de hidrogênio em sua frota de veículo, com o intuito de reduzir emissão de gases poluentes na atmosfera.

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. Adaptado de [1].

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	5 -15	1000 - +10000	75 – 90	0 – 0,1
Redox Vanádio	5 – 10	+12000	85	0,03 – 3

Continua...

Continuação...				
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	+8 +20	+100000	84 - 95	0 – 0,3

2.2 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 apresenta a Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Serviços e benefícios do armazenamento de energia.

Categorias					
	<i>Serviços de energia em massa</i>	<i>Serviços Auxiliares</i>	<i>Infraestrutura de transmissão</i>	<i>Infraestrutura de distribuição</i>	<i>Gerenciamento energético do consumidor</i>
Serviços	Arbitragem	Regulação de frequência	Adiamento de atualização no sistema de transmissão	Adiamento de atualização no sistema de distribuição	Qualidade da energia
		Reservas			Confiabilidade da energia
		Suporte de tensão	Alívio em momentos de congestionamento	Suporte de tensão	Energia em varejo (Arbitragem)
	Fornecimento de potência	Black-start			Gestão da demanda
		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[14].

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 minutos para viabilizar a sincronização. [15]

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 [16]. 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 de 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. [17]

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. [18]

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. [14]

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. [13]

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*[19]. Estes termos foram traduzidos e derivam, respectivamente, do inglês *In front of the meter* e *Behind the meter*.

A Figura 13 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 13 - Ilustração da configuração *Em frente ao medidor*.

Já na Figura 14 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.

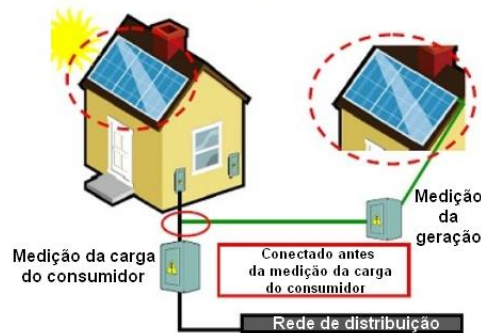


Figura 14 - Ilustração da configuração *Antes do medidor*.

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. [19]

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* utilizado nesta dissertação foi traduzido do 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. Adaptado de [18].

	Usos 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. Adaptado de [18].

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

2.3 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 esse fato. Buscando entender esta situação, é tratado nesta seção dos modelos de propriedade de um SAE, em seguida, são discutidas barreiras à implementação destes nas redes elétricas, e por fim, são apresentados valores de custos e perspectivas financeiras futuras.

2.3.1 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. [20]

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 atrasos de entrega, condições de pagamento e rescisão. Este é o tipo de contrato principal que define receitas e dá crédito à 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. [21]

2.3.2 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. [22]

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 [22], as quais podem ser subdivididas em regulatórias, econômicas, na modelagem de negócios, *crosscutting*, e tecnológicas, como observa-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Barreiras a implantação dos SAEs. Adaptado de [22].

Barreiras						
		<i>Regulatórias</i>	<i>Econômicas (de mercado)</i>	<i>Modelagem de negócios</i>	<i>Crosscutting*</i>	<i>Tecnológicas</i>
<i>Subdivisões</i>	Questões administrativas		Mecanismos de compensação de receita	Incertezas e riscos para concessionárias e desenvolvedores	Conhecimento limitado das partes interessadas	Altos custos das tecnologias
	Restrições de classificações funcionais e questões de alocações de custos		Ausência de mercados		Restrições de modelo e falta de recursos de modelagem	
	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.

Em relação às subdivisões das barreiras regulatórias, tem-se:

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.

Em relação às subdivisões das barreiras econômicas, tem-se:

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 projetado 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. Os preços dos serviços auxiliares refletem custo de oportunidade para os geradores, quando eles retêm 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.

Em relação às subdivisões das barreiras à modelagem de negócios, tem-se:

Incertezas e riscos: concessionárias e desenvolvedores apontam as seguintes questões como fatores de incerteza, que podem impedi-los de viabilizar 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.

Em relação às subdivisões das barreiras *crosscutting*, tem-se:

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 evoluindo 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 da geração variável renovável, armazenamento de energia e outras tecnologias do lado da geração, resposta à demanda, programas de eficiência energética, gerenciamento pelo lado da demanda, esses recursos de modelagem não são mais suficientes. As ferramentas são muitas vezes inadequadas para a comparação do armazenamento de energia em relação a outros investimentos.

Em relação às subdivisões das barreiras tecnológicas, tem-se:

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 pesquisa em tecnologias de armazenamento de energia para reduzir custos é crucial para torna-la mais competitiva. Ao invés do processo típico de melhorias marginais para a obtenção de ganhos marginais no desempenho, tais pesquisas poderiam ser orientada 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.

2.4 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 projeto/engenharia[19].

A Figura 15 apresenta as diminuições projetadas para os custos de capital (US\$/KWh) de cinco tecnologias, anualmente e num horizonte de 5 anos, de acordo com [19]. São apresentados três cenários para o decréscimo 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 projeto 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.

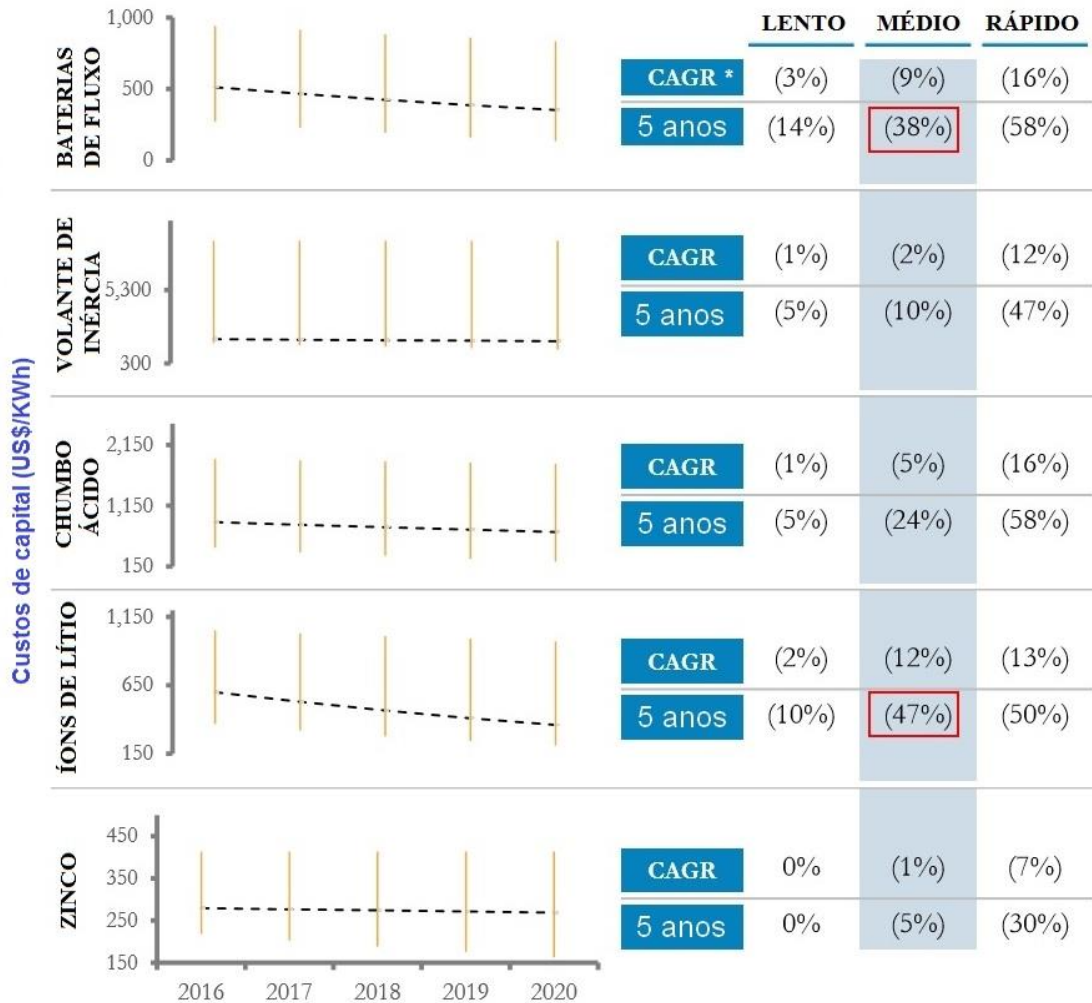


Figura 15 - Diminuições projetadas para o custo de capital no horizonte anual e em 5 anos.

Fonte: Adaptado de [19]

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

Já em relação às outras tecnologias apresentadas na Figura 15, podem ser considerados outros direcionadores prováveis ao decréscimo apresentado para cada uma. Por exemplo, no caso dos volantes de inércia, um direcionador serão as 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 são 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 20MW para o primeiro, e 14MW para o último, como mostra a Figura 16[23].

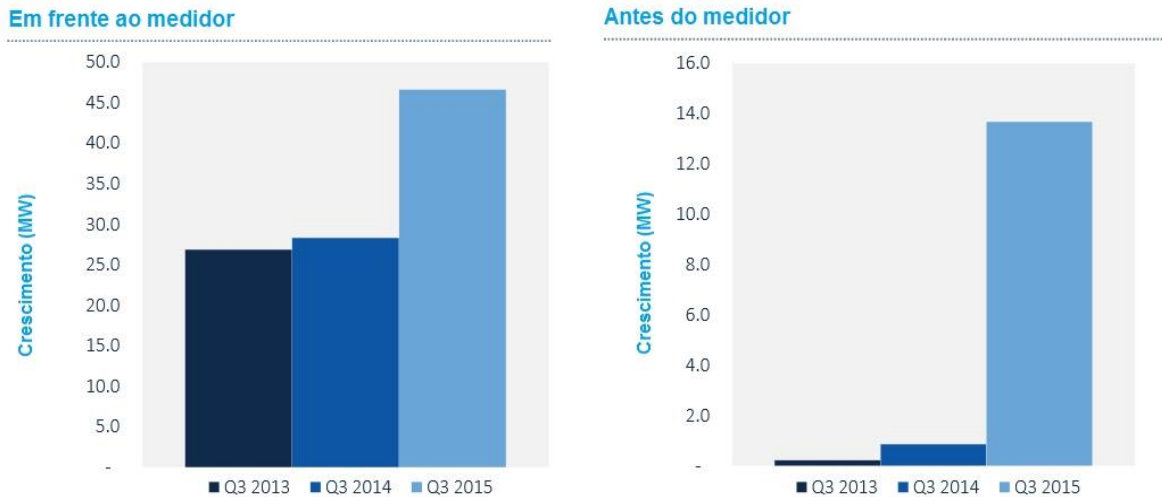


Figura 16 - Crescimento entre quadrimestres das aplicações do armazenamento.

O crescimento total, apresentado na Figura 17, 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.

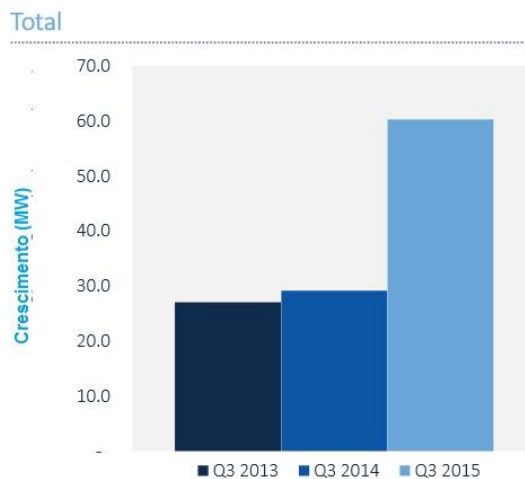


Figura 17 - Crescimento total entre quadrimestres das aplicações do armazenamento.

A seguir são apresentadas figuras que ilustram, comparativamente, os custos de capital (US\$) atuais de algumas tecnologias de armazenamento, de acordo com as estimativas de [19]. A Figura 18 apresenta estes custos para aplicações *Em frente ao medidor*, e a Figura 19 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 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.

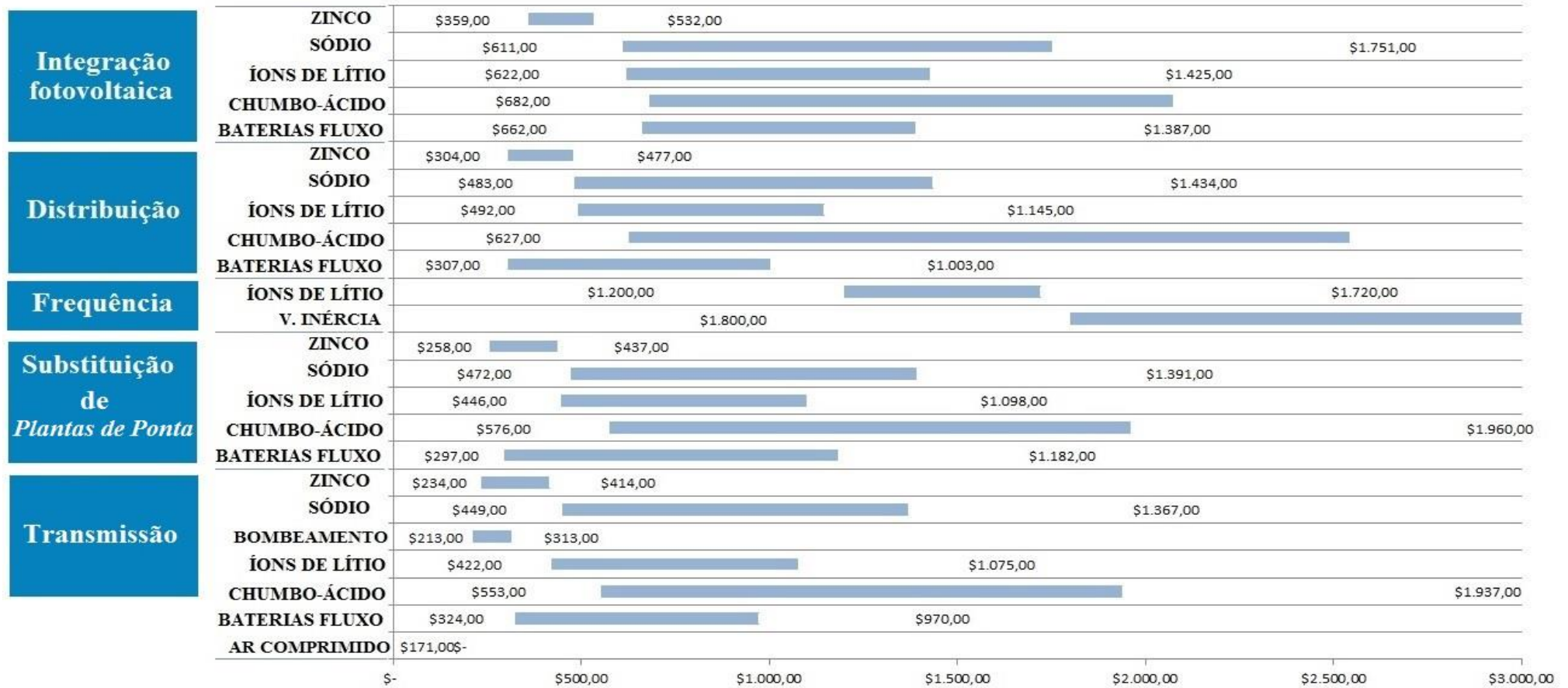


Figura 18 - Custo de capital (US\$) comparativo para aplicações *Em frente ao medidor*.

Fonte: Adaptado de [19]



Figura 19 - Custo de capital (US\$) comparativo para aplicações *Antes do medidor*.

Fonte: Adaptado de [19]

Considerando o cenário atual, os objetivos futuros dos países líderes são:

- 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 240GW até o ano de 2030, excluindo-se o setor dos carros elétricos.

2.5 Otimização de sistemas de armazenamento de energia elétrica

Há vários anos atrás, a principal preocupação de um projetista ou tomador de decisão era conceber e construir um sistema com uma capacidade previamente especificada, enquanto a eficiência e o custo eram de secundária importância. Nos tempos modernos, a tarefa é muito mais complexa e consiste em atingir o objetivo principal (capacidade), porém com o máximo possível de efeitos positivos (eficiência, benefícios sociais e ambientais) e/ou o mínimo possível de efeitos negativos (consumo de combustível, custos, degradação ambiental).

A modificação da dinâmica da rede elétrica atual induz tanto desafios quanto oportunidades para o desenvolvimento dos SAEs otimizados; a complexidade dos sistemas e processos é tal que a busca pelo máximo ou mínimo de um critério de desempenho pode não ser atingido efetivamente a menos que procedimentos matemáticos determinísticos ou estocásticos, chamados geralmente de otimização, sejam usados. Em outras palavras, é preciso otimizar os sistemas energéticos.

Otimizar significa tornar ótimo [4], ou encontrar a estrutura e os valores dos parâmetros do sistema que minimizam o custo final dos produtos, considerando as restrições impostas pela confiabilidade, disponibilidade, manutenção, operabilidade e impacto ambiental desejados para o sistema. [24]

Para otimizar um processo, o problema considerado deve estar bem definido (objetivos e restrições), requerendo-se primeiro construir um modelo matemático que descreva o desempenho do sistema energético tão fielmente como for possível[25]. Nesse sentido, de acordo com [26], alguns conceitos básicos sobre otimização são:

- A função objetivo (FO) do problema completo de otimização, a ser representada por:

$$\min F(x, w, z) \quad (1)$$

Onde x, w, z são as variáveis independentes para a otimização.

- Funções de restrição de igualdade, as quais constituem o modelo de simulação do sistema:

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

- Funções de restrição de desigualdade, as quais constituem os limites de operação, regulação, segurança, etc.

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

De acordo com [27], um programa desenvolvido para resolver problemas de otimização consiste nas seguintes partes:

- **Programa Principal:** Lê os valores dos parâmetros, os valores iniciais das variáveis independentes, que são os pontos de início, e os limites máximo e mínimo das funções de restrição. Então “chama” o algoritmo de otimização;
- **Pacote de Simulação:** Para cada conjunto de valores das variáveis independentes, avalia as variáveis dependentes e a função objetivo. É chamado pelo algoritmo de otimização;
- **Sub-rotina de Restrição:** Determina os valores das funções de restrição de desigualdade. É chamado pelo algoritmo de otimização. As funções de restrição de igualdade podem ser incluídas nesta sub-rotina, porém é mais conveniente e eficiente incluí-las no pacote de simulação;
- **Algoritmo de Otimização:** Um método bem definido que, começando de um dado ponto de início, busca pelo valor ótimo da função objetivo. Imprime os resultados intermediários e finais, mensagens relacionadas com a convergência, número de avaliações de uma função, etc.

Entre os métodos utilizados na otimização de sistemas energéticos complexos encontram-se os métodos de busca direta (baseados nos valores de uma função), os métodos baseados em gradientes (que requerem a estimativa da segunda derivada de uma função) e outros métodos mais elaborados, como os algoritmos genéticos e o recocido simulado, que simulam a evolução e a otimização biológica. [28]

Modelos matemáticos e programas de otimização são aplicados na literatura de variadas formas aos problemas relacionados ao armazenamento de energia, por meio de ferramentas diversas. Alguns exemplos são MATLAB, GAMS, CPLEX, LINGO/LINDO, EXCEL, APMonitor, entre outras. Comercialmente, pode-se citar o PLEXOS® *Integrated Energy Model* como um exemplo de software que oferece um sistema de simulação robusta, através da utilização de um modelo matemático de otimização, combinado com ferramentas para tratamento e visualização de dados, provendo assim o gerenciamento robusto de sistemas de água, gás e energia elétrica de determinada unidade.

A seguir são apresentados alguns exemplos de aplicações de modelos de otimização encontrados mais recentemente na literatura:

A otimização utilizada em [29] é aplicada a uma estratégia de investimento. O objetivo é determinar as capacidades ótimas para baterias e um sistema fotovoltaico local, de modo que se consiga, por meio da associação de ambos, altos níveis de eficiência energética e diminuição dos custos com consumo de energia em um edifício comercial. Isto é feito através de um modelo que considera o valor do dinheiro no tempo, os valores das tarifas de energia, e parâmetros técnico-econômicos das baterias, como expectativa de vida, eficiências e custos. São apresentados por [29] os impactos das tarifas (US\$) e do retorno esperado do investimento (anos) na estratégia de investimento. As principais contribuições de [29] são a elaboração da uma ferramenta de otimização para dimensionamento do sistema, baseando-se no retorno esperado do investimento, a qual justifica a longo prazo a estratégia de investimento, como também a apresentação de modelos de diferentes baterias, considerando os parâmetros técnico-econômicos de cada um. A otimização desenvolvida neste trabalho é um modelo de programação linear¹ LP implementada em GAMS 24.0, resolvido pelo CPLEX.

Em [30] é também apresentado um modelo de otimização de estratégia de investimento para determinar a capacidade do armazenamento de energia em um microgrid, tomando como prioridade o critério de confiabilidade do sistema, por meio do cálculo de um índice. No entanto, neste trabalho, são considerados os benefícios obtidos pelo armazenamento de energia por meio de sua implantação e operação no que diz respeito a continuidade do funcionamento do sistema, o retorno do investimento para as partes interessadas não é o foco do trabalho. A abordagem, que se aplica a um problema de planejamento da expansão, apresenta que sistemas de

¹ Problemas de otimização nos quais a função objetivo e as restrições são todas lineares. Se todas as variáveis do problema pertencerem ao conjunto dos números inteiros, temos uma sub-classe da Programação Linear chamada Programação Inteira (IP) ou programação linear inteira. Quando somente algumas das variáveis são inteiras e outras contínuas, temos a "Programação Inteira Mista" (MIP).

armazenamento maiores representam um custo de investimento mais elevado, e não proporcionam, necessariamente, benefícios econômicos maiores, podendo ocorrer o inverso. Utiliza-se programação inteira mista *MIP* para formular o problema de otimização de [30]. O dimensionamento ideal do sistema de armazenamento baseia-se em minimizar o custo de investimento, assim como o custo operacional esperado da micro rede.

Desenvolve-se em [31] o dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia e dispositivos de armazenamento térmico para edifícios. Neste trabalho, as incertezas em perfis de demanda e radiação solar são considerados, e um problema de otimização estocástica é formulado, e resolvido pelo Método da Árvore de Cenários. Os resultados numéricos demonstram que o método proposto é eficaz em selecionar a melhor combinação e capacidades ótimas dos dispositivos de armazenamento, e na obtenção da estratégia operacional ideal de cada dispositivo no sistema de fornecimento de energia. Este modelo considera restrições técnicas e custos, e indica que os custo de investimento de baterias ainda é muito alto para o caso aplicado. No entanto, em relação a este aspecto econômico, [31] considera apenas o montante fixo investido no SAE, e não os benefícios monetários do armazenamento de energia a longo prazo, como por exemplo os custos reduzidos na compra de eletricidade ao longo do tempo.

O trabalho desenvolvido em [32] formula um modelo de otimização que busca solucionar uma estratégia de controle nova e eficiente para o uso de baterias no serviço de regulação de frequência na rede. Este modelo, que analisa um projeto de armazenamento norte americano de 1MW, atua como uma ferramenta para análise de custo-benefício do mesmo, e foi desenvolvida para contribuir com o melhor entendimento da economia e desempenho do sistema de armazenamento, composto por baterias de íons de lítio, facilitando a sua seleção e operação ótimas neste caso específico.

Em [32], a formulação do problema de otimização considera que o proprietário de um sistema de armazenamento pode escolher seguir exatamente os sinais do operador da transmissão, bem como seus requisitos de regulação. No entanto, se esses requisitos induzem o sistema de armazenamento a severas condições de operação, isso pode causar a diminuição da vida útil do sistema, o que reduz os benefícios financeiros. Por outro lado, o proprietário do sistema de armazenamento pode decidir não seguir estritamente os sinais do operador de transmissão, de modo a conservar o sistema e manter a receita alta o suficiente. Os resultados das simulações provaram que desviar levemente dos sinais do operador de transmissão durante

certas horas do dia pode aumentar a vida útil das baterias, bem como o lucro líquido para o proprietário do sistema.

Em [33] desenvolve-se uma metodologia para dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia elétrica que atuará na redução de uma grande demanda de potência ou energia, sendo carregado em períodos de baixa demanda, e descarregando durante os períodos de alta demanda. Este trabalho baseia-se, em parte, na metodologia apresentada por [34], a qual é utilizada para maximizar o benefício econômico para o consumidor, reduzindo seu pagamento pela demanda, através do uso de um sistema de armazenamento de menor custo possível. Em [34], a estratégia de otimização da operação deste sistema é baseada em programação dinâmica² e busca minimizar o custo da energia enquanto satisfaz às restrições físicas da bateria. Em [33] busca-se encontrar um par de valores para capacidade de armazenamento e limite de potência de pico.

Utiliza-se em [35] uma formulação matemática de otimização a ser resolvida para intervalos de 1 hora, relacionado à operação ótima de baterias, refletindo o uso destas para serviços de mitigação em *blackouts*, fornecimento de potência, etc. O objetivo da otimização é maximizar as receitas provenientes da troca de energia e serviços oferecidos pela bateria. Neste estudo, a estratégia de controle ótimo é proposta para maximizar os benefícios totais dada uma bateria de tamanho já especificado, não se dimensiona a mesma. Mostra-se no estudo que múltiplas aplicações das baterias podem ser exploradas com sucesso.

Em [36] estuda-se a combinação dos benefícios de se usar cooperativamente o armazenamento e micro redes que provem geração renovável para mitigar as flutuações na rede. O trabalho se diferencia de outros no mesmo campo por incorporar restrições relacionadas ao fluxo de potência na rede em sua formulação através da modelagem destes numa estrutura de fluxo de potência CC. Além disso, são incluídas as ineficiências das baterias. O trabalho mostra que não incluir as restrições relacionadas ao fluxo de potência na modelagem pode levar a estratégias de compartilhamento de potência erradas. Não é considerada em [36] o gerenciamento de potência reativa, e nem o fluxo de potência CA. O problema é desenvolvido em uma otimização na forma de programação dinâmica estocástica. Considera-se que a resolução deste por técnicas de programação dinâmica pode ser computacionalmente muito complexo, além disso seriam necessárias informações sobre previsão da geração renovável

² É uma programação aplicável à otimização de eventos que sofrem uma seqüência de estados, podendo ser aplicada a sistemas lineares ou não lineares.

futura, as quais não são facilmente precisamente previstas. Portanto a otimização de Lyapunov é a técnica utilizada, para desenvolver o problema com menos complexidade.

Em [8] apresenta-se um modelo para maximizar os proveitos em um parque eólico, os quais referem-se à entrega de energia elétrica à rede. Sabendo-se que a mesma quantidade de energia em horários diferentes pode trazer ganhos diferentes, formula-se uma estratégia de operação para que a entrega de energia em horários de mais valor seja possível. A otimização linear em [8] é realizada no MATLAB, recorrendo a uma ferramenta chamada *linprog*, que se baseia no método do ponto interior. Neste trabalho, é maximizada a soma do produto da remuneração da energia a cada hora e o volume entregue, subtraindo-se os custos de manutenção do sistema de armazenamento. São consideradas ainda as restrições operacionais e os limites dos equipamentos.

3 Materiais e Métodos

A motivação desta dissertação diz respeito ao uso ótimo de um sistema de armazenamento para os serviços de arbitragem e gerenciamento da demanda, e considera os objetivos específicos da dissertação, que são: seleção eficiente de um dispositivo de armazenamento de menor custo; e minimização dos custos com energia adquirida pela concessionária durante a operação do sistema de armazenamento selecionado.

Quanto ao tipo de atividades realizadas visando atingir tal propósito, a presente dissertação pode ser dividido em duas etapas: teórica e experimental. A parte teórica se refere à elaboração do referencial bibliográfico, com a finalidade de se obter maiores informações sobre as tecnologias de armazenamento e sobre as aplicações dos métodos de otimização nos problemas relacionados aos serviços providos por estas tecnologias. Já a parte experimental refere-se à elaboração da lógica do problema de otimização proposto, elaboração de um modelo matemático para baterias, bem como a implementação deste modelo, realização de testes e análise dos resultados.

De maneira geral, as etapas realizadas na parte experimental serão descritas a seguir.

3.1 Lógica do Problema de Otimização proposto

Como todo problema de otimização, deve-se estabelecer a função objetivo e suas restrições. Neste caso, a função objetivo a ser minimizada é composta por somatórios de produtos que relacionam custos a suas respectivas variáveis, e é apresentada pela Equação 4:

$$\min \sum c_i z_i + \sum E c_t c_{Ect_t} \Delta t \quad (4)$$

Em relação a esta FO, tem-se os seguintes parâmetros:

- z_i vetor que elenca todos os dispositivos de armazenamentos disponíveis;
- c_i vetor de custos de aquisição de cada dispositivo de armazenamento elencado em i (não depende de t);
- $E c_t$ energia consumida da concessionária em um determinado instante t ;
- c_{Ect_t} custo da energia consumida da concessionária em um determinado instante t ;

Considerando-se que o objetivo é consumir o mínimo de energia da concessionária, e que a renovável não é capaz de suprir completamente a demanda durante todo intervalo de tempo considerado, a lógica do problema para a operação funciona da seguinte maneira:

1. Deve ser observado o perfil da carga, seus pontos de máximo e mínimo ao longo do período de 24 horas, bem como mudanças bruscas de comportamento da carga, se houver. Será considerado inicialmente um consumidor residencial;
2. A curva de geração deve ser analisada de acordo com a curva de carga. Assume-se que aparecerão as 4 situações apresentadas na Figura 12.

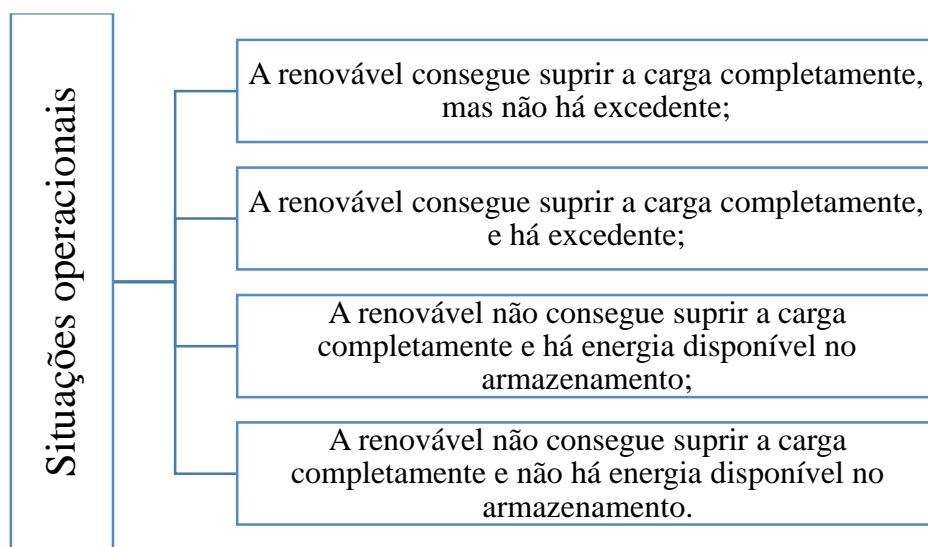


Figura 20 - Situações operacionais possíveis consideradas no item 2.

3. A energia da renovável será absorvida pela carga durante o instante t ;
4. Se, durante o instante t , a energia gerada for menor do que a demandada pela carga, esta demanda residual será suprida pela bateria (descarregando a bateria);
5. Deve-se considerar que a concessionária é uma “fonte” sempre disponível ao suprimento da demanda residual, mas que esta é a última opção a ser considerada;
6. Se, durante o instante t , a energia gerada for maior do que a demandada, então a energia residual será utilizada para carregar a bateria;
7. Se, durante o instante t , a energia gerada for maior que a demandada, e a bateria está carregada, esta energia será jogada na rede elétrica da concessionária;
8. Deve-se considerar que a energia gerada pela renovável em cada instante t dentro da análise é sempre maior ou igual a zero;
9. Deve-se considerar que a carga em cada instante t dentro da análise é sempre maior que zero;

- 10.** Deve-se considerar que a energia fornecida pela concessionária em cada instante t dentro da análise é sempre maior ou igual a zero;
- 11.** Serão tomados como base para os preços diários de energia utilizados, os valores apresentado por [38];
- 12.** Não será implementado na dissertação um modelo para fluxo de potência na rede.

Baseando-se na lógica apresentada anteriormente, pode-se elaborar o fluxograma apresentado a seguir.

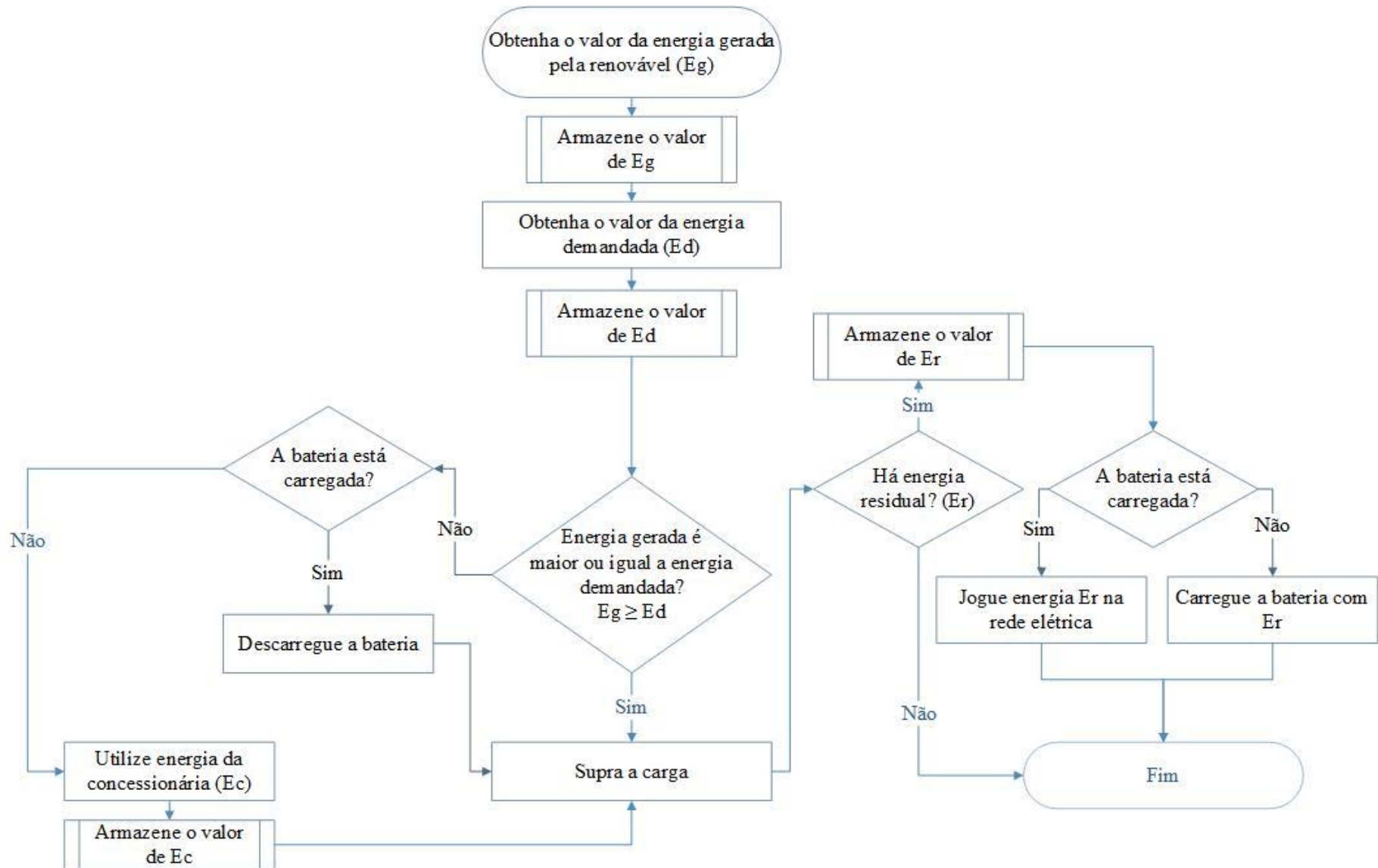


Figura 21 - Fluxograma referente à lógica de operação do sistema.

3.2 Modelo energético para baterias

O comportamento das baterias é tomado como restrição à função objetivo apresentada anteriormente, e evolui de acordo com o seguinte modelo, que considera adaptações das equações apresentadas por [36]:

3.2.1 Balanço de potências

Para um determinado instante t , o que é demandado pela carga $D(t)$ estará em função do que ela absorve da renovável $O(t)$, mais o que é absorvido pela rede $C(t)$ (se for o caso), mais o que é fornecido pela bateria $Ui(t)$ (se for o caso), menos o que é armazenado pela bateria $Li(t)$ (se for o caso). Este comportamento é descrito pela Equação 5.

$$D(t) = O(t) + C(t) + Ui(t) - Li(t) \quad (5)$$

3.2.2 Balanço de carregamento do armazenamento

O balanceamento de carregamento diz respeito aos ciclos de carregamento e descarregamento da bateria. Entende-se que a energia na bateria num instante t , mais a quantidade carregada num intervalo Δt , menos a quantidade descarregada num intervalo Δt é igual a energia presente na bateria no instante $t + \Delta t$ como mostra a Equação 6.

$$Ei(t) - Ei(t + \Delta t) + [\eta_{carga}Li(t) - \eta_{descarga}Ui(t)]\Delta t = 0 \quad (6)$$

Onde:

- $Ei(t)$ energia na bateria no instante t (kWh);
- $Ei(t + \Delta t)$ energia na bateria no instante $t + \Delta t$ (kWh);
- η_{carga} eficiência de carregamento da bateria (varia de acordo com o tipo de bateria);
- $\eta_{descarga}$ eficiência de descarregamento da bateria (varia de acordo com o tipo de bateria);
- $Li(t)$ potência carregada na bateria (kW);
- $Ui(t)$ potência descarregada da bateria (kW);
- Δt intervalo de tempo considerado (h).

Esta modelagem denota o encadeamento temporal do sistema de armazenamento, ilustrado na Figura 22 abaixo:

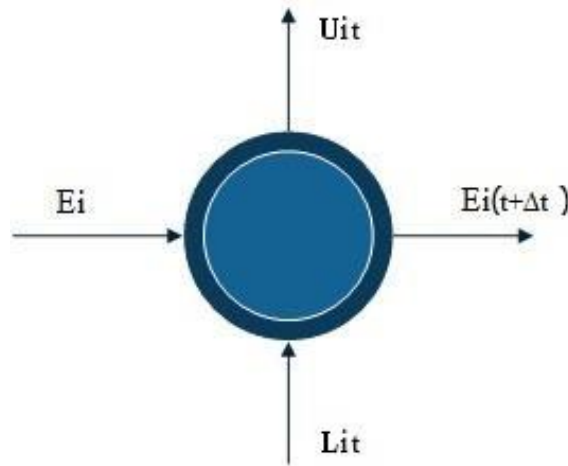


Figura 22 - Encadeamento temporal do sistema de armazenamento.

3.2.3 Níveis mínimos e máximos (limites)

Em relação aos limites da bateria, ou seja, às restrições físicas, são elaboradas restrições para níveis de energia, potência de carregamento, potência de descarregamento, taxas de carregamento e descarregamento.

Energia:

A energia na bateria num instante t é limitada a sua capacidade energética máxima.

$$E_{\min z_i} \leq E_i(t) \leq E_{\max z_i} \quad \forall t, \forall i \quad (7)$$

Taxa de carregamento:

A energia carregada na bateria num instante t , na taxa t_c eleva o nível energético da bateria.

$$E_i(t) - E_i(t + \Delta t) \leq t_c \Delta t z_i \quad (8)$$

Taxa de descarregamento:

A energia descarregada na bateria num instante t , na taxa t_d diminui o nível energético da bateria.

$$-E_i(t) + E_i(t + \Delta t) \geq t_d \Delta t z_i \quad (9)$$

É importante salientar que a variável z_i deve ser inteira. Para tanto, esta é trabalhada por meio de uma variável auxiliar booleana w_{ni} , ou seja, uma variável que só admite valores 0 ou 1.

Isso é feito para que z_i possa assumir valores maiores, considerando a quantidade de armazenadores. Após serem determinadas as condições de controle, a variável w_{ni} é declarada inteira.

$$z_i = w_{1i} + 2w_{2i} + 4w_{3i} \quad (9)$$

Onde:

- z_i quantidade de armazenadores a serem utilizados $\forall i$

3.3 Implementação do modelo e testes

A implementação do modelo consiste no uso de dois softwares. Inicialmente, utiliza-se o MATLAB e em seguida o LINDO. O MATLAB é utilizado para escrever uma rotina de impressão de linhas no padrão *Right Hand Side* (RHS), utilizado pelo LINDO. São impressas a função objetivo e todas as equações de restrição aplicadas a esta. O LINDO, cujo nome vem da definição *Linear Interactive, and Discrete Optimizer*, consiste em uma conveniente, mas poderosa ferramenta para a resolução de problemas de programação linear, inteira e quadrática, que otimiza as informações fornecidas pelo MATLAB.

Em relação à rotina implementada no MATLAB, são considerados como dados de entrada:

- Valores de energia máxima de cada armazenador (kWh);
- Valores de energia mínima de cada armazenador (kWh);
- Valores da taxa de carregamento de cada armazenador (kW);
- Valores da taxa de descarregamento de cada armazenador (kW);
- Valores de custo de cada armazenador (R\$/dia);
- Valores de energia demandada pela carga num período de 24 horas (kWh);
- Valores de energia gerada pela renovável num período de 24 horas (kWh);
- Valores dos preços da energia num período de 24 horas (R\$/kWh).

Esses dados estão apresentados a seguir, pela Tabela 6.

Tabela 6 - Dados de entrada dos armazenadores.

Modelo (V/módulo)	Energia máxima (kWh)	Energia mínima (kWh)	Taxa de carregamento (kW)	Taxa de descarregamento (kW)	Custo/dia (R\$)	Índice adotado para cada armazenador <i>i</i>
<i>Baterias de Íons de Lítio</i>						
BYD ESS	1214	1012	1012	810	982,7581	1
GE Energy Storage	1327	1000	2001	1800	485,8062	2
<i>Baterias de Chumbo-Ácido</i>						
Trojan/ 2 [V]	1446	1205	4821	1928	2.269,7199	3
Rolls/4 [V]	1449	1207	3621	1449	1.705,0119	4
Rolls/4 [V]	1220	1016	4066	1830	1.914,2394	5
Rolls/2 [V]	3980	3316	13265	5306	4.684,4056	6
Rolls/6 [V]	1526	1272	1272	509	598,6963	7
Deka/1.83 [V]	1776	1354	1354	542	637,7609	8
Continua...						

Continuação...

Deka/1,83 [V]	1832	1397	1397	559	657,5875	9
Deka/1,83 [V]	1763	1344	5376	2150	2.531,1070	10
Deka/1,83 [V]	1818	1386	5544	2218	2.610,5237	11
GNB Sonnenschein	1450	1208	1208	483	568,7909	12
GNB/ SOLAR	1638	1365	6824	4095	3.213,1559	13
Crown/2 [V]	1626	1355	5421	2168	2.552,2946	14
Crown/2 [V]	1517	1264	3793	1517	1.785,7161	15
Crown/2 [V]	2904	2420	2420	968	1.139,4212	16

Os dados apresentados na Tabela 6 foram coletados em catálogos de fabricantes de baterias. Durante este processo, foram ainda coletados dados de outras tecnologias, como volantes de inércia e supercapacitores, os quais não são apresentados nesta dissertação por não entrarem no mérito da pesquisa, já que a aplicabilidade destes seria notada em intervalos de tempo muito pequenos, da ordem de milissegundos, valores bem inferiores aos considerados nestes testes. Os valores de custos utilizados neste modelo são os únicos dados que não constam nos catálogos utilizados, e baseiam-se no conceito de Valor Presente, seguindo a metodologia de [37]. Em geral, o Valor Presente é baseado na propriedade do dispositivo ao longo de 10 anos para uma determinada aplicação e inclui os seguintes fatores: Eficiência; Ciclo de vida; Custos de Capital inicial; Operação e Manutenção; e substituição do dispositivo de armazenamento. Assim, justifica-se a utilização do Valor Presente, por não incluir apenas o Custo de

Capital, como também os custos operacionais. Os custos baseiam-se em um valor em US\$ para o período de 1 ano e foram adaptados para o período de um dia. Considerou-se também a conversão de US\$1 \approx R\$3,6784.

Outro ponto a ser mencionado, é que os Valores Presentes adotados nesta dissertação foram escolhidos com o objetivo apenas de avaliar a metodologia, mas deve-se levar em consideração que existem inúmeros valores de custos baseados no Valor Presente na literatura, e que este pode ser alterado nos cálculos de acordo com a necessidade e conveniência.

A aplicação desenvolvida no MATLAB trabalha com os dados apresentados na Tabela 6, fornecendo como saída:

- A equação a ser minimizada, ou seja, a FO;
- As equações de restrição a serem aplicadas, as quais posteriormente serão analisadas pelo LINDO;
- Gráficos com os valores de demanda, oferta renovável, preço e consumo da concessionária.

A função objetivo, apresentada anteriormente pela equação 1, é composta por dois somatórios; um em função do índice do armazenador, e outro em função do tempo. Esta divisão é importante para a realização de testes com o modelo, pois assim pode ser analisada também a condição em que não há nenhum armazenador conectado ao sistema.

A partir da elaboração dos gráficos apresentados nas Figuras 23, 24 e 25, e dos dados dos armazenadores, são realizados testes a fim de comprovar o funcionamento do programa e determinar se esse aponta para uma direção correta de seleção ótima.

Os valores sugeridos nas Figuras 23 e 24 são hipotéticos, tendo como base uma fonte renovável com geração variável e uma carga residencial.

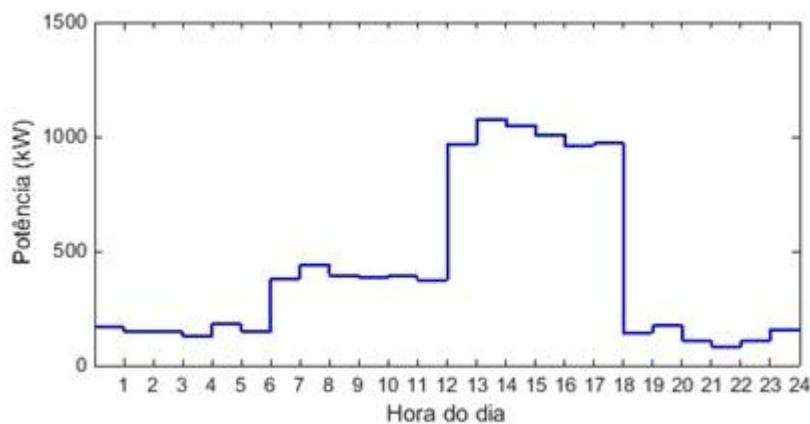


Figura 23 - Gráfico da oferta da fonte renovável (todos os testes).

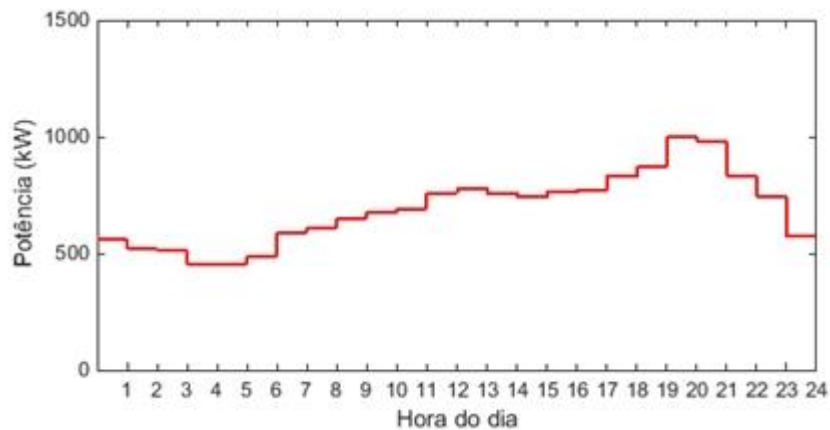


Figura 24 - Gráfico da demanda da carga (todos os testes).

Ao todo são apresentados os resultados de 5 testes. No primeiro deles se considera que não há armazenadores no sistema. A partir do segundo teste, considera-se a inclusão dos armazenadores e seus custos e variações no preço, as quais são apresentadas na Tabela 7, e foram baseados em valores de [38]. O Teste 2 mescla valores do Preço Inferior, Mediano e Superior, como mostra a Figura 25; o Teste 3 faz uso do Preço Inferior; o Teste 4 utiliza o Preço Intermediário; e o último teste usa o valor do Preço Superior.

Tabela 7 - Valores de preços utilizados.

<i>Testes 1 e 2</i>	<i>Teste 3</i>	<i>Teste 4</i>	<i>Teste 5</i>
$R\$0,50974 \leq TE \leq R\$$	$TE = R\$0,50974$	$TE = R\$ 0.52474$	$TE = R\$ 0.55474$
0.55474 (variação de preço)	(Preço Inferior)	(Preço Mediano)	(Preço Superior)

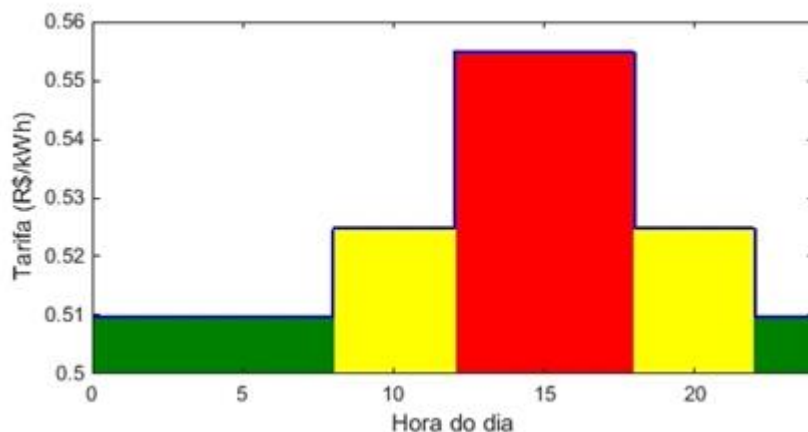


Figura 25 - Gráfico de variabilidade do preço para os Testes 1 e 2.

3.4 Resultados

O primeiro teste realizado idealiza uma situação em que não se dispõe de nenhum armazenador ligado ao sistema, onde o sistema é composto então de uma carga a ser suprida diretamente por uma fonte de geração renovável ou pela rede de distribuição da concessionária.

Nesse caso, o programa apontou o uso de toda a energia necessária pela carga a ser suprida pela concessionária, exceto nos instantes de $t=13\text{h}$ até $t=18\text{h}$. Neste intervalo, a fonte renovável seria capaz de suprir totalmente a carga. A Figura 26 apresenta o gráfico com os valores a serem consumidos pela concessionária no Teste 1.

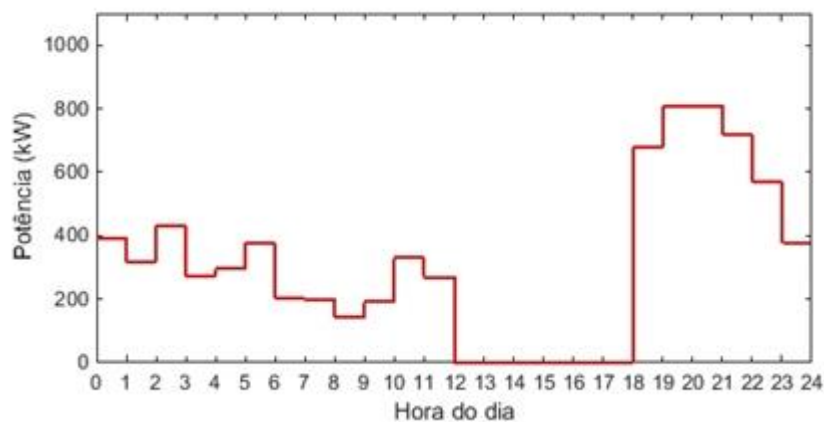


Figura 26 - Consumo da concessionária no Teste 1.

É importante mencionar que, no Teste 1, o programa aponta para excesso de energia nos momentos $t=13\text{h}$ até $t=18\text{h}$, ou seja, a fonte renovável supre a carga e ainda há energia sobrando. Isto representa um potencial não aproveitado para o armazenamento. Para o Teste 1, a FO é minimizada para o valor R\$3872,72.

Num segundo teste foram acrescentados os armazenadores e seus custos. Considera-se que os preços variavam ao longo do dia, hipoteticamente, de acordo com a Figura 25, já apresentada. Para o Teste 2, a FO é minimizada para o valor R\$3904,85, e o armazenador escolhido é o de índice 8, uma bateria de chumbo-ácido. A Figura 27 apresenta os valores a serem consumidos pela concessionária no Teste 2.

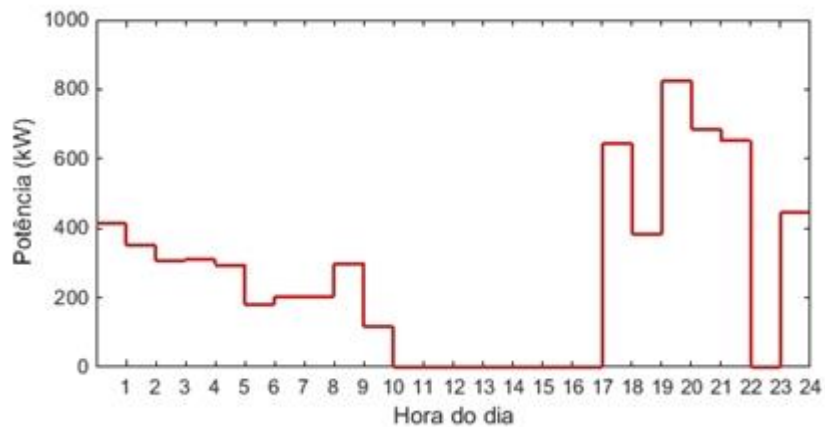


Figura 27 - Consumo da concessionária no Teste 2.

No Teste 3, a diferença é que se considerou um dia completo com o Preço Inferior. Nesse caso, a FO foi minimizada para o valor R\$3937,36. Foram escolhidos 2 armazenadores do índice 2, uma bateria de íons de lítio. A Figura 28 apresenta os valores a serem consumidos pela concessionária no Teste 3.

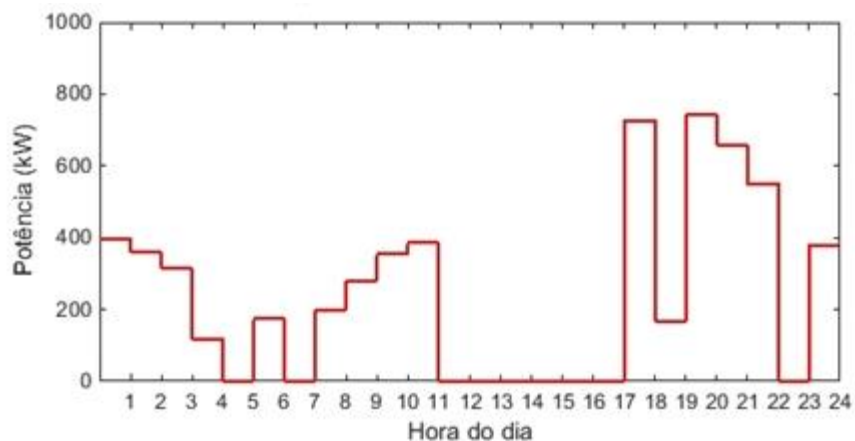


Figura 28 - Consumo da concessionária no Teste 3.

Para o Teste 4, a FO foi minimizada para o valor R\$4103,17. Nesse caso, considerou-se o Preço Intermediário. O armazenador escolhido foi o de índice 9, uma bateria de chumbo-ácido. O consumo sugerido da concessionária é representado na Figura 29.

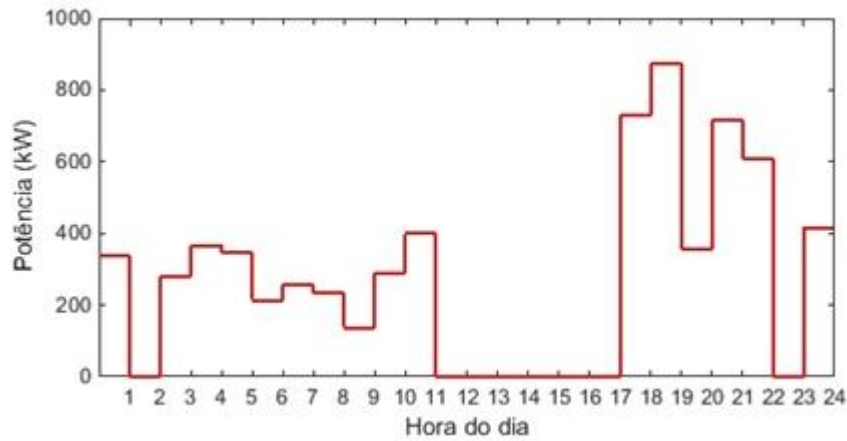


Figura 29 - Consumo da concessionária no Teste 4.

Para o Teste 5, o último, a FO foi minimizada para o valor R\$4061,12, sendo o armazenador de índice 16 o escolhido, uma bateria de chumbo-ácido. O consumo da concessionária nesse teste é mostrado na Figura 30.

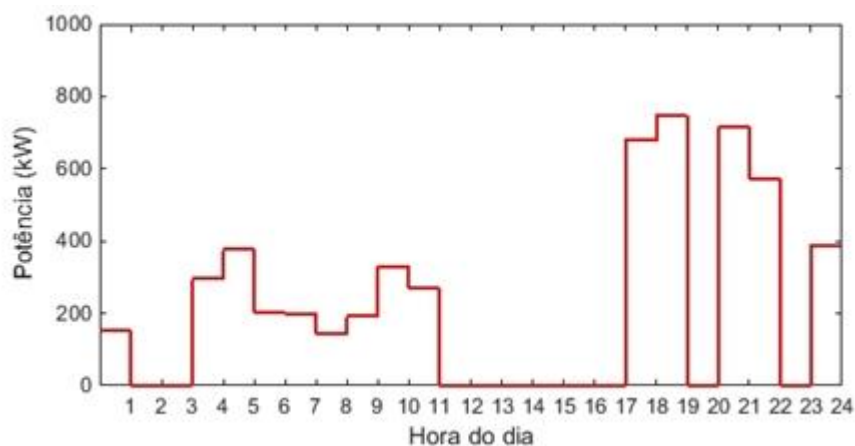


Figura 30 - Consumo da concessionária no Teste 5.

Por fim, a Tabela 8 apresenta os valores de consumo da concessionária para os diferentes testes.

Tabela 8 - Valores de consumo (kW) para todos os testes.

Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Sem armazenamento	$R\$0,50974 \leq TE \leq R\$ 0.55474$ (variação)	$TE = R\$0,50974$ (Preço Inferior)	$TE = R\$ 0.52474$ (Preço Intermediário)	$TE = R\$ 0.55474$ (Preço Superior)
$C_1 = 393,87$	$C_1 = 414,67$	$C_1 = 398,64$	$C_1 = 339,05$	$C_1 = 152,68$
$C_2 = 316,98$	$C_2 = 350,35$	$C_2 = 361,99$	$C_2 = 0$	$C_2 = 0$
$C_3 = 432,77$	$C_3 = 305,32$	$C_3 = 316,34$	$C_3 = 278,95$	$C_3 = 0$
$C_4 = 274,14$	$C_4 = 310,88$	$C_4 = 118,72$	$C_4 = 366,55$	$C_4 = 295,44$
$C_5 = 295,44$	$C_5 = 294,42$	$C_5 = 0$	$C_5 = 347,61$	$C_5 = 376,23$

Continua...

Continuação...				
$C_6= 376,23$	$C_6= 180,25$	$C_6= 174,30$	$C_6= 213,71$	$C_6= 202,01$
$C_7= 202,01$	$C_7= 204,07$	$C_7= 0$	$C_7= 257,31$	$C_7= 199,72$
$C_8= 199,72$	$C_8= 202,37$	$C_8= 198,64$	$C_8= 234,76$	$C_8= 142,65$
$C_9= 142,65$	$C_9= 299,13$	$C_9=280,82$	$C_9= 136,78$	$C_9= 191,92$
$C_{10}= 191,92$	$C_{10}= 117,15$	$C_{10}=354,15$	$C_{10}= 288,99$	$C_{10}= 330,50$
$C_{11}= 330,50$	$C_{11}= 0$	$C_{11}=385,19$	$C_{11}= 400,01$	$C_{11}= 268,95$
$C_{12}= 268,95$	$C_{12}= 0$	$C_{12}= 0$	$C_{12}= 0$	$C_{12}= 0$
$C_{13}= 0$	$C_{13}= 0$	$C_{13}= 0$	$C_{13}= 0$	$C_{13}= 0$
$C_{14}= 0$	$C_{14}= 0$	$C_{14}= 0$	$C_{14}= 0$	$C_{14}= 0$
$C_{15}= 0$	$C_{15}= 0$	$C_{15}= 0$	$C_{15}= 0$	$C_{15}= 0$
$C_{16}= 0$	$C_{16}= 0$	$C_{16}= 0$	$C_{16}= 0$	$C_{16}= 0$
$C_{17}= 0$	$C_{17}= 0$	$C_{17}= 0$	$C_{17}= 0$	$C_{17}= 0$
$C_{18}= 0$	$C_{18}= 643, 43$	$C_{18}= 726,93$	$C_{18}= 729,57$	$C_{18}= 678,73$
$C_{19}= 678,73$	$C_{19}= 383,11$	$C_{19}= 166,23$	$C_{19}= 874,94$	$C_{19}= 746,14$
$C_{20}= 807,73$	$C_{20}= 824,38$	$C_{20}= 742,76$	$C_{20}= 356,28$	$C_{20}= 0$
$C_{21}= 809,86$	$C_{21}= 683,47$	$C_{21}= 656,24$	$C_{21}= 715,69$	$C_{21}= 717,23$
$C_{22}= 717,22$	$C_{22}= 650,99$	$C_{22}= 551,63$	$C_{22}= 609,01$	$C_{22}= 571,49$
$C_{23}= 571,48$	$C_{23}= 0$	$C_{23}= 0$	$C_{23}= 0$	$C_{23}= 0$
$C_{24}= 371,09$	$C_{24}= 452,07$	$C_{24}= 384, 79$	$C_{24}= 418,17$	$C_{24}= 393,87$

Uma análise comparativa da performance e resultado dos testes apresentados anteriormente sugere que:

- Os testes apontam para a otimização proposta em cada caso;
- Os testes apontam para a seleção de um dispositivo de armazenamento para cada caso, exceto no Teste 3, no qual se sugerem dois dispositivos;
- Entre os testes, observam-se variâncias nos períodos nos quais a energia da concessionária é solicitada;
- Observam-se também variâncias na quantidade de energia solicitada em cada período, as vezes esta é zerada, as vezes somente reduzida;
- No Teste 5, que considera o maior valor constante de preço, constata-se o maior número de intervalos em que não se necessita de energia da concessionária, quando feito uso do armazenamento;
- Considerando o valor minimizado das FOs encontradas, a otimização é mais benéfica para os casos em que o preço varia durante o dia, ou quando o preço está no valor constante máximo considerado, ou seja, nos Testes 2 e 5;
- A depender do comportamento desejado com o uso do armazenamento, o Teste 3, por exemplo, poderia ter sido considerado mais satisfatório para redução de consumo no período da manhã;

- Em determinados instantes, não é necessária energia da concessionária pelo fato da oferta renovável conseguir suprir a carga completamente, em outros casos, a razão é a dinâmica do armazenamento, que o torna disponível;
- Os resultados apresentados valem para estes casos específicos;

4 Conclusão e sugestões para futuros trabalhos

Pode-se concluir com esta dissertação 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.

Em relação ao modelo de otimização desenvolvido, por meio de sua aplicação, observa-se que, apesar de simplista, este se comporta como esperado diante dos objetivos desta dissertação. O problema aplicado foi de fácil resolução, pois foram considerados dados previstos com certeza de fornecimento; para uma aplicação real seria necessária uma maior quantidade de exemplos a serem analisados, a fim de se obter uma projeção mais segura do funcionamento do sistema de armazenamento. Sugere-se como aperfeiçoamento em futuros trabalhos os seguintes pontos:

- Inclusão dos rendimentos de cada armazenador individualmente como dado de entrada;
- Implementação do modelo em cenários mais variados, o que contribuiria ainda mais para a comprovação de sua aplicabilidade em diferentes situações;
- Utilização de intervalos de tempo variados;

- Inclusão de outros tipos de armazenadores, e não somente baterias;
- Inclusão de um grau de incerteza nos dados de oferta renovável e demanda de energia;
- Aumento do número de restrições no que diz respeito à dinâmica de funcionamento do dispositivo armazenador;

Considerando que os sistemas de armazenamento ainda não possuem aplicação comercial nos mercados brasileiros relacionados à aplicações na rede elétrica, nem possuem desenvolvimento regulatório e tecnológico no país, considera-se que esta dissertação alcançou seus objetivos, como uma ferramenta que colabore na disseminação do conhecimento sobre este tipo de tecnologia.

Referências

- [1] F. A. Farret, M. G. Simões. **Integration of Alternative Sources of Energy**. John Wiley & Sons. Janeiro de 2006. Pp. 262-295.
- [2] Zareipour, H. **Tutorial Energy Storage: An Introduction to Technologies, Applications and Best Practices. Part 1**. IEEE PES General Meeting 2015. Julho de 2015.
- [3] Sergio Faias, Jorge Sousa e Rui Castro (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. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/renewable-energy/embedded-energy-storage-systems-in-the-power-grid-for-renewable-energy-sources-integration>
- [4] Dicionário Michaelis. **Dicionário da Língua Portuguesa**. 2015. Disponível em: <http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/index.php>
- [5] Energy Storage Association - ESA. **ESA info**. 2015. Disponível em: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-technologies>.
- [6] Electric Power Research Institute – EPRI e U.S. Department of Energy - DOE **Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications**. 2003. Disponível em: <http://www.sandia.gov/ess/publications/ESHB%201001834%20reduced%20size.pdf>
- [7] Electric Power Research Institute – EPRI e U.S. Department of Energy - DOE 2013. **Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA**. Julho de 2013. Disponível em: <http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2013-5131.pdf>
- [8] Silva, B. F. G., **Estudo de Soluções Alternativas de Armazenamento de Energia para Diferentes Horizontes Temporais**. Dissertação de mestrado. Universidade do Porto. Março de 2008.
- [9] International Renewable Energy Agency - IRENA. **BATTERY STORAGE FOR RENEWABLES: MARKET STATUS AND TECHNOLOGY OUTLOOK**. Janeiro de 2015. Disponível em: http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_battery_storage_report_2015.pdf
- [10] D. Bhatnagar, A. Currier, J. Hernandez, O. Ma e B. Kirby. **Market and Policy Barriers to Energy Storage Deployment**. Sandia Report 2013-7606. Setembro DE 2013. Disponível em: <http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2013-7606.pdf>
- [11] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby, M. Milligan. National Renewable Energy Laboratory – NREL. **The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation**. 2010. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47187.pdf>
- [12] G. Fuchs, B. Lunz, M. Leuthold, D. U. Sauer. **ISEA Technology Overview on Electric Storage**. 2012. Disponível em: http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/120628_Technology_Overview_Electricity_Storage_SEFEP_ISEA.pdf
- [13] Sandia National Laboratories. Electricity Storage Handbook (ESHB 3RG). **Sandia Report SAND2015-4982 M**. Setembro de 2015. Disponível em: <http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2015-4982.pdf>
- [14] U.S. Department of Energy e Sandia National Laboratories. **DOE Global Energy Storage Database**. 2012. Disponível em: <http://www.energystorageexchange.org/application/glossary>

- [15] Schier, J. **Análise Comparativa de Metodologias de Alocação de Serviços Ancilares de Reserva em Mercados de Energia Elétrica**. Dissertação de mestrado UFSC. Florianópolis, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90424/246963.pdf?sequence=1>
- [16] ANEEL-AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Rede. Brasília, Distrito Federal, 2001. Resolução n. 265, de 10 de junho de 2003. **Estabelece os procedimentos para prestação de serviços ancilares de geração e transmissão**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil (11 de junho de 2003) Brasília, seção 1, v.140, n. 111, p. 65, 2003
- [17] Kirby, B. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. **Frequency Regulation Basics and Trends**. Dezembro de 2004. Disponível em: <http://ferc.gov/EventCalendar/Files/20100526085937-Kirby,%20Frequency%20Regulation%20Basics%20and%20Trends.pdf>
- [18] North American Electric Reliability Corporation - NERC. **Glossary of Terms Used in NERC Reliability Standards**. Novembro de 2015. Disponível em: http://www.nerc.com/files/glossary_of_terms.pdf
- [19] LAZARD corporation. **Lazard report - Levelized cost of storage analysis – version 1.0**. Novembro de 2015. Disponível em: <https://www.lazard.com/media/2391/lazards-levelized-cost-of-storage-analysis-10.pdf>
- [20] Lahairi, S. and Kleiberg, M. **Tutorial Energy Storage: An Introduction to Technologies, Applications and Best Practices. Part 3**. IEEE PES General Meeting 2015. Julho de 2015.
- [21] A. Thumann, E. A. Woodroof. **Energy Project Financing: Resources and Strategies for Success - 2009- Page 93**. Disponível em: http://regulationbodyofknowledge.org/wp-content/uploads/2013/10/Thumann_Energy_Project_Financing.pdf
- [22] D. Bhatnagar, A. Currier, J. Hernandez, O. Ma, B. Kirby. **SANDIA REPORT. SAND2013-7606. MARKET AND POLICY BARRIERS TO ENERGY STORAGE DEPLOYMENT - A Study for the Energy Storage Systems Program**. Setembro de 2013. Disponível em: <http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2013-7606.pdf>
- [23] U.S. Energy Storage Monitor. **Q3 2015 Executive Summary**. Dezembro de 2015. Disponível em: http://energystorage.org/system/files/attachments/us-energy-storage-monitor-q3-2015-exec_summary.pdf
- [24] TSATSARONIS, G. (1993) **Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems**. Prog. Energy. Comb.Sci. Vol.19, pp227-257.
- [25] FRANGOPOULOS, C. (2002a) **Exergy, Energy System Analysis, and Optimization**, em Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) Volume 1, ISBN:9781-84826-614-8
- [26] FRANGOPOULOS, C. (2002b) **A Brief Review of Methods for the Design and Synthesis Optimization of Energy Systems**, Int. J. Applied Thermodynamics, Vol.5, pp.151-160
- [27] FRANGOPOULOS, C. (2003). **Methods of Energy Systems Optimization**, OPTI ENERGY Summer School: Optimization of Energy Systems and Processes, Gliwice, Polônia, Junho 24 -27.

- [28] D. Flórez-Orrego, A. Allahyarzadeh. **OTIMIZAÇÃO: Conceituação e Exemplos de Aplicação**. V2.0. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2015. Disponível em: https://www.academia.edu/10992535/Optimization_Concepts_and_Examples_for_Applications_Portuguese_Version_
- [29] M. R. Sarker, M. A. Ortega-Vazquez. **Optimal Investment Strategy in Photovoltaics and Energy Storage for Commercial Buildings**. IEEE PES General Meeting Proceedings 2015. Julho de 2015.
- [30] S. Bahramirad, W. Reder e A. Kohdaei. **Reliability Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid**. 2012. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, pp.2056-2062. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6377246&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F5165411%2F5446437%2F06377246.pdf%3Farnumber%3D6377246>
- [31] X. Zhanbo, G. Xiaohong, J. Qing-Shan, W. Jiang, W. Dai e C. Siyun. **Performance Analysis and Comparison of Energy Devices for Smart Building Energy Management**. 2012. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, pp.2136-2147.
- [32] F. Matthey, T. Kamijoh, K. Takeda, S. Ando, T. Nomura, T. Shibata, A. Honzawa. **Cost-Benefit analysis tool and control strategy selection for lithium-ion battery energy storage system**. IEEE PES General Meeting Proceedings 2015. Julho de 2015.
- [33] C. Park, V. Knazkins, F. R. Segundo, P. Korba, J. Poland. **On the Estimation of an Optimum Size of Energy Storage System for Local Shifting**. IEEE PES General Meeting Proceedings 2015. Julho de 2015.
- [34] A. Oudalov, R. Cherkaoui e A. Beguin. **Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application**. Power Tech, 2007. IEEE Lausanne, Julho de 2007. Pp.621-625.
- [35] D. Wu, C. Jin, P. Balducci, M. Kintner-Meyer. **An Energy Storage Assessment: Using Optimal Control Strategies to Capture Multiple Services**. IEEE PES General Meeting Proceedings 2015. Julho de 2015.
- [36] S. Lakshminarayana, W. Wei, H. V. Poor e T. Q. S. Quek. **Cooperation and Storage tradeoffs in Power-Grids under DC Power Flow and Inefficient Storage**. IEEE PES General Meeting Proceedings 2015. Julho de 2015.
- [37] Schoenung, S., **Energy Storage Systems Cost Update**. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program, SANDIA REPORT, United States of America, Abril 2011.
- [38] Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. **Valores de Tarifas e Serviços – 2016**. http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx. Abril de 2016.