

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ  
CAROLINE ALVES DOS SANTOS**

**OBSTÁCULOS À DISSEMINAÇÃO DO  
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO SISTEMA  
ELÉTRICO BRASILEIRO**

**Taubaté - SP**

**2016**

**CAROLINE ALVES DOS SANTOS**

**OBSTÁCULOS À DISSEMINAÇÃO DO  
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO SISTEMA  
ELÉTRICO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Certificado de Título de Mestre pelo Curso  
Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica  
da Universidade de Taubaté,  
Área de Concentração: Produção Mecânica  
Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto

**Taubaté - SP**

**2016**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado  
de Bibliotecas – UNITAU - Biblioteca de Engenharia Mecânica**

S237o Santos, Caroline Alves dos  
Obstáculos à disseminação do armazenamento de energia  
no sistema elétrico brasileiro. / Caroline Alves dos Santos -  
2016.

60f. : il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia  
Mecânica na área de Produção Mecânica) – Universidade de  
Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica, 2016  
Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto, Departamento  
de Engenharia Mecânica.

1. Armazenamento de energia. 2. Fontes alternativas de  
energia. 3. Sistema de transmissão. 4. Sistema de distribuição.  
I. Título.

**CAROLINE ALVES DOS SANTOS**

**OBSTÁCULOS À DISSEMINAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO  
SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Certificado de Título de Mestre pelo Curso  
Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica  
da Universidade de Taubaté,  
Área de Concentração: Produção Mecânica  
Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto

Data: 16/12/2016

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Antonio Faria Neto

Universidade de Taubaté

Assinatura\_\_\_\_\_

Prof.Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes

Universidade de Taubaté

Assinatura\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Inácio Bianchi

Departamento de Engenharia  
Elétrica - UNESP

Assinatura\_\_\_\_\_

*Dedico este trabalho aos meus pais, Ivair e Cristiane e  
à minha irmã, Giovanna.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Ivair e Cristiane e à minha irmã Giovanna, que sempre me apoiaram e incentivaram.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Faria Neto, pela dedicação nas orientações, confiança, direcionamento e apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade de Taubaté e Professores, que forneceram apoio e ensinamento para a minha formação e para realização deste trabalho.

À FAPESP pelo suporte à esta pesquisa: Processo nº 2014/18628-9, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, responderam os questionários e colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho, tornando-se possível a sua conclusão.

*“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”*  
(AYRTON SENNA)

## RESUMO

Segundo dados oficiais, o sistema elétrico brasileiro tem trabalhado no limite para atender à crescente demanda por energia elétrica. Esta necessidade exige uma mobilização significativa de recursos à longo prazo. O armazenamento de energia tem sido apontado como uma solução viável para anteder a estes desafios, uma vez que possui uma variedade de aplicações em diferentes níveis do sistema elétrico. No entanto, apesar de todos os benefícios, o armazenamento de energia em grande escala não é utilizado no setor elétrico brasileiro. Perante este cenário, esta pesquisa analisa os obstáculos que dificultam a disseminação do armazenamento de energia em grande escala no sistema elétrico brasileiro. Esta pesquisa foi desenvolvida em duas etapas. A primeira delas, qualitativa, foi realizada junto a 47 grupos de pesquisa, três agências governamentais e dez empresas de serviços públicos com vistas a se identificar os principais obstáculos percebidos pelos especialistas do setor. A etapa quantitativa desta pesquisa consistiu em classificar quanto à importância os obstáculos identificados na etapa anterior. Para tanto foram enviados questionários a 150 respondentes, a fim de que cada um ordenasse os obstáculos segundo o seu ponto de vista. Em seguida os dados foram tratados estatisticamente e foi obtida uma ordenação geral dos obstáculos.

**Palavras-chave:** Armazenamento de Energia. Fontes Alternativas de Energia. Sistema de Transmissão. Sistema de Distribuição.



## ABSTRACT

According to official data, the Brazilian electrical system has been working at the limit to meet the growing demand for electricity. This need requires a significant mobilization of resources in the long run. Energy storage has been touted as a viable solution to attend these challenges, as it has a variety of applications at different levels of the electrical system. However, despite all the benefits, the large-scale energy storage is not used in the Brazilian electric sector. Against this background, this research analyzes the obstacles that difficult he spread large-scale energy storage in the Brazilian electrical system. This research was developed in two stages. The first, qualitative, it was carried out with 47 research groups, three government agencies and ten public companies in order to identify the main obstacles. For both the 150 respondents questionnaires were sent to ordered obstacles according to his point of view. Then the data were treated statistically and was obtained a general sort of obstacles.

**Keywords:** Energy Storage. Alternative Energy Resources. Transmission System. Distribution System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01:	Dispersão de supercapacitores e de alguns tipos de baterias em função de sua energia específica e densidade de energia.....	19
Figura 02:	Comparação entre os custos de instalação e de operação para diversos dispositivos de armazenamento.....	21
Figura 03:	Estágios de maturidade de várias tecnologias de armazenamento...	22
Figura 04:	Tempo de descarga e faixa de potência requeridos das tecnologias de armazenamento para diversas aplicações.....	26
Figura 05:	Dispersão de algumas tecnologias de armazenamento em função de seu tempo de descarga e da faixa de potência fornecida.....	27
Figura 06:	Usina hidrelétrica de Pedreira (20 MW), a única experiência brasileira no armazenamento de energia em massa.....	34
Figura 07:	Fluxograma da pesquisa destinada a identificar e classificar os obstáculos à implantação de armazenamento de energia em massa na rede elétrica.....	35
Figura 08:	Distribuição da frequência dos obstáculos de acordo com os respondentes.....	43

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Classificação quanto à aplicação de algumas tecnologias de armazenamento.....	20
Quadro 02: Formas de armazenamento de energia e exemplos de tecnologias representantes.....	28
Quadro 03: Principais termos associados aos obstáculos do ponto de vista dos especialistas brasileiros.....	40
Quadro 04: Obstáculos à disseminação do armazenamento de energia no sistema elétrico brasileiro.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01:	Tamanho da grade de potência e capacidade de armazenamento para vários países.....	44
Tabela 02:	Ordenação dos obstáculos segundo os respondentes.....	47
Tabela 03:	Matriz de distâncias entre os obstáculos e os postos de importância.....	50
Tabela 04:	Agrupamentos dos obstáculos em torno dos postos de importância.....	51

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	DELIMITAÇÃO.....	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO QUANTO À DENSIDADE DE POTÊNCIA E DE ENERGIA .....	18
2.2	CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA QUANTO À NATUREZA DA APLICAÇÃO.....	19
2.3	CUSTOS DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO.....	20
2.4	MATURIDADE DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA...	21
2.5	APLICAÇÕES E BENEFÍCIOS DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	22
	2.5.1 MELHORIA DA INTEGRAÇÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA.....	23
	2.5.2 ADIAMENTO DAS EXPANSÕES DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	23
	2.5.3 PROMOÇÃO DA ARBITRAGEM.....	23
	2.5.4 CRIAÇÃO DE UMA RESERVA DINÂMICA.....	23
	2.5.5 REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA E ACOMPANHAMENTO DA CARGA....	24
	2.5.6 MINIMIZAÇÃO DE PERDAS NA TRANSMISSÃO.....	24
	2.5.7 REGULAÇÃO DE TENSÃO.....	24
	2.5.8 REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA.....	24
	2.5.9 ALÍVIO DO CONGESTIONAMENTO DE TRANSMISSÃO.....	24
	2.5.10 AUMENTO DA CONFIABILIDADE.....	24
	2.5.11 MELHORIA DA QUALIDADE DE ENERGIA.....	25
	2.5.12 DESLOCAMENTO TEMPORAL DA ENTRADA DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	25
2.6	REQUISITOS PARA ALGUMAS APLICAÇÕES DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	26
2.7	AUTONOMIA DE ARMAZENAMENTO VERSUS POTÊNCIA NOMINAL.....	27
2.8	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	28
	2.8.1 SUPERCAPACITORES.....	28
	2.8.2 SUPERCONDUTORES.....	29
	2.8.3 BATERIAS.....	29
	2.8.4 FLYWHEELS OU BATERIAS ELETROMECHANICAS.....	31
	2.8.5 USINAS REVERSÍVEIS.....	32
	2.8.6 AR COMPRIMIDO.....	32
	2.8.7 ENERGIA TÉRMICA.....	33
2.9	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO BRASIL.....	34
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....</b>	<b>35</b>
3.1	REVISÃO DA LITERATURA.....	36
3.2	PROJETO DA PESQUISA QUALITATIVA.....	36
3.3	COLETA DE DADOS DA PESQUISA QUALITATIVA.....	36

3.4	ANÁLISE DE DADOS DA PESQUISA QUALITATIVA.....	36
3.5	PROJETO DA PESQUISA QUANTITATIVA.....	36
3.6	COLETA DE DADOS DA PESQUISA QUANTITATIVA.....	36
3.7	ANÁLISE DE DADOS DA PESQUISA QUANTITATIVA.....	37
3.8	CONCLUSÕES.....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>
4.1	REVISÃO DA LITERATURA.....	38
4.2	PESQUISA QUALITATIVA.....	39
4.3	PESQUISA QUANTITATIVA.....	45
	4.3.1 ORDENAÇÃO GERAL DOS OBSTÁCULOS.....	45
	4.3.2 INSTRUMENTO DE CLASSIFICAÇÃO.....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos quarenta anos o consumo de energia elétrica vem aumentando no Brasil. Entre os anos 1970 e 1985 cresceu a uma taxa média anual de 10,6% (BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 1987). Entre os anos 1996 e 2006, o consumo cresceu a uma taxa média anual de 5,1% (BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a). Entre 2010 e 2020, projeta-se um crescimento do consumo de energia em torno de 4,9% ao ano (BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a; BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011b). Para se atender à crescente demanda seria necessário que a potência de geração instalada crescesse a uma taxa média anual de 4,7% até 2020 (BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a; BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011b; PESSANHA E LEON, 2012). Contudo, o crescimento anual do parque gerador entre os anos de 2005 e 2009 foi de aproximadamente 2,5%, o que requer um aumento no ritmo dos investimentos (BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011b). Uma característica importante do sistema elétrico brasileiro é que as grandes usinas hidrelétricas são distantes dos grandes centros consumidores de energia elétrica, fazendo-se necessário a construção de extensas linhas de transmissão. Em 2010 a extensão das linhas de transmissão do sistema interligado nacional era de aproximadamente 100.000 km. Prevê-se uma expansão de 142.000 km nos próximos 10 anos, ou seja, um aumento superior a 40%, o que equivale a uma expansão anual média, de 4% (BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a). Portanto, é possível inferir que a demanda por eletricidade vem crescendo continuamente a uma taxa superior à da modernização do sistema elétrico o que faz com que ele diminua progressivamente a sua capacidade de atender essa demanda.

Como consequência dessa defasagem nos investimentos no setor elétrico o número de interrupções no fornecimento de energia elétrica aumenta (NEXIGHT GROUP, 2010). A título de exemplo, para os consumidores norte-americanos, estima-se que o custo das interrupções seja de aproximadamente US\$80 bi por ano (NEXIGHT GROUP, 2010). A interrupção no fornecimento de energia elétrica evidencia a ineficiência do sistema elétrico e enfatiza a necessidade de modernização desse sistema a fim de que ele possa responder adequadamente à crescente demanda por eletricidade.

De acordo com Pessanha e Leon (2012); Nexight Group (2010) a maior incidência de interrupções encontra-se nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Tais interrupções poderiam ser mitigadas pela adoção de uma estratégia de armazenamento de energia distribuído. Enquanto a construção de novas plantas de geração e linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica é uma empreitada cara e demorada, o armazenamento de energia distribuído pode otimizar o fator de capacidade do atual sistema elétrico, podendo vir a ser uma alternativa mais econômica à expansão da infraestrutura do setor elétrico (NEXIGHT GROUP, 2010; ELECTRICITY STORAGE ASSOCIATION, 2009). O armazenamento poderá ser a alternativa mais econômica para a expansão da infraestrutura (NEXIGHT GROUP, 2010). Além disso, fontes alternativas de energia, especialmente energia eólica e fotovoltaica, têm aumentado a sua participação na composição das instalações de geração de energia elétrica (BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 1987; NEXIGHT GROUP, 2010). Embora benéfica do ponto de vista ambiental, seu caráter intermitente no fornecimento de energia elétrica aumentam as preocupações sobre a confiabilidade do sistema (MCDOWAL, 2000). A literatura aponta o armazenamento de energia como uma solução natural para a integração de fontes alternativas de energia para o sistema elétrico (PESSANHA E LEON, 2012; SILVA, OLIVEIRA E SEVERINO, 2011).

Apesar de todos os benefícios trazidos pelo armazenamento de energia, este não é generalizado. Quais são os fatores que dificultam implantação de tecnologias de armazenamento de energia? O que pode ser feito para superar tais obstáculos?

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é identificar os principais obstáculos para a disseminação do armazenamento de energia no sistema elétrico brasileiro.

Para alcançar o objetivo geral, além das providências diretas, faz-se necessário uma maior compreensão do tema, que será alcançada por meio dos seguintes objetivos específicos:

- Identificar as principais tecnologias de armazenamento de energia;
- Identificar as principais características dessas tecnologias;
- Classificar as tecnologias de armazenamento segundo sua capacidade de armazenamento e maturidade;



- Elencar algumas aplicações de armazenamento de energia nos diversos níveis do sistema elétrico (geração; transmissão; distribuição e consumidor final).

## **1.2 Justificativa**

O armazenamento de energia em grande escala pode transformar o setor elétrico. O desenvolvimento de tecnologias eficientes e economicamente viáveis, poderá dar a flexibilidade que o sistema elétrico precisa para responder à demanda crescente por eletricidade.

Esta pesquisa irá contribuir para a redução da defasagem de conhecimento sobre o tema em relação aos principais centros de pesquisas norte americanos e europeus, que afeta os grupos de pesquisas nacionais; as agências governamentais; as empresas concessionárias de energia elétrica e a comunidade acadêmica.

## **1.3 Delimitação**

A pesquisa será realizada a grupos de pesquisa, agências governamentais e empresas de serviços públicos, todos do setor elétrico brasileiro.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho estrutura-se em cinco capítulos, onde:

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com os principais conceitos relacionados ao armazenamento de energia e suas principais tecnologias.

O capítulo 3 apresenta o procedimento metodológico adotado neste trabalho, onde são apresentados a pesquisa realizada e a descrição dos instrumentos da pesquisa.

O capítulo 4 apresenta como os resultados e discussões obtidos nas pesquisas foram analisados e tabulados.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos envolvendo o armazenamento de energia, bem como as principais tecnologias empregadas para esse fim; suas principais características; suas classificações quanto à natureza das aplicações a que se destinam e o nível de maturidade dessas tecnologias.

### 2.1 Caracterização das Tecnologias de Armazenamento quanto à Densidade de Potência e de Energia

A aplicação das diversas tecnologias de armazenamento, baseia-se fundamentalmente em duas grandezas físicas, quais sejam a densidade de potência e a densidade de energia.

A densidade de energia é a energia fornecida pelo dispositivo de armazenamento por unidade de volume, normalmente expressa em  $Whl^{-1}$ ;  $Whdm^{-3}$ ;  $Whm^{-3}$ . A densidade de energia também pode ser denominada de densidade volumétrica de energia.

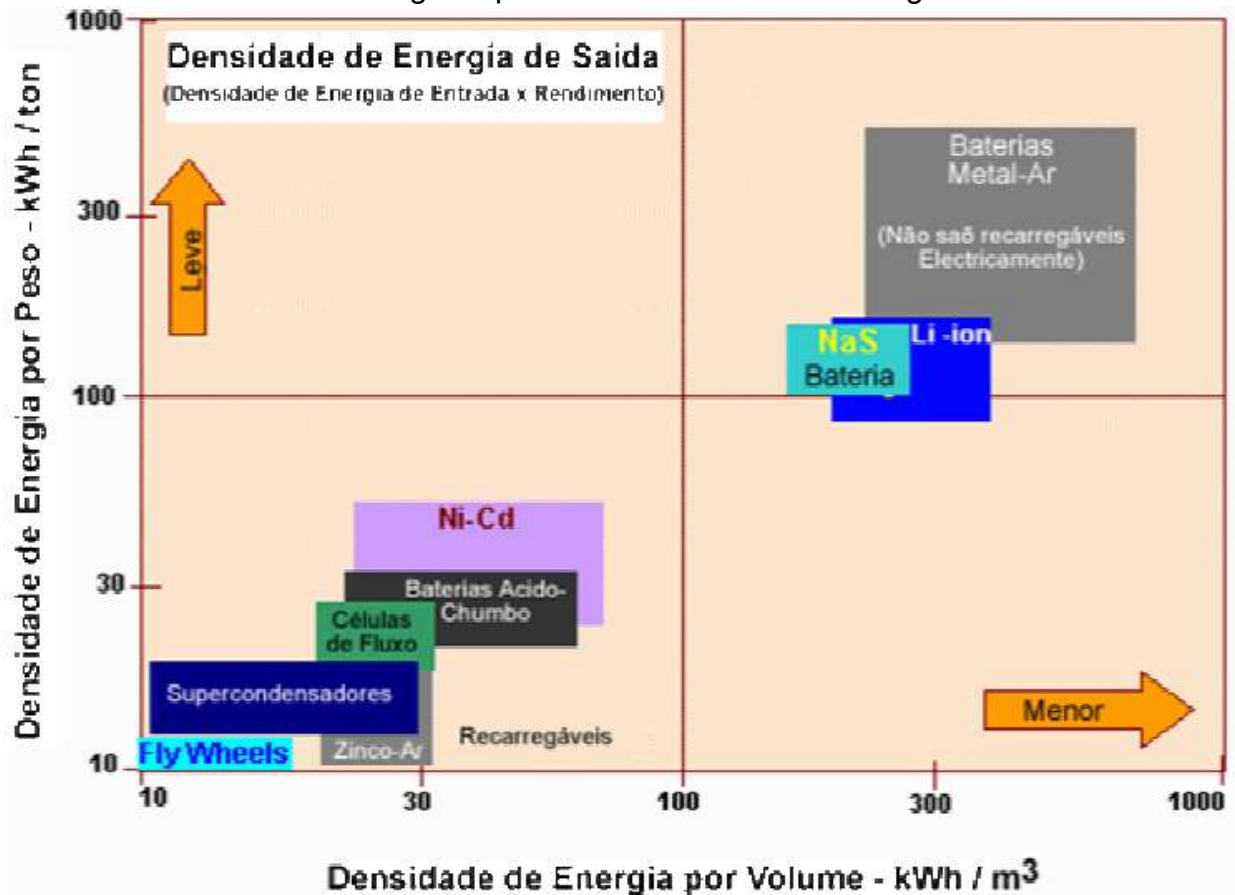
Um outro termo muito comum e relacionado à densidade de energia é a energia específica do dispositivo, ou densidade gravimétrica de energia, que é a energia armazenada pelo dispositivo por unidade de massa, normalmente expressa em  $Whkg^{-1}$  ou  $Wh ton^{-1}$ .

A densidade de potência é a potência fornecida pelo dispositivo por unidade de volume, usualmente expressa em  $Wl^{-1}$ ;  $Wdm^{-3}$ ;  $Wm^{-3}$ , a 80% da profundidade de descarga. A densidade de potência também pode ser denominada de densidade volumétrica de potência.

De forma análoga ao caso anterior, também se define a potência específica, ou densidade gravimétrica de potência de um dispositivo de armazenamento ( $Wkg^{-1}$  ou  $W ton^{-1}$ ).

A Figura 1 apresenta um gráfico que ilustra a dispersão de algumas tecnologias em função de sua energia específica (kWh/ton) e densidade de energia (kWh/m<sup>3</sup>). Neste gráfico, os dispositivos maiores e mais pesados estão mais próximos ao canto inferior esquerdo do gráfico, enquanto que os dispositivos menores e mais leves estão mais próximos do canto superior direito.

Figura 1: Dispersão de supercapacitores e de alguns tipos de baterias em função de sua energia específica e densidade de energia.



Fonte: Eficiência Energética e Integração Sustentada (2006).

Entre as tecnologias apresentadas no gráfico da Figura 1 é possível inferir que as baterias de sódio (NaS), íons de Lítio (Li-íon) e Metal-Ar são menores e mais leves que as demais. A bateria Zn-Ar, embora pertença à categoria das baterias Metal-Ar, se destaca por ser maior e mais pesada que as demais baterias da categoria.

Pode-se observar ainda, que os Supercapacitores apresentam energia específica e densidade de energia menores do que as baterias, ou seja, tendem a ser maiores e mais pesados.

## 2.2 Classificação das Tecnologias de Armazenamento de Energia Quanto à Natureza da Aplicação

As tecnologias de armazenamento podem ser classificadas em tecnologias voltadas para aplicações de potência, aquelas para as quais o tempo de descarga varia de alguns minutos até aproximadamente uma hora, e para aplicações de energia, onde o tempo de descarga é maior do que uma hora (NEXIGHT GROUP, 2010; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

As tecnologias para aplicações de potência são indicadas para mitigar problemas tais como *sags*, *swells*, impulsos e *flickers*. Já as tecnologias para aplicações de energia são indicadas para armazenar o excesso de energia durante os períodos de baixa demanda para utilizá-la em períodos de alta demanda, reduzindo o pico de carga. Essa característica tornam essas tecnologias bastante interessantes para a integração de fontes renováveis de energia ao sistema elétrico de potência (NEXIGHT GROUP, 2010).

O Quadro 01 apresenta a classificação de algumas tecnologias de armazenamento em função de sua possibilidade de aplicação.

Quadro 01 - Classificação quanto à aplicação de algumas tecnologias de armazenamento.

<b>Tecnologia</b>	<b>P = Aplicação de Potência</b>	<b>E = Aplicação de Energia</b>
<i>Flywheels</i> de alta velocidade	Atende plenamente	
Supercapacitores	Atende plenamente	
Bateria Chumbo-ácido tradicional	Atende plenamente	Factível, porém não viável economicamente
Bateria Chumbo-ácido avançada	Atende plenamente	Atende plenamente
Bateria de Sódio	Atende plenamente	Atende plenamente
Bateria Li-Ion	Atende plenamente	Atende parcialmente
Baterias de fluxo	Atende parcialmente	Atende plenamente
Ar comprimido		Atende plenamente
Usina reversível		Atende plenamente

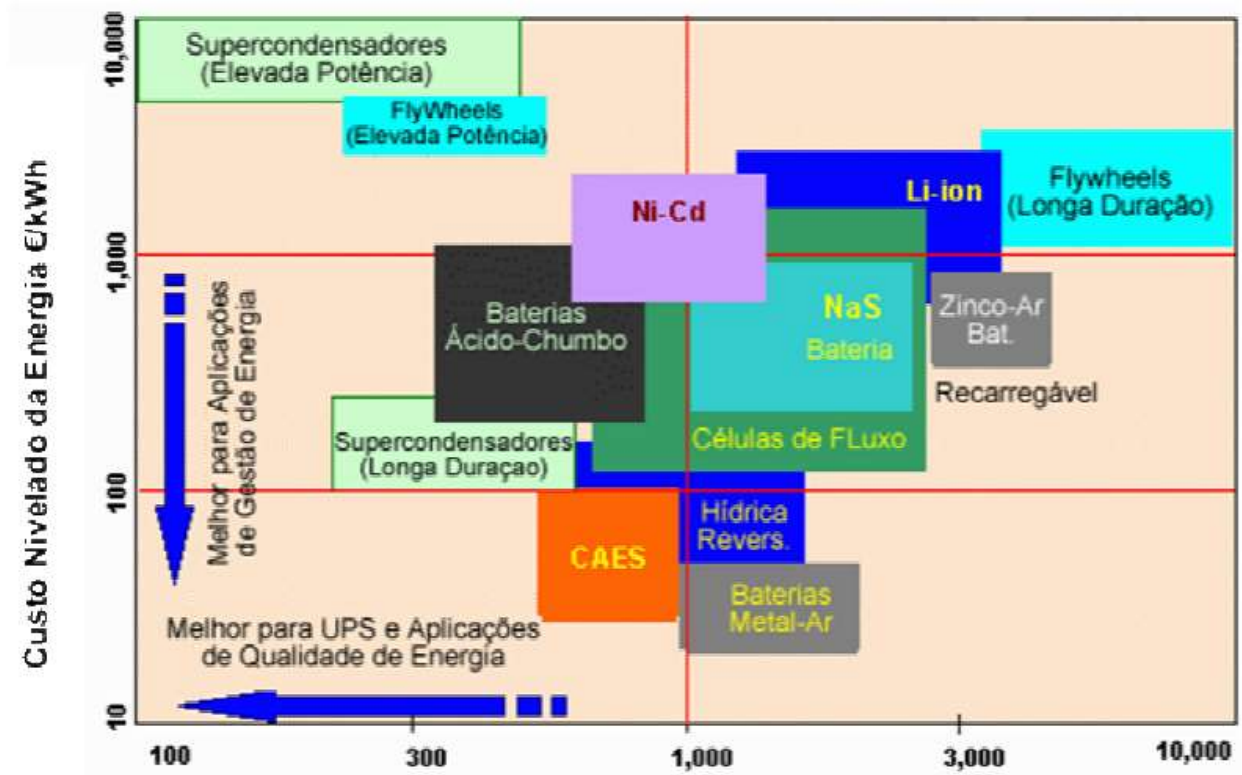
Fonte: Nexight Group (2010).

### 2.3 Custos das Tecnologias de Armazenamento

Outra questão importante é a comparação entre o custo da potência instalada e o custo da energia suprida pelo dispositivo de armazenamento. A Figura 2 ilustra em um gráfico que permite comparar esses custos para diversas tecnologias.

O gráfico apresentado na Figura 2 mostra que quanto menor for o custo da potência instalada, mais indicado para aplicações de potência será o dispositivo e quanto menor for o custo da energia fornecida pelo dispositivo, mais indicado ele será para aplicações de energia.

Figura 2: Comparação entre os custos de instalação e de operação para diversos dispositivos de armazenamento.



Fonte: Eficiência Energética e Integração Sustentada (2006).

Embora o gráfico da Figura 2 forneça apenas uma estimativa dos custos, ele permite inferir que as tecnologias de armazenamento baseadas em ar comprimido são mais apropriadas a aplicações de energia do que a maioria das baterias.

Observa-se, também, que para aplicações de potência, os *flywheels* de alta potência e os supercapacitores levam vantagem sobre as demais tecnologias de armazenamento.

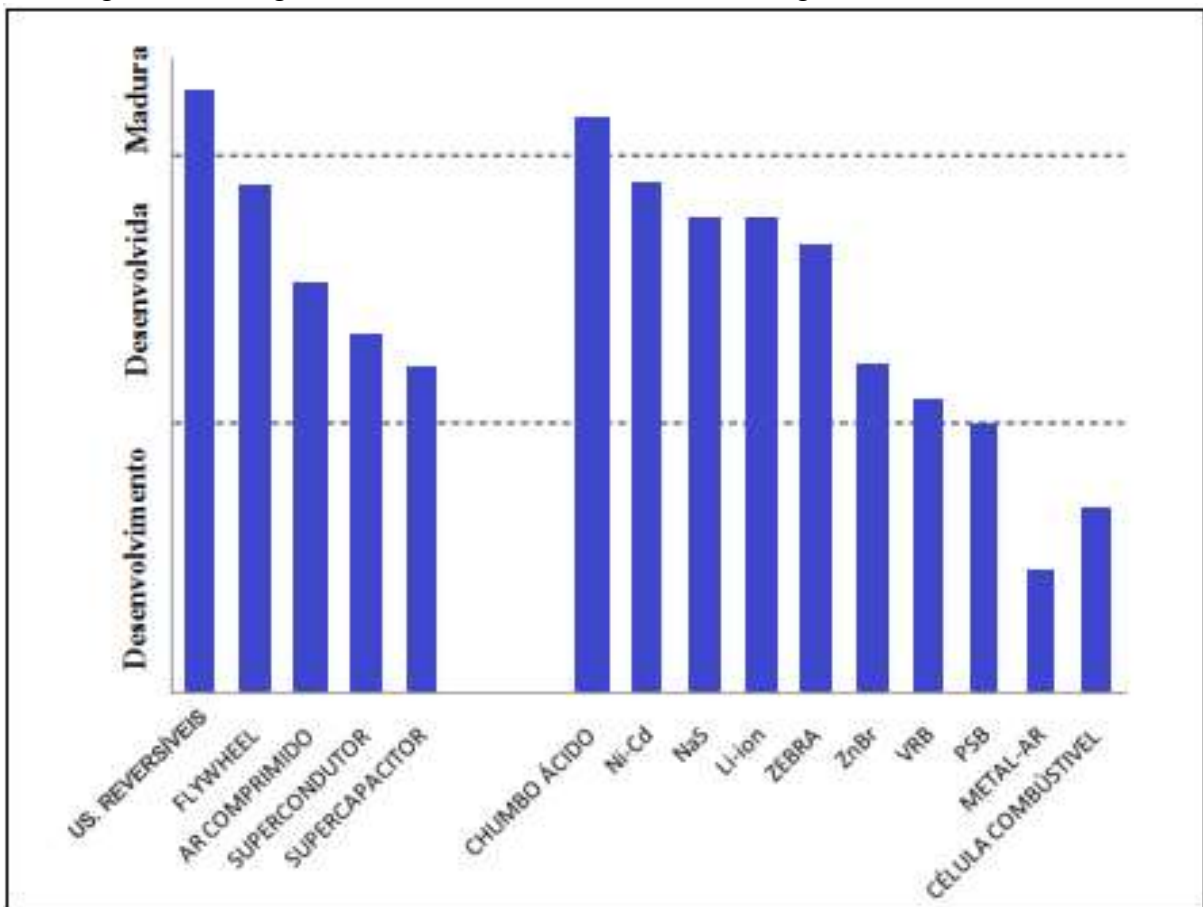
#### 2.4 Maturidade das Tecnologias de Armazenamento de Energia

As diversas tecnologias de armazenamento encontram-se em estágios distintos de maturidade. A maturidade da tecnologia de armazenamento é um aspecto importante que deve ser levado em consideração na seleção do dispositivo para atender a uma determinada aplicação.

A Figura 3 classifica as tecnologias de armazenamento quanto à maturidade em tecnologias em desenvolvimento, ou seja, aquelas que ainda não possuem um protótipo comercializável; tecnologias desenvolvidas, já estão em fase de comercialização de um protótipo, e ainda são passíveis de algum desenvolvimento; e

tecnologias maduras. Acredita-se que o panorama tecnológico da área não tenha sofrido alteração significativas nos últimos anos.

Figura 3: Estágios de maturidade de várias tecnologias de armazenamento.



Fonte: Eficiência Energética e Integração Sustentada (2006).

Observa-se que em 2006 as tecnologias que se apresentavam com maior nível de maturidade são as Usinas Reversíveis e as baterias Chumbo-Ácido, isto é, são tecnologias que já se encontram comercialmente disponíveis, com uma estrutura de custos perfeitamente definida. São tecnologias amplamente empregadas. Por outro lado, as baterias Metal-Ar e as células-combustível são as tecnologias com a menor maturidade, ou seja, encontram-se ainda em fase de desenvolvimento e com poucas unidades em demonstração.

## 2.5 Aplicações e benefícios das tecnologias de armazenamento de energia

O armazenamento de energia traz uma série de benefícios ao sistema elétrico, em todas as suas instâncias, geração, transmissão, distribuição e uso final da energia

elétrica. As aplicações e benefícios do armazenamento de energia podem ser resumidas como segue:

### **2.5.1 Melhoria da integração das fontes alternativas de energia**

O armazenamento de energia pode ser usado para otimizar a operação de fontes alternativas de energia, dispersas ao longo do sistema elétrico (RASTLER, 2010), tais como a energia eólica e fotovoltaica (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006). A energia gerada durante períodos de grande insolação e grandes ventos pode ser armazenada para ser despachada durante a noite ou períodos de pouco vento.

### **2.5.2 Adiamento das expansões dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica**

O armazenamento de energia pode adiar expansões nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica na medida em que pode suprir, localmente, parte da demanda por energia elétrica. Essa medida pode permitir que o fator de capacidade desses sistemas permaneça elevado (NEXIGHT GROUP, 2010; SOUSA *et al*, 2011; PESSANHA E LEON, 2012).

### **2.5.3 Promoção da arbitragem**

Significa a compra de eletricidade quando sua demanda e custos são baixos e venda dessa energia quando a demanda e o preço são altos. Os sistemas de armazenamento usados com este fim geralmente têm a capacidade de armazenar grandes montantes de energia; interagir com o sistema de transmissão de energia e operar em um ciclo diário de carga e descarga (NEXIGHT GROUP, 2010; SOUSA *et al*, 2011; PESSANHA E LEON, 2012).

### **2.5.4 Criação de uma reserva dinâmica**

A energia armazenada em baterias, supercapacitores, *flywheels*, capaz de ser despachada quase que imediatamente, a fim de compensar a perda momentânea da geração ou transmissão. É a primeira energia a ser despachada quando ocorre um déficit de energia (NEXIGHT GROUP, 2010; PESSANHA E LEON, 2012).

### **2.5.5 Regulação de frequência e acompanhamento da carga**

O armazenamento de energia pode agir como um buffer que isola todo o sistema elétrico de mudanças súbitas na carga, mantendo, dessa forma, a regulação de frequência durante tais eventos (TELEKE, 2011; PESSANHA E LEON, 2012).

### **2.5.6 Minimização de perdas na transmissão**

A rotina de armazenar energia durante a noite, quando as perdas são menores, e descarregar durante o dia, nos picos de demanda, reduz as perdas (TELEKE, 2011).

### **2.5.7 Regulação de tensão**

Um desafio importante para o operador do sistema elétrico é manter a tensão o mais constante possível. O armazenamento de energia, com capacidade de fornecimento de potência reativa, pode estabilizar a tensão e responder rapidamente às suas variações (TELEKE, 2011; BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a; MCDOWALL, 2000).

### **2.5.8 Redução das emissões de gases do efeito estufa**

A introdução e o uso das tecnologias de armazenamento de energia podem reduzir as emissões dos gases causadores do efeito estufa na medida em que potencializa o uso de fontes alternativas de energia (TELEKE, 2011).

### **2.5.9 Alívio do congestionamento de transmissão**

Evita custos relacionados com o congestionamento pela descarga durante a demanda de pico para reduzir os requisitos de capacidade de transmissão (PESSANHA E LEON, 2012; BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a; MCDOWALL, 2000).

### **2.5.10 Aumento da confiabilidade**

A utilização do armazenamento de energia melhora os índices de confiabilidade dos sistemas elétricos à medida em que pode suprir rapidamente o sistema durante quedas prolongadas de energia (PESSANHA E LEON, 2012; BRASIL MINISTÉRIO



DAS MINAS E ENERGIA, 2011a; NEXIGHT GROUP, 2010; BOOM AND H. A. PETERSON, 1972).

### **2.5.11 Melhoria da qualidade de energia**

O armazenamento local de energia melhora a qualidade da energia, na medida em que protege o consumidor das interrupções no fornecimento, das variações de frequência e dos efeitos dos harmônicos (PESSANHA E LEON, 2012; BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a; NEXIGHT GROUP, 2010; BOOM AND H. A. PETERSON, 1972), tais como:

- Cintilação ou *Flicker*, que é uma modulação em magnitude da tensão da rede na faixa de 0 a 30Hz. Tal fenômeno produz uma variação no fluxo luminoso das lâmpadas incandescentes;
- Cunha de tensão ou *Voltage Notch*, que significa o afundamento abrupto da tensão, provocado basicamente por retificadores trifásicos;
- *Voltage Swell*, que é o aumento da tensão da rede acima do limite especificado por norma, cuja duração não ultrapassa dois segundos;
- Sobretensão, também um aumento na tensão da rede, só que sua duração é superior a dois segundos;
- *Spikes* são picos de tensão, acima do valor nominal, com duração extremamente curta, isto é, da ordem de micro ou milissegundos;
- Afundamento de Tensão ou *Voltage Sag*, que é a queda na tensão de alimentação, abaixo do limite permitido por norma, por um período inferior a dois segundos.

### **2.5.12 Deslocamento temporal da entrada das energias renováveis**

A geração de energia proveniente de fontes alternativas como a eólica e a fotovoltaica, estão sujeitas a instabilidades intrínsecas. Assim, acontece, muitas vezes, que o ápice da produção dessas energias não ocorre concomitantemente, aos períodos de grande demanda (PESSANHA E LEON, 2012; OLIVEIRA FILHO *et al*, 2013; SILVA, OLIVEIRA E SEVERINO, 2011; ROBERTS, 2009; BRASIL MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2011a; MCDOWALL, 2000; NEXIGHT GROUP, 2010; BOOM AND H. A. PETERSON, 1972).

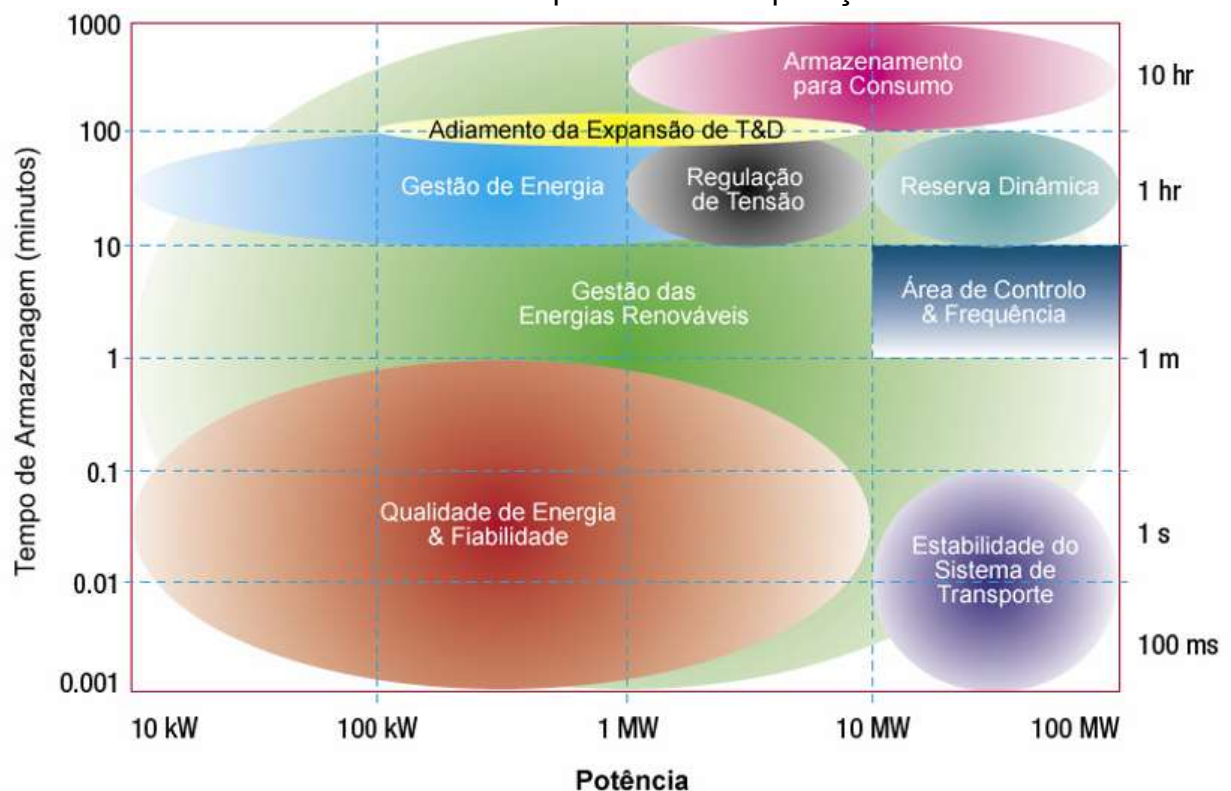
Desta forma a solução que otimiza a produção de energia por meio dessas fontes alternativas é armazenar o excedente da energia produzida nos períodos de baixa demanda para disponibilizá-la ao sistema elétrico nos períodos de maior demanda (PESSANHA E LEON, 2012; OLIVEIRA FILHO *et al*, 2013, SILVA, OLIVEIRA E SEVERINO, 2011; NEXIGHT GROUP, 2010; BOOM AND H. A. PETERSON, 1972).

## 2.6 Requisitos para algumas aplicações do armazenamento de energia

A Figura 4 ilustra um gráfico que relaciona diversas aplicações do armazenamento de energia em sistemas elétricos de potência com a autonomia de armazenamento e a faixa de potência requeridas das tecnologias a serem empregadas para estas finalidades.

Os dados apresentados na Figura 4 são estimados. Essas características podem variar significativamente para uma mesma aplicação em função de vários fatores (RASTLER, 2010).

Figura 4: Tempo de descarga e faixa de potência requeridos das tecnologias de armazenamento para diversas aplicações.



Fonte: Rastler (2010).

Observa-se na Figura 4 que aplicações voltadas à qualidade de energia requerem o suprimento de potências de até 10 MW num intervalo de tempo de até 1

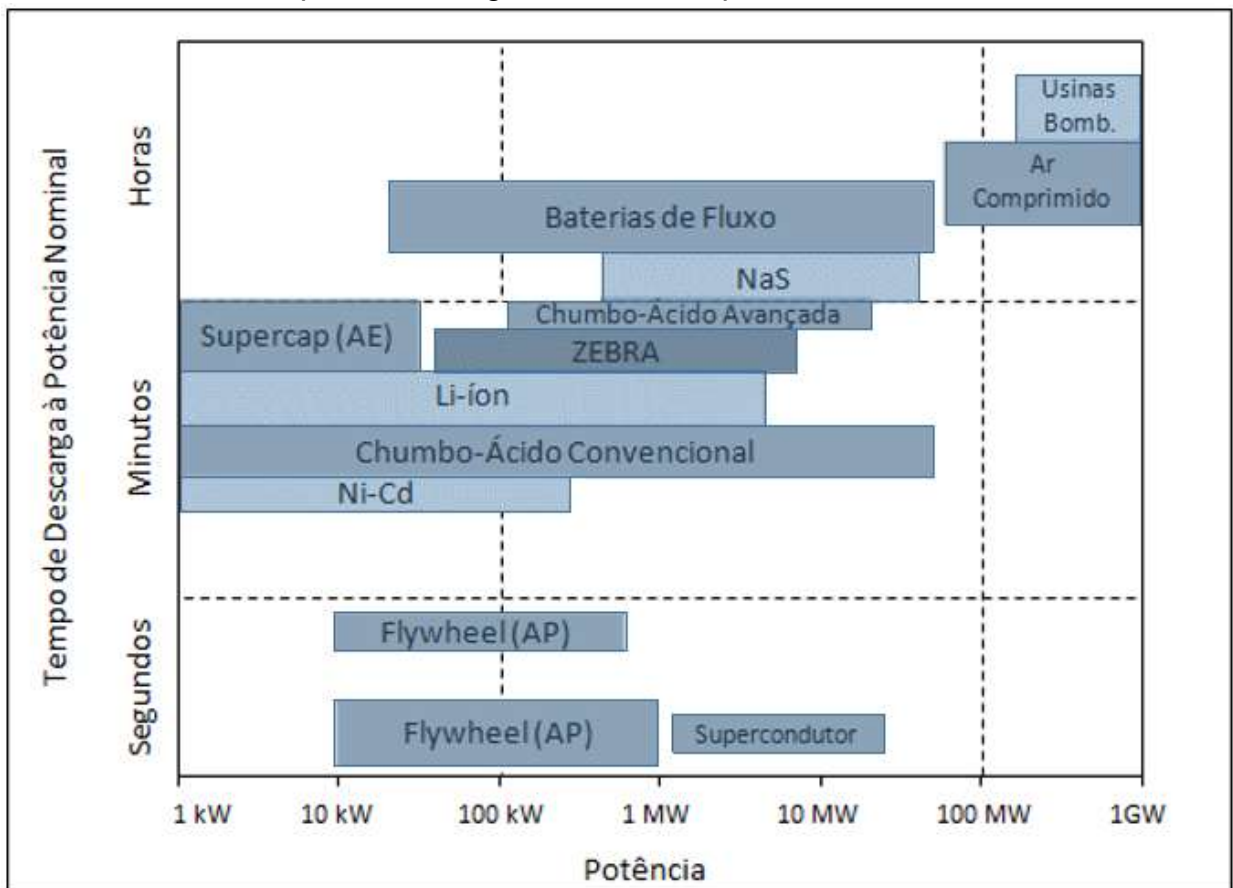
minuto. Observa-se, também, que aplicações relacionadas com o armazenamento de energia para consumo, demandam potências elevadas por períodos de tempo superiores a 1 h.

As referências Nexight Group, (2010) e Rastler, (2010) apresentam tabelas que detalham a Figura 4, incluindo um número maior de aplicações, subdividindo algumas delas em várias classes, procurando assim melhorar a precisão das estimativas.

## 2.7 Autonomia de armazenamento versus potência nominal

A Figura 5 ilustra a dispersão de algumas tecnologias de armazenamento em função de sua autonomia e de sua potência nominal.

Figura 5: Dispersão de algumas tecnologias de armazenamento em função de seu tempo de descarga e da faixa de potência fornecida.



Fonte: Kintner-Meyer e Emery (1995).

Observando-se a Figura 5, vê-se que as aplicações relacionadas à qualidade de energia podem ser atendidas por sistemas de armazenamento baseados em supercondutores, supercapacitores, *flywheels* e em alguns tipos de baterias. De forma análoga, ainda considerando a Figura 5, verifica-se que aplicações relacionadas ao

armazenamento de energia para consumo podem ser plenamente atendidas empregando-se usinas reversíveis e armazenamento de energia por meio de ar comprimido, podendo também ser atendidas, em certa medida, por baterias de fluxo e NaS.

## 2.8 Principais Tecnologias de Armazenamento de Energia

As tecnologias de armazenamento de energia podem ser classificadas de várias maneiras. Uma delas é pela forma como a energia é armazenada. O Quadro 2 apresenta as principais formas de armazenamento de energia.

Quadro 02 - Formas de armazenamento de energia e exemplos de tecnologias representantes.

Forma de Armazenamento	Tecnologias
Energia elétrica	Supercapacitores Supercondutores
Energia eletroquímica	Baterias
Energia cinética	<i>Flywheels</i>
Energia potencial	Usinas reversíveis Ar comprimido
Energia térmica	Sistemas sensíveis ao calor Sistemas de calor latente

Fonte: Eficiência Energética e Integração Sustentada (2006).

### 2.8.1 Supercapacitores

Também conhecidos como capacitores eletroquímicos ou ultracapacitores. Seus pontos positivos são a alta densidade de potência, um número elevado de ciclos de carga/descarga e uma recarga rápida. Como pontos negativos podem-se citar: baixa densidade de energia, alto custo e necessidade de circuitos para um controle escalonado da tensão em seus terminais (ELECTRICITY STORAGE ASSOCIATION, 2009; SILVA, OLIVEIRA E SEVERINO, 2011; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

O custo dos supercapacitores de maior densidade de potência varia entre 150 e 600 €/KW, já o custo dos supercapacitores de maior densidade de energia está entre 200 e 800 €/KW (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

Não se encontra na literatura relatos sobre preocupações ambientais quanto ao descarte desses dispositivos.

### **2.8.2 Supercondutores**

Conhecido em inglês pela sigla SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*), esta tecnologia utiliza o campo magnético para o armazenamento de energia (KAMATH, 2014). São dispositivos de armazenamento de alta densidade de potência e baixa densidade de energia, possuindo um custo operacional elevado (BOOM E PETERSON, 1972; KINTNER-MEYER E EMERY, 1995).

Os supercondutores são baseados em três componentes, que são a bobina supercondutora, o sistema elétrico de potência e o sistema de refrigeração criogênica, tendo 95% de eficiência de carga e descarga, e apresentando alta confiabilidade (JUNG, 2010).

### **2.8.3 Baterias**

Os sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias são bastante eficientes do ponto de vista econômico. Existe uma gama de novas tecnologias nesta área que vem aumentando as vantagens competitivas desta tecnologia tais como: alta densidade de energia, eficiência no processo de carga e descarga, elevado número de ciclos de carga e descarga, maior vida útil, maior confiabilidade. Tais características favorecem muitas aplicações voltadas aos sistemas elétricos de potência (GYUK, 2003; MCDOWALL, 2000; ROBERTS, 2009; TELEKE E BARAN, 2009).

As vantagens na utilização das baterias, são as características de tensão; o dimensionamento e o fornecimento de grande quantidade de energia durante grandes períodos de tempo. As desvantagens são a necessidade de sistemas de controle complexos; contraindicada para aplicações que requerem carga/descarga rápidas; contraindicada para utilização em sistemas remotos por conta da necessidade de manutenção; preocupações ambientais com o descarte ao final de sua vida útil; número ainda pequeno de ciclos de carga/descarga (KAMATH, 2014).

Existem diversos tipos de baterias que diferem entre si pelos materiais empregados como eletrólito e eletrodos, formato e dimensões do dispositivo. Dentre elas destacam-se: baterias de chumbo-ácido, NiCd, NaS, Li-ions, metal-ar e de fluxo.

As baterias de chumbo-ácido apresentam menor densidade de potência e de energia e baixo custo de manutenção (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO

SUSTENTADA, 2006; JUNG, 2010). São utilizadas nos setores automotivos (na iluminação ou no sistema de ignição) e industriais (na tração dos veículos ou no fornecimento de energia elétrica) (GANDARA, NUNES e GULLO, 2012).

As baterias de níquel-cádmio (NiCd) possuem baixa densidade de energia, mas apresentam elevada densidade de potência. Possui como desvantagens o efeito memória e a toxicidade do cádmio o que gera grandes preocupações ambientais ao final de sua vida útil (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006). De acordo com Jung (2010), esta bateria foi substituída por baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH) e de íon de lítio (Li-ion).

As baterias de sódio-enxofre (NaS), se destacam por utilizar materiais de baixo custo e abundantes na natureza, e ter uma vida útil bastante longa e alta densidade de energia. O principal ponto negativo desta bateria é a elevada temperatura de operação (250 a 400 °C), a fim de manter o sódio fundido. Não menos problemático é o fato de que o sódio é muito corrosivo e muito reativo, o que afeta a sua segurança operacional (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

Para contornar o problema de segurança das baterias de NaS foram desenvolvidas as baterias de Sódio-Níquel, também conhecidas como baterias ZEBRA. Essas baterias também precisam operar com temperatura elevada e usam o cloreto de níquel como eletrodo positivo. Em comparação com as baterias de NaS são mais seguras e capazes de resistir a sobrecargas e sobre descargas. Contudo, a densidade de energia e de potência são menores (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

As baterias de Íons de Lítio (Li-íon), foram desenvolvidas originalmente para aplicações em eletroportáteis. Evoluíram rapidamente para veículos elétricos e híbridos, existindo algumas outras aplicações estacionárias de alta potência. Suas principais vantagens são a sua elevada densidade de energia, alto rendimento e grande número de ciclos de carga/descarga (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006). Possuem como desvantagem a necessidade predominantemente de circuitos de controle complexos. As suas aplicações são na mobilidade e em algumas poucas instalações de demonstração estacionárias.

As baterias Metal-Ar têm como vantagens como sendo de menor impacto ambiental; alta densidade de energia e potência. As suas desvantagens são a baixa eficiência e em sua maioria não são eletricamente recarregáveis (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

As baterias de fluxo convertem energia elétrica em energia química, através de uma reação química reversível entre duas soluções eletrolíticas líquidas. Cada célula tem dois compartimentos, um para cada eletrólito, fisicamente separados por uma membrana de troca de íons. Os eletrólitos armazenados nos dois tanques são bombeados através das células e da membrana, onde um eletrólito é oxidado quimicamente e o outro é reduzido quimicamente, criando uma diferença de potencial entre os eletrodos (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006). Para Kamath (2014), as baterias de fluxo têm como vantagens a alta densidade de energia e possibilidade de fabricação em dimensões variadas. As suas desvantagens são a baixa densidade de potência; o alto custo de manutenção e tecnologia imatura. Possuem como aplicação potencial a integração de fontes alternativas de energia.

Atualmente existem três tipos de baterias de fluxo: polissulfeto de brometo (PSB), brometo de vanádio (VRB) e brometo de zinco (ZnBr).

Akhil (2006) complementa que os principais benefícios na utilização das baterias, como forma de armazenamento de energia, são a regulação de frequência, suporte de transmissão, distribuição, gestão de custos no tempo de uso de energia, demanda de gestão, confiabilidade, qualidade no serviço de energia e capacidade renovável.

#### **2.8.4 *Flywheels* ou Baterias Eletromecânicas**

São dispositivos que armazenam energia sob a forma cinética, em uma massa inercial que gira a grande velocidade. Os modernos sistemas de *flywheel* consistem em um grande cilindro rotativo que é apoiado a um estator por meio de mancais com levitação magnética, o que elimina o atrito. Para aumentar a eficiência, o sistema é operado em uma câmara a vácuo a fim de minimizar o arrasto aerodinâmico. O cilindro de inércia é acoplado a um motor/gerador montado no estator (ELECTRICITY STORAGE ASSOCIATION, 2009; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

As vantagens dessa tecnologia são alta densidade de potência; milhares números de ciclos de carga/descarga, o que leva a uma longa vida útil (cerca de 20 anos); resposta rápida; rápida capacidade de carga/descarga; baixo custo de manutenção; e baixo impacto ambiental, já que é constituído de materiais inertes. (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006; ELECTRICITY STORAGE ASSOCIATION, 2009; ELKIND, 2010; JUNG, 2010; KAMATH, 2014). Suas

desvantagens são a baixa densidade de energia (KAMATH, 2014); e os elevados custos (FAYET, 2012).

Os flywheels de maior densidade de potência têm o seu custo variando entre 200 e 700 €/KW. O custo dos flywheels de maior densidade de energia varia entre 3000 e 10000 €/KW (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

Devido à sua elevada densidade de potência e baixa densidade de energia, os *flywheels* são recomendados para fazer a interligação da carga com os dispositivos de armazenamento de alta densidade de energia, já que os últimos possuem um tempo de resposta maior.

### 2.8.5 Usinas Reversíveis

Também conhecidas como usinas de bombeamento, ou em inglês, *pump hydro storage* (PHS), são usinas que aproveitam a energia de baixo custo disponível no sistema elétrico durante períodos de baixa demanda, para bombear água de um reservatório mais baixo para outro reservatório mais elevado. Durante os períodos de alta demanda de eletricidade, a usina opera de modo convencional produzindo energia elétrica que é vendida a um valor mais elevado (ROBERTS, 2009; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

As vantagens das usinas reversíveis são a otimização do uso dos reservatórios; a energia produzida é considerada limpa; é a melhor combinação de investimento, tempo e eficiência (baixo custo de operação (80 – 110 €/KWh) e longa vida útil (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 2008; MATT, 2012; ELKIND, *et al*, 2011).

As desvantagens são a necessidade de uma região geograficamente favorável à sua construção; impactos ambientais e longo tempo de construção (KAMATH, 2014; ELKIND, *et al*, 2011). O grande desafio para o desenvolvimento das usinas reversíveis são a redução dos impactos e a reutilização da água, o que diminuiria os impactos ambientais (MACEDO, 2003).

### 2.8.6 Ar Comprimido

A sigla em inglês desta modalidade de armazenamento é CAES (*compressed air energy storage*). Esta modalidade de armazenamento de energia consiste na compressão de ar, durante períodos nos quais a energia é barata, para que esse



possa ser usado mais tarde, nos períodos de pico, como fonte de energia, para movimentar turbinas a gás (ROBERTS, 2009; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

O ar comprimido pode ser armazenado em diversos tipos de reservatórios, como por exemplo, formações rochosas porosas; minas subterrâneas; cavernas criadas no interior de rochas; aquíferos esgotados; poços de petróleo esgotados e minas de gás natural esgotados (DEAL, *et al*, 2010; GYUK, 2003; ROBERTS, 2009; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

As vantagens da utilização dessa tecnologia são fonte de energia eficiente, limpa e econômica; alta capacidade de produção de energia; baixo custo de instalação (300 – 1000 €/KW) e operacional (menor do que 100 €/KWh) quando comparados aos das usinas reversíveis e baterias (JUNG, 2010; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006; KAMATH, 2014).

As desvantagens são a necessidade de formações geológicas apropriadas e alto custo de construção (KAMATH, 2014). Atualmente existem pesquisas voltadas ao desenvolvimento de tanques de armazenamento, visando a redução de sítios geográficos especiais (TELEKE, 2011).

### **2.8.7 Energia Térmica**

O armazenamento de energia na modalidade térmica ocorre tanto na forma de calor sensível como de calor latente. Nos sistemas de calor sensível, usinas térmicas solares, a irradiação solar aquece um óleo sintético ou um sal fundido armazenando a energia sob a forma de calor para que possa gerar eletricidade durante períodos de céu nublado ou estender a produção de eletricidade após o pôr do sol (PRICE, 2002; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

Já nos sistemas de calor latente, usa-se a eletricidade durante períodos em que o seu custo é baixo para aquecer (HT-TES: *High Temperature Thermal Energy Storage*) ou congelar água (AL-TES: *Aquiferous Low Temperature Energy Storage*), armazenando-a em aquíferos subterrâneos, tanques de gelo, ou outro meio de armazenamento, para que possa ser utilizada para aquecimento ou refrigeração de ar durante períodos do dia em que o custo da eletricidade é maior (KINTNER-MEYER E EMERY, 1995; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA, 2006).

As vantagens da sua utilização são fonte de energia limpa e econômica; as usinas térmicas solares possuem alta capacidade de produção; baixo custo de instalação e operação em comparação com as usinas reversíveis convencionais.

Possui como desvantagens a necessidade de sítios geológicos apropriados e tanques volumosos.

## 2.9 Armazenamento de energia no Brasil

O sistema elétrico brasileiro é baseado em grandes usinas hidrelétricas, muitas delas com regularização plurianual, distantes dos grandes centros consumidores de energia elétrica (AZEVEDO, 2011).

Sem dúvida o armazenamento de água em grandes reservatórios é uma modalidade de armazenamento de energia. Contudo, do ponto de vista das tecnologias de armazenamento discutidos no escopo desta pesquisa, o sistema elétrico brasileiro é dotado de apenas uma Usina Hidrelétrica Reversível, a Usina Hidrelétrica de Pedreira, com capacidade instalada de 20 MW.

Dessa forma, o sistema elétrico brasileiro deixa de usufruir dos benefícios advindos do armazenamento de energia em grande escala.

Figura 6: Usina hidrelétrica de Pedreira (20 MW), a única experiência brasileira no armazenamento de energia em massa.



Fonte: EMAE Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.

### 3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

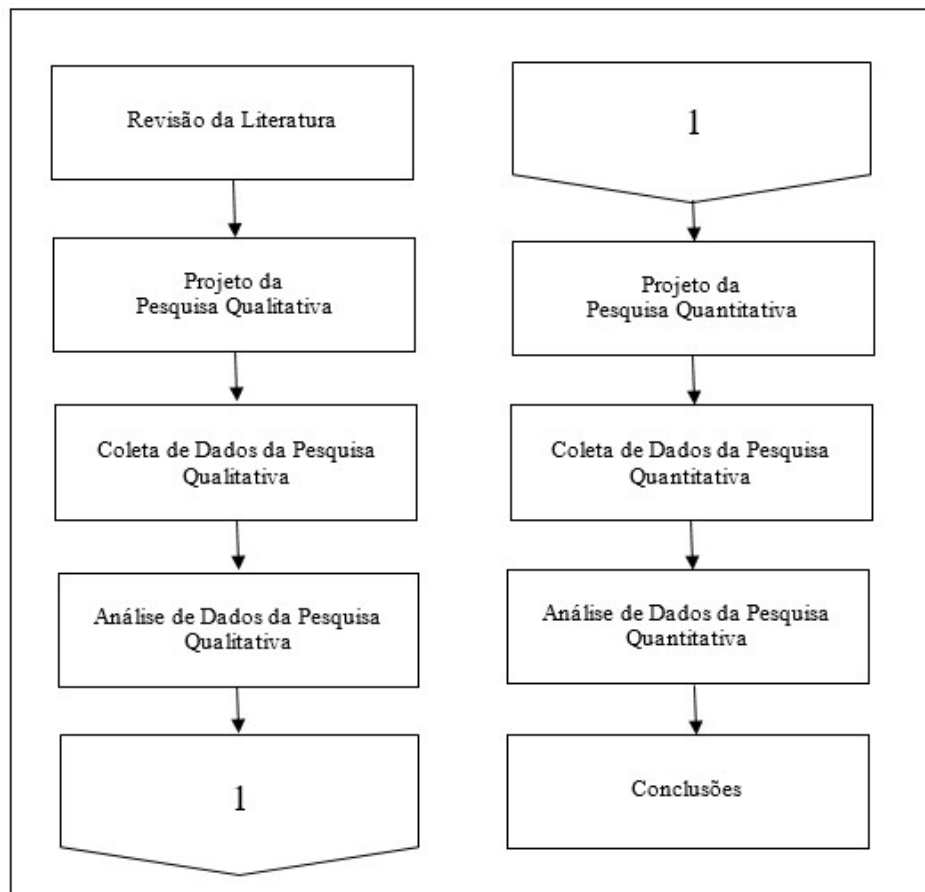
Primeiramente fez-se uma pesquisa bibliográfica para proporcionar maior familiaridade com o tema e aperfeiçoamento das ideias a serem exploradas. Nesta primeira pesquisa buscaram-se elementos para identificar os obstáculos que impedem a disseminação de armazenamento de energia, sob o ponto de vista dos especialistas.

Numa segunda etapa, foi feita uma pesquisa exploratória junto aos especialistas, utilizando-se um questionário aberto, a fim de recolher novos elementos que permitissem ratificar e/ou ampliar o conjunto inicial de obstáculos.

Com o conjunto de obstáculos consolidados, partiu-se para a classificação desses fatores quanto à sua importância. Para tanto, fez-se uma nova pesquisa junto aos mesmos especialistas da pesquisa anterior, apresentando a eles a relação dos obstáculos elencados na pesquisa exploratória, para que fossem ordenados segundo sua importância.

A Figura 7 ilustra o fluxograma das etapas desta pesquisa. Em seguida, será feito uma breve descrição dessas etapas.

Figura 7: Fluxograma da pesquisa destinada a identificar e classificar os obstáculos à implantação de armazenamento de energia em massa na rede elétrica.



### **3.1 Revisão da literatura**

A revisão da literatura identificou alguns dos obstáculos que impedem a disseminação do armazenamento de energia através dos olhos de especialistas. Além disso, contextualizou melhor o assunto, incluindo suas características e os benefícios decorrentes da sua aplicação no sistema elétrico.

### **3.2 Projeto da Pesquisa Qualitativa**

Durante esta etapa, foi identificada a população a ser pesquisada. Também nesta etapa, foi desenvolvido o instrumento utilizado nesta coleta de dados.

### **3.3 Coleta de Dados da Pesquisa Qualitativa**

O questionário aberto, desenvolvido no item anterior, foi enviado, por e-mail, aos participantes desta pesquisa. A partir do envio, foi feito um acompanhamento destes questionários. Em alguns casos, em vez de um e-mail, foram realizadas entrevistas.

### **3.4 Análise de Dados da Pesquisa Qualitativa**

A primeira etapa desta fase foi identificar os termos chaves nas respostas dos participantes. Em seguida foi realizado o agrupamento destes termos em categorias. Tais categorias se configuram como os principais obstáculos a disseminação do armazenamento de energia em grande escala no sistema elétrico brasileiro.

### **3.5 Projeto da Pesquisa Quantitativa**

A relação dos obstáculos obtidos no item anterior, foi novamente submetida aos respondentes da pesquisa anterior para que eles os classificassem segundo sua importância. Essa relação foi antecedida por um parágrafo explicativo.

### **3.6 Coleta de Dados da Pesquisa Quantitativa**

A exemplo da etapa quantitativa, o instrumento de coleta de dados elaborado acima, foi enviado, por e-mail, aos participantes desta pesquisa.

### **3.7 Análise de Dados da Pesquisa Quantitativa**

A classificação dos obstáculos quanto a sua importância, foi feita segundo o método apresentado por Faria Neto e Faria (2015). Este método permite além da classificação relativa dos obstáculos, uma avaliação absoluta da importância de cada obstáculo. Este método se utiliza da instrumentação das técnicas clássicas de agrupamento, associando os obstáculos a postos de importância.

### **3.8 Conclusões**

Após a coleta dos resultados das entrevistas, as respostas foram submetidas a uma análise de conteúdo e classificação dos obstáculos, conforme sua importância. Posteriormente, foi realizado um estudo da matriz de correlação dos fatores. Os resultados serão mostrados no próximo capítulo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Revisão da literatura

De acordo com a literatura especializada, principalmente nos EUA, existem grandes oportunidades para o armazenamento de energia, seguidos de alguns obstáculos à sua adoção.

Os principais obstáculos identificados pela literatura americana encontram-se destacados a seguir:

#### **A. Estrutura mercadológica deficiente**

O armazenamento de energia pode contribuir com a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica, mas os especialistas argumentam que é difícil classificar o armazenamento de energia a partir de um desses pontos de vista. Como a precificação da energia proveniente do armazenamento depende desta classificação, avaliar o seu valor em comparação à infraestrutura tradicional de custos é bastante difícil. Sem um modelo de precificação, é difícil garantir às partes interessadas que elas receberão um retorno pelo seu investimento (NEXIGHT GROUP, 2010).

#### **B. Progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento**

De acordo com Nexight Group (2010), muitas tecnologias não atingiram um nível de maturidade propício para a implantação comercial, por exemplo, capacidade de armazenamento e a eficiência das principais tecnologias ainda são bem reduzidas para atender às necessidades atuais do sistema elétrico. Isso dificulta o convencimento dos gestores quanto às potencialidades do armazenamento de energia.

#### **C. Alto custo das tecnologias de armazenamento**

O alto custo de muitas tecnologias é um grande obstáculo para a integração de dispositivos de armazenamento ao sistema elétrico (NEXIGHT GROUP, 2010).

## **D. Pouco conhecimento sobre o tema da parte dos envolvidos**

De acordo com Nexight Group (2010), os benefícios do armazenamento de energia em grande escala não são bem compreendidos pelas pessoas envolvidas com a gestão do sistema elétrico. Essa compreensão é fundamental para implantar as tecnologias de armazenamento. Usuários e gestores do sistema elétrico não estão cientes dos benefícios trazidos pelo armazenamento de energia.

### **4.2 Pesquisa Qualitativa**

A Pesquisa Qualitativa foi realizada entre 47 grupos de pesquisa, três agências governamentais e dez empresas de serviços públicos, totalizando 150 questionários / entrevistas. Esses foram convidados a ler um parágrafo curto sobre os benefícios do armazenamento de energia e, em seguida, foi pedido para responderem a uma pergunta no final do texto, conforme a seguir.

*“Sabe-se que ao longo dos últimos anos o aumento da demanda por energia elétrica não vem sendo acompanhado, na mesma proporção, pelo aumento da oferta de energia elétrica, nem tampouco das linhas de transmissão que se fazem necessárias para que a energia gerada nas usinas chegue aos grandes centros consumidores. Isso faz com que aumente a pressão sobre os gestores do sistema elétrico para manter a confiabilidade do sistema. Todavia, as obras necessárias para diminuir a defasagem entre a demanda e a produção de energia elétrica exigem recursos elevados e períodos de tempo relativamente longos. Alguns estudos apontam que uma solução de curto e médio prazo para minimizar essa defasagem pode ser o armazenamento de energia.*

*Na sua opinião, quais são os obstáculos que dificultam a disseminação do armazenamento de energia no sistema elétrico. O que poderia ser feito para contornar esses obstáculos?”*

Analisando-se o conteúdo das respostas dos questionários, identificaram-se diversos termos chaves que foram agrupados conforme sua semelhança em 10

grupos. Cada um desses grupos foi associado a um obstáculo. O Quadro 3 apresenta os termos chaves encontrados e suas correspondências com os obstáculos.

Quadro 3 - Principais termos associados aos obstáculos do ponto de vista dos especialistas brasileiros

<b>Termos Chave</b>	<b>Obstáculos</b>
Falta de incentivos governamentais e a falta de um modelo de precificação para a energia armazenada	Estrutura mercadológica deficient
Curta duração de armazenamento, baixa capacidade de armazenamento de energia, baixa eficiência, baixo ciclo de vida e necessidade eletrônica de potência avançada, tecnologia complexa e limitações tecnológicas	Progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento
Altos custo de produção, manutenção, operação e instalação	Alto custo das tecnologias de armazenamento
Falta de entendimento, falta de divulgação, falta de pesquisa e falta de cursos de graduação	Pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro
Restrições geológicas, restrições geográficas	Questões geográficas
Inundação, problemas de descarte, contaminação e resíduos	Questões ambientais
Aumento do número de pequenas usinas, aumento da geração hidrelétrica e retrofit das pequenas usinas	O sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia
Aumento da eficiência dos produtos, aumento da eficiência dos processos, diminuição das perdas e armazenamento virtual	O sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia
Sistemas isolados para armazenamento de energia	Tamanho do sistema elétrico
Pouca geração solar, pouca geração eólica, pouca geração alternativa e baixa penetração de renováveis	Baixa penetração de fontes alternativas de energia (solar e eólica) no sistema elétrico brasileiro



Portanto, a pesquisa apontou, do ponto de vista dos entrevistados, dez obstáculos à implantação de armazenamento de energia: desses obstáculos quatro já foram mencionados na literatura, estrutura mercadológica deficiente, progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento, alto custo das tecnologias de armazenamento e pouco conhecimento das tecnologias e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro. Os outros seis são que o sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia, o sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia, baixa penetração de fontes alternativas de energia (solar e eólica) no sistema elétrico brasileiro, questões geográficas, questões ambientais e tamanho do sistema elétrico, serão explicados abaixo.

**A. O sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia**

Representa o sentimento de que é muito melhor investir em pequenas centrais hidrelétricas próximas aos centros consumidores do que no armazenamento de energia.

**B. O sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia**

A economia de energia é uma espécie de "armazenamento virtual". Então, antes de se pensar em construir instalações de armazenamento de energia, seria melhor aumentar a eficiência de produtos e processos, por meio de legislação reguladora e campanhas de sensibilização.

**C. Baixa penetração de fontes alternativas de energia (solar e eólica) no sistema elétrico brasileiro**

O armazenamento de energia só é necessário se existir uma grande penetração das fontes de energia alternativas no sistema elétrico. Uma vez que no Brasil a

integração das energias eólica e solar à rede elétrica é ainda muito pequena, há aqueles que acreditam que o armazenamento de energia não é necessário, pois este só faria sentido para os sistemas elétricos com alta penetração de energias renováveis.

#### **D. Questões Geográficas**

Usinas hidrelétricas reversíveis e sistemas de ar comprimido dependem de localizações geográficas adequadas. Uma vez que tais sítios não estão facilmente disponíveis, as condições geográficas podem ser consideradas um obstáculo à implantação dessas tecnologias.

#### **E. Questões Ambientais**

A instalação de usinas hidrelétricas, demanda preocupações com algumas questões, como a disponibilidade de água, irrigação, vazões mínimas, passagem de peixes e licenciamento ambiental.

A utilização de baterias como meio de armazenamento de energia suscita a preocupação com questões ambientais quando se considera o seu descarte ao fim de sua vida útil.

Desta forma as questões ambientais podem ser um obstáculo à disseminação do armazenamento de energia ao longo do sistema elétrico.

#### **F. Tamanho do sistema elétrico**

Armazenamento de energia não é adequado para grandes sistemas interligados.

A Figura 8 mostra a distribuição da frequência dos obstáculos de acordo com os respondentes.

Figura 8: Distribuição da frequência dos obstáculos de acordo com os respondentes.



Fonte: Dados da pesquisa qualitativa.

De acordo com os entrevistados, o alto custo de tecnologias de armazenamento, o progresso técnico insuficiente e a baixa participação das energias renováveis no sistema elétrico são os obstáculos mais citados, enquanto o tamanho do sistema elétrico, o sentimento de que aumentar a eficiência energética de produtos e processos é mais eficaz do que investir no armazenamento de energia e o sentimento de que pequenas usinas hidrelétricas construídas próximas aos centros consumidores de energia elétrica são mais eficazes do que o investimento em instalações de armazenamento de energia são os menos frequentes.

Os quatro obstáculos já identificados na literatura são válidos para o caso brasileiro e não necessitam de uma análise mais aprofundada, além daquela já apresentada nos resultados obtidos diretamente da revisão bibliográfica.

Os obstáculos restrições geográficas e restrições ambientais foram agrupadas em uma mesma categoria, pois possuem uma similaridade nos termos chaves.

A validade do sentimento de que pequenas usinas são mais eficazes do que o armazenamento de energia se torna mais difícil de ser analisada, uma vez que é necessário comparar os custos para se construir pequenas usinas, com os custos de instalações de armazenamento de energia possuindo a mesma capacidade.

Além disso, é necessário ter em conta as limitações geográficas para esse tipo de usina hidrelétrica, tendo a possibilidade de instalá-la perto dos centros de consumo.

Já o obstáculo identificado como “Tamanho do Sistema Elétrico” não parece ser um obstáculo válido já que a capacidade de armazenamento não tem vínculo com a capacidade instalada. Por exemplo, a potência instalada nos EUA é de 1110 GW contra 133 GW no Brasil, portanto um sistema elétrico bem maior do que o brasileiro. Já a capacidade de armazenamento nos EUA chega a 1,92% da potência instalada contra 0,02% no Brasil. Por outro lado, a potência instalada no Chile é de cerca de 14 GW e a capacidade de armazenamento alcança aproximadamente 0,51% da potência instalada. A Tabela 1 resume esses dados.

Tabela 1 - Tamanho da grade de potência e capacidade de armazenamento para vários países. Fonte: Energy Storage Exchange (2015)

<b>País</b>	<b>Capacidade (GW)</b>	<b>Armazenamento (GW)</b>	<b>Armazenamento (% Cap)</b>
EUA	1110	21,40	1,92
GER	181	7,00	3,87
BRA	133	0,02	0,02
CHI	14	0,07	0,51

Desta forma, os 10 obstáculos identificados inicialmente foram sintetizados em 8: alto custo das tecnologias de armazenamento; progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento; baixa penetração de fontes alternativas de energia (solar e eólica) no sistema elétrico brasileiro; pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro; questões ambientais e geográficas; estrutura mercadológica deficiente; o sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia e o sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia.

### 4.3 Pesquisa Quantitativa

Após a identificação dos obstáculos, desejou-se classificá-los quanto à sua importância. Portanto, foi necessária uma elaboração de um instrumento para realizar essa classificação.

#### 4.3.1 Ordenação Geral dos Obstáculos

Na fase da Pesquisa Qualitativa foram identificados oito obstáculos, conforme apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Obstáculos à disseminação do armazenamento de energia no sistema elétrico brasileiro.

OBSTÁCULOS	DESCRIÇÃO
OB-1	Estrutura mercadológica deficiente
OB-2	Progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento
OB-3	Alto custo das tecnologias de armazenamento
OB-4	Pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro
OB-5	Questões ambientais e geográficas
OB-6	Baixa penetração de fontes alternativas de energia (solar e eólica) no sistema elétrico brasileiro
OB-7	O sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia
OB-8	O sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia

#### 4.3.2 Instrumento de Classificação

O instrumento de classificação inicia-se com um parágrafo que procura contextualizar o problema e em seguida é apresentada uma lista contendo os oito obstáculos do Quadro 4. Pede-se para que os respondentes atribuam um número de 1 a 8 para cada um dos obstáculos, sem repetição, sendo que ao obstáculo mais importante deve ser atribuído 1 e ao menos importante 8.

*“Sabe-se que ao longo dos últimos anos o aumento da demanda por energia elétrica não vem sendo acompanhado, na mesma proporção, pelo aumento da oferta de energia elétrica, nem tampouco das linhas de transmissão que se fazem necessárias para que a energia gerada nas usinas chegue aos grandes centros consumidores. Isso faz com que aumente a pressão sobre os gestores do sistema elétrico para manter a confiabilidade do sistema. Todavia, as obras necessárias para diminuir a defasagem entre a demanda e a produção de energia elétrica exigem recursos elevados e períodos de tempo relativamente longos. Alguns estudos apontam que uma solução de curto e médio prazo para minimizar essa defasagem pode ser o armazenamento de energia. Uma pesquisa recente elencou os oito itens abaixo, como os principais obstáculos à disseminação do armazenamento de energia no sistema elétrico brasileiro.*

- *Estrutura mercadológica deficiente.....( )*
- *Progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento.....( )*
- *Alto custo das tecnologias de armazenamento.....( )*
- *Pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro.....( )*
- *Questões ambientais e geográficas.....( )*
- *Baixa penetração de fontes alternativas de energia (solar e eólica) no sistema elétrico brasileiro.....( )*
- *O sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia.....( )*
- *O sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos*

*consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia.....( )*

*Indique a importância de cada um dos obstáculos acima atribuindo, sem repetição, um número de 1 a 8 (1 mais importante e 8 menos importante).”*

Este instrumento foi submetido a uma amostra de 150 respondentes, mas apenas 68 deles retornaram o questionário, portanto, uma taxa de retorno de 45%.

Cada respondente fez a classificação segundo seu conhecimento e experiência. Portanto, as classificações são diferentes para cada respondente. A Tabela 2 apresenta a ordenação dos obstáculos para cada um dos 68 respondentes.

Tabela 2 - Ordenação dos obstáculos segundo os respondentes.

Respondente	OB-1	OB-2	OB-3	OB-4	OB-5	OB-6	OB-7	OB-8
1	4	7	1	8	3	2	5	6
2	4	5	6	1	8	7	2	3
3	1	7	2	6	5	8	3	4
4	1	5	2	6	8	7	3	4
5	1	5	2	6	8	7	3	4
6	1	3	2	5	8	4	7	6
7	1	4	3	5	8	7	2	6
8	7	4	2	3	1	5	6	8
9	2	3	8	1	7	6	5	4
10	2	5	7	3	4	8	6	1
11	2	7	3	1	4	5	6	8
12	8	3	1	2	7	4	5	6
13	2	5	7	4	1	8	6	3
14	2	6	1	5	8	7	4	3
15	8	3	7	6	1	5	2	4
16	1	2	4	3	8	5	7	6
17	1	7	5	6	2	4	3	8
18	1	6	5	2	3	4	7	8
19	2	5	1	6	8	7	3	4
20	1	5	3	4	8	2	7	6
21	7	6	3	2	1	4	5	8
22	2	4	3	5	8	7	6	1
23	3	6	5	1	7	8	2	4
24	1	3	2	4	5	8	6	7
25	4	6	2	5	1	3	8	7
26	3	7	2	1	8	4	6	5
27	5	4	1	2	3	6	7	8
28	2	1	3	4	8	7	6	5
29	3	4	8	5	7	2	6	1
30	2	7	6	5	3	1	8	4

Tabela 2 - Ordenação dos obstáculos segundo os respondentes (Continuação).

Respondente	OB-1	OB-2	OB-3	OB-4	OB-5	OB-6	OB-7	OB-8
31	1	8	4	7	6	5	2	3
32	1	8	4	6	5	7	2	3
33	8	2	1	7	6	4	3	5
34	6	4	5	1	8	7	2	3
35	1	8	3	4	5	2	7	6
36	4	5	2	6	3	1	8	7
37	6	8	5	7	3	4	1	2
38	1	8	4	6	2	5	3	7
39	1	8	2	7	5	6	3	4
40	1	6	3	2	5	8	7	4
41	2	5	1	3	6	7	4	8
42	5	3	2	6	7	8	4	1
43	5	3	1	2	8	7	6	4
44	1	4	2	6	8	7	5	3
45	1	7	6	8	4	5	3	2
46	1	5	3	2	4	7	8	6
47	2	4	1	5	8	6	7	3
48	8	2	3	6	7	1	4	5
49	5	8	7	6	1	2	4	3
50	1	6	7	8	4	2	3	5
51	3	4	1	2	8	7	6	5
52	1	3	4	2	8	7	5	6
53	3	6	5	2	8	4	7	1
54	1	8	2	6	7	3	5	4
55	5	7	3	8	6	4	2	1
56	2	4	6	3	7	8	5	1
57	1	4	2	3	6	5	8	7
58	1	3	5	2	6	4	8	7
59	1	8	2	4	3	7	5	6
60	4	6	5	2	8	7	3	1
61	5	4	6	1	8	7	3	2
62	1	6	2	3	7	5	4	8
63	2	3	1	4	5	8	7	6
64	1	8	2	5	7	4	3	6
65	1	2	5	3	8	4	6	7
66	2	8	5	7	6	4	3	1
67	5	4	3	7	8	2	6	1
68	4	2	5	1	7	3	8	6

A Tabela 2 apresenta a ordenação dos obstáculos segundo a perspectiva de cada um dos respondentes. Agora faz-se necessária uma classificação geral, ou uma classificação equivalente.

O método de ordenação utilizado nesta pesquisa é aquele proposto por Faria Neto e Faria (2015), que é baseado nos métodos de agrupamentos não-hierárquicos.

Após a construção da Tabela 2, os obstáculos devem ser considerados objetos de um hiperespaço de tantas dimensões quantos foram os respondentes. Neste



estudo, os obstáculos possuem 68 dimensões, onde cada uma delas é a importância atribuída por um respondente.

Este método parte da premissa que haverá tantos postos de importância quantos forem o número de elementos a serem ordenados. Portanto, como há 8 obstáculos, deve haver 8 postos de importância, podendo ocorrer que nem todos sejam ocupados e ainda que haja alguns deles ocupados por mais de um obstáculo.

Cada posto é ocupado por um obstáculo fictício, isto é, um obstáculo para o qual todos os entrevistados, sem exceção, atribuiriam a mesma importância, a qual seria numericamente igual ao número do posto. Assim, o Posto 1 seria ocupado por um obstáculo fictício para qual todos os respondentes atribuiriam 1, o Posto 2 seria ocupado por outro que todos os respondentes classificariam como o segundo mais importante, e assim por diante até o último posto.

Os obstáculos fictícios nada mais são do que as sementes em torno dos quais serão formados os agrupamentos. Ou seja, os obstáculos se agruparão em torno do posto de importância de maior similaridade.

Existem diversas maneiras de se quantificar a similaridade de um obstáculo com um posto de importância. Uma delas é a distância entre eles. Assim quanto mais próximo um obstáculo estiver de um posto, maior será a sua pertinência a este posto. Desta forma, cada obstáculo será agrupado ao Posto mais próximo.

Dentre as diversas medidas de distância, destaca-se, por sua popularidade, a distância euclidiana, que pode ser determinada de acordo com

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (V_i^j - k)^2} \quad (1)$$

onde

$d_{jk}$  = distância do obstáculo  $j$  ( $j = 1, \dots, 8$ ) até o Posto  $k$  ( $k = 1, \dots, 8$ );

$V^j$  = obstáculo  $j$ ;

$k$  = posto de importância;

$m$  = número de respondentes.

Os resultados das distâncias entre todos os obstáculos e todos os postos de importância são resumidos em uma matriz denominada matriz de distâncias.

A Tabela 3 apresenta a matriz de distâncias para esta pesquisa. Nesta matriz pode-se ver a distância de cada um dos 8 obstáculos a todos os postos de importância.

Tabela 3 - Matriz de distâncias entre os obstáculos e os postos de importância.

	OB-1	OB-2	OB-3	OB-4	OB-5	OB-6	OB-7	OB-8
Posto 1	518	1399	689	1013	1885	1514	1290	1212
Posto 2	346	909	419	643	1311	1006	830	792
Posto 3	310	555	285	409	873	634	506	508
Posto 4	410	337	287	311	571	398	318	360
Posto 5	646	255	425	349	405	298	266	348
Posto 6	1018	309	699	523	375	334	350	472
Posto 7	1526	499	1109	833	481	506	570	732
Posto 8	2170	825	1655	1279	723	814	926	1128

As distâncias mais próximas entre os obstáculos e os postos encontram-se destacadas. Observa-se que houve a formação de grupos em torno dos postos 3, 4, 5 e 6. No posto 3 foram agrupados os obstáculos OB-1 (Estrutura mercadológica deficiente) e OB3 (Altos custos das tecnologias de armazenamento). Esses foram os obstáculos mais importantes segundo a opinião dos respondentes. O obstáculo OB-4 (Pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro) ocupou de forma isolada o quarto posto de importância. No quinto posto de importância foram agrupados os obstáculos OB-2 (Progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento), OB-6 (Baixa penetração de fontes alternativas de energia no sistema elétrico brasileiro), OB-7 (O sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia) e OB-8 (O sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia). O obstáculo OB-5 (Questões ambientais e geográficas), a exemplo do que ocorreu com OB-4 (Pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro), ocupou de forma exclusiva o posto 6. A Tabela 4 sintetiza a ordenação de todos os obstáculos.

Tabela 4 - Agrupamentos dos obstáculos em torno dos postos de importância

<b>POSTO</b>	<b>OBSTÁCULOS</b>
<b>Posto 1</b>	
<b>Posto 2</b>	
<b>Posto 3</b>	OB-1; OB-3
<b>Posto 4</b>	OB-4
<b>Posto 5</b>	OB-2; OB-6; OB-7; OB-8
<b>Posto 6</b>	OB-5
<b>Posto 7</b>	
<b>Posto 8</b>	

Observando-se a Tabela 4, pode-se ver a importância relativa dos obstáculos, mas também é possível avaliar a importância absoluta de cada obstáculo. Nenhum dos obstáculos se mostrou extremamente importante, segundo a perspectiva dos entrevistados, uma vez que o primeiro posto de importância a ser ocupado foi o terceiro. De forma análoga, nenhum dos obstáculos teve a sua importância negligenciada, já que o último posto a ser ocupado foi o de número 6.

Observa-se que OB-1 (estrutura mercadológica deficiente) e OB-3 (alto custo das tecnologias de armazenamento) são os obstáculos relativamente mais importantes e o OB-5 (questões ambientais e geográficas) o menos importante.

O obstáculo OB-4 (pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro) foi considerado o segundo obstáculo mais importante.

Os obstáculos OB-2 (progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento), OB-6 (baixa penetração de fontes alternativas de energia (solar e eólica) no sistema elétrico brasileiro), OB 7 (o sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia) e OB-8 (o sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia) foram considerados os penúltimos em importância.

No caso de postos que reúnam mais de um fator, deve-se considerá-los igualmente importantes. Para se determinar o mais importante dentre eles deve-se conduzir uma nova pesquisa dedicada somente a esses fatores.

## 5 CONCLUSÕES

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica, onde identificaram-se os obstáculos que dificultam a disseminação do armazenamento de energia em grande escala segundo especialistas norte-americanos. Posteriormente foi realizada uma pesquisa qualitativa junto a 47 grupos de pesquisa, três agências governamentais e dez empresas de serviços públicos, totalizando 150 questionários/entrevistas, com o objetivo de se identificar os principais obstáculos à disseminação do armazenamento no sistema elétrico brasileiro. Esta etapa da pesquisa revelou oito obstáculos: 1) Estrutura mercadológica deficiente; 2) Progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento; 3) Altos custos das tecnologias de armazenamento; 4) Pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro; 5) Questões ambientais e geográficas; 6) Baixa penetração de fontes alternativas de energia no sistema elétrico brasileiro; 7) O sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia; 8) O sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia. Dessa relação, os quatro primeiros obstáculos já haviam sido mencionados na literatura.

Após a pesquisa qualitativa, desejou-se classificar os obstáculos de acordo com a sua importância. Foi enviada para 150 entrevistados uma relação contendo os oito obstáculos identificados. Quarenta e cinco por cento dos respondentes retornaram o questionário.

Segundo os entrevistados os obstáculos mais importantes foram a estrutura mercadológica deficiente e os altos custos das tecnologias de armazenamento; em seguida foi classificado como mais importante o Pouco conhecimento das tecnologias de armazenamento e de seus benefícios, quando aplicadas ao sistema elétrico, por parte dos atores envolvidos com o sistema elétrico brasileiro; compartilharam a terceira posição de importância o Progresso técnico insuficiente das tecnologias de armazenamento, a Baixa penetração de fontes alternativas de energia no sistema elétrico brasileiro, O sentimento de que o investimento em pequenas centrais hidrelétricas é mais efetivo do que em armazenamento de energia e O sentimento de que o investimento no aumento da eficiência energética da geração, transmissão e

distribuição de energia elétrica, bem como dos equipamentos elétricos consumidores seja mais efetivo do que em armazenamento de energia; o obstáculo considerado menos importante por parte dos entrevistados foram as Questões ambientais e geográficas.

Esta pesquisa forneceu uma perspectiva da percepção do armazenamento de energia segundo o setor elétrico brasileiro. Pode-se perceber de forma subjacente que o desconhecimento do assunto por parte daqueles que terão que lidar com ele é um obstáculo importante para o desenvolvimento desta área no Brasil.

O conhecimento desses obstáculos é de fundamental importância para que se possam planejar estratégias para o desenvolvimento do tema no cenário nacional. Sendo assim, é possível afirmar que os objetivos desta pesquisa foram alcançados.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tem-se como sugestões para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Estudo e formação do preço da Energia Elétrica proveniente do Armazenamento de Energia;
- Planejamento de uma estratégia para a divulgação do tema junto aos operadores do sistema elétrico;
- Formação da estrutura de custos de centrais de armazenamento de energia empregando diversas tecnologias;
- Estudo comparativo dos custos de repotencialização de pequenas centrais hidrelétricas e centrais de armazenamento de energia;
- Impacto do armazenamento de energia nos indicadores de qualidade de energia;
- Efeito do armazenamento de energia na estabilidade dinâmica do sistema elétrico.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3<sup>a</sup> edição, Capítulo 3 - Energia Hidráulica, p. 53-54. Brasília: 2008.

AKHIL, A. **Energy Storage Requirements for On- and Off-grid Systems**. Energy Storage and Distributed Generation. Sandia National Laboratories. Albuquerque: 2006.

AZEVEDO, G. **Simulação de micro-redes de energia elétrica com geração fotovoltaica e armazenamento de energia**. Dissertação (Magister Scientiae em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: 2011.

BOOM, R. B.; PETERSON, H. A. **Superconductive energy storage for power systems**. IEEE Trans. Magn., vol. MAG-8, pp. 701-704, September 1972.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia Elétrica – Plano 2010**. Rio de Janeiro: 1987.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia – 2020**. Rio de Janeiro: 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia – Plano 2006-2015**. Rio de Janeiro: 2011.

DEAL, M.; CHURCHILL, S.; CHASET, L.; VILLARREAL, C. **Electric Energy Storage: An Assessment of Potential Barriers and Opportunities - Policy and Planning Division - Staff White Paper**. California Public Utilities Commission, p.10. California: 2010.

EFIPRE-EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO SUSTENTADA. **Armazenamento de Energia**. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - Universidade de Coimbra. Coimbra: 2006.

ELECTRICITY STORAGE ASSOCIATION. **Technologies**. 2009. Disponível em: <<http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>>. Acesso em: jul. 2016.

ELKIND, E. N. **The Power of Energy Storage How to Increase Deployment in California to Reduce Greenhouse Gas Emissions**. Berkeley Law. Berkeley: 2010.

ELKIND, E.; ABELE, A. R.; WASHOM, B.; INTRATOR, J.; WEISSMAN, S.; SAWCHUK, M.; BARTLETT, E.; DUNN, D. S.; TSAO, T. C.; BLAIK, R.; LIM, C.; LUONG, D.; SMITH, L.

**2020 Strategic Analysis of Energy Storage in California.**

Public Interest Energy Research (PIER) Program. Final Project Report. California: 2011.

EMAE-EMPRESA METROPOLITANA DE ÁGUAS E ENERGIA S.A. **Elevatórias.** Disponível em: <<http://emae.com.br/conteudo.asp?id=Elevat%C3%B3rias>> Acesso em: jul. 2016.

FARIA NETO, A.; FARIA, G. **Proposta de um método para ordenação de variáveis quanto à sua importância.** Revista Ciências Exatas, v. 21, n. 1, 2015

FAYET, G. **Analyzing the economic conditions of potential energy storage services in Europe.** Energy Storage Forum Europe 2012 Rome. Rome: 2012.

GANDARA, S. S. S.; NUNES, J. S.; GULLO, L. M. G. **Pedidos de Patente de Tecnologias de Conversão e Armazenamento Eletroquímico de Energia Usando Nanotecnologia (Pedidos publicados entre 2001 e 2010).** Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI/DICOD/CEDIN/CEPRO. Rio de Janeiro: 2012.

GYUK, I. P. **Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications.** EPRI Report 1001834, December 2003.

JUNG, J. **Armazenamento de energia em smart grids.** Projeto de diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2010.

KAMATH, H. **Energy Storage Technology Overview.** EPRI PEAC, January 2014.

KINTNER-MEYER, M.; EMERY, A. F. **Optimal Control of an HVAC System using Cold Storage and Building Thermal Capacitance.** Energy and Buildings, vol 23, pp. 19-31, 1995.

MACEDO, I. C. **Estado da arte e tendências tecnológicas para energia.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) – Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: 2003.

MATT, P. **Pumped Storage: old fashioned technology or one of the turn keys for the future.** Energy Storage Forum Europe 2012 Rome. Rome: 2012.

MCDOWALL, J. **Conventional battery technologies-Present and future.** IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 3, pp. 1538-1540, July 2000.



NEXIGHT GROUP. **Electric Power Industry Needs for Grid-Scale Storage Applications**. Report Organized by Sandia National Laboratories, December 2010.

OLIVEIRA FILHO, O. D. Q.; ARAÚJO, A. M.; MEDEIROS, A. L. R.; ROHATGI, J. S.; ASIBOR, A. I.; SILVA, H. P. **A Preliminary Approach of the Technical Feasibility of Offshore Wind Projects along the Brazilian Coast**. IEEE Latin America Transactions, vol. 11, no 2, pp. 706-712, March 2013.

PESSANHA, J. F. M.; LEON N. **Long-term forecasting of household and residential electric customers in Brazil**. IEEE Latin America Transactions, vol. 10, no 2, pp. 1537-1543, March 2012.

PRICE, H. **Advances in Parabolic Trough Power Technology**. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 124, pp.109-125, 2002.

RASTLER, D. **Electricity Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits**. EPRI, White Paper 1020676. Palo Alto: December 2010.

ROBERTS, B. **Capturing grid power**. IEEE Power and Energy Mag., vol 7, no.4, pp.32-41, July-Aug. 2009.

SILVA, S. B.; OLIVEIRA, M. A. G.; SEVERINO, M. M. **Sizing and Optimization Photovoltaic, Fuel Cell and Battery Hybrid System**. IEEE Latin America Transactions, vol. 9, no 1, pp. 83-88, March 2011.

SOUSA, T.; TAHAN C. M. V.; JARDINI, J. A.; ROSA, J. A. O.; FELTRIN, A. P.; MANSO, J. C. G. **A New Approach to Remuneration of Ancillary Services Provided by Generation Agents in Brazil**. IEEE Latin America Transactions, vol. 9, no 1, pp. 38-44, March 2011.

TELEKE, S.; BARAN, M. E.; HUANG, A. Q.; BHATTACHARYA, S.; ANDERSON, L. **Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching**. IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 24, n0 3, pp. 725-732, September 2009.

TELEKE; S. **Energy Storage Overview: Applications, Technologies and Economical Evaluation**. Quanta Technology, pp. 1-11, 2011.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BRANDAO, R. **Energia solar no brasil só será mais barata em 5 anos.** Petronotícias. Disponível em: <[www.petronoticias.com.br/archives/5398](http://www.petronoticias.com.br/archives/5398)>. Acesso em: jul. 2016.

FASTELLI, I. **Enel research on storage: Technology assessment and case study.** Engineering and Research Division. Energy Storage Forum Europe 2012 Rome. Rome: 2012.

FREITAS, K. **Armazenamento de energias renováveis em pauta.** Brasil Alemanha News. São Paulo: 2010. Disponível em: <[www.brasilalemanhanews.com.br/Noticia.aspx?id=902](http://www.brasilalemanhanews.com.br/Noticia.aspx?id=902)>. Acesso em: jul. 2016.

GARCIA, F. S. **Sistema híbrido de armazenamento de energia para veículos elétricos.** Campinas: 2011. Disponível em: <[www.bv.fapesp.br/pt/bolsas/117094/sistema-hibrido-de-armazenamento-de-energia-para-veiculos-eletricos/](http://www.bv.fapesp.br/pt/bolsas/117094/sistema-hibrido-de-armazenamento-de-energia-para-veiculos-eletricos/)>. Acesso em: jul. 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage.** Geneva: 2012.

JULIAO, A. **Energia limpa sob nossos pés.** ISTOÉ Tecnologia & Meio ambiente. Disponível em: <[www.istoe.com.br/reportagens/73214\\_ENERGIA+LIMPA+SOB+NOSSOS+PES](http://www.istoe.com.br/reportagens/73214_ENERGIA+LIMPA+SOB+NOSSOS+PES)>. Acesso em: jul. 2016.

LASSETER, R.; AKHIL, A.; MARNAY, C.; STEVENS, J.; DAGLE, J.; GUTTROMSON, R.; MELIOPOULOUS, A. S.; YINGER, R.; ETO, J. **White paper on integration of distributed energy resources: The CERTS Microgrid concept.** Berkeley Lab Report LBNL-50829 – University of California. Berkeley: 2002, 46p.

LASSETER, R.; PIAGI, P. **Extended microgrid using (DER) Distributed Energy Resources.** IEEE PES Power Engineering Society General Meeting 2007. Florida: 2007.

LIANG, C. **A bateria do futuro.** GE Reports Brasil. 2013. Disponível em: <[brazil.geblogs.com/a-bateria-do-futuro/](http://brazil.geblogs.com/a-bateria-do-futuro/)>. Acesso em: jul. 2016.

LIN, J.; DAMATO, G.; HAND, P. **Energy Storage - a Cheaper, Faster, & Cleaner Alternative to Conventional Frequency Regulation.** California Energy Storage Alliance. Berkeley: 2011.

MITRA, J.; SIGNH, C. **Reliability of Sustainable Energy Systems.** College of Engineering. Michigan State University. Michigan: 2009.

PASOLINI, A. **Empresa americana desenvolve tecnologia revolucionária de armazenamento de energia.** Energia Positiva. 2012. Disponível em: <[www.energiapositiva.info/2012/03/empresa-america-desenvolve-tecnologia.html](http://www.energiapositiva.info/2012/03/empresa-america-desenvolve-tecnologia.html)>. Acesso em: jul. 2016.

PIZZO, F. D.; TORTORA, A. C. **Energy Storage Systems - Value and Innovation in the Management of High Voltage Transmission Grid.** Terna Plus Energy Venture, 2012.

REDDALL, B.; GROOM, N. **Califórnia quer "engarrifar luz do sol" em iniciativa de armazenar energia.** Brasil Solair. Rio de Janeiro: 2013. Disponível em: <[www.brasilsolair.com.br/noticias/california-quer-engarrifar-luz-do-sol-em-iniciativa-de-armazenar-energia](http://www.brasilsolair.com.br/noticias/california-quer-engarrifar-luz-do-sol-em-iniciativa-de-armazenar-energia)>. Acesso em: jul. 2016.

REPRESENTAÇÕES DA REPÚBLICA FEDERAL DA ALEMANHA NO BRASIL. **Energia: Armazenagem de eletricidade na mina.** Embaixada e Consulados Gerais da Alemanha no Brasil. 2013. Disponível em: <[www.brasil.diplo.de/Vertretung/brasilien/pt/\\_\\_pr/Nachrichten\\_20Archiv/01.08.13\\_20Energia\\_20renov\\_C3\\_A1vel.html](http://www.brasil.diplo.de/Vertretung/brasilien/pt/__pr/Nachrichten_20Archiv/01.08.13_20Energia_20renov_C3_A1vel.html)>. Acesso em: jul. 2016.

RIBEIRO, E. **Eletrobras: armazenamento é empecilho para energia eólica.** Brasil Econômico. Rio de Janeiro: 2012. Disponível em: <[brasileconomico.ig.com.br/noticias/nprint/118089.html](http://brasileconomico.ig.com.br/noticias/nprint/118089.html)>. Acesso em: jul. 2016.

SANTOS, M. M.; JANNUZZI, G. M.; MACEDO, I. C. **Prospecção Tecnológica Energia.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) – Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: 2005.

SHWARTZ, M. **Cientistas de Stanford calculam a energia necessária para armazenar energia eólica e solar na rede.** Science Blogs – Ciência, Cultura, Política. Disponível em: <[scienceblogs.com.br/chivononpo/2013/09/armazenar-energia-verde-compensa/](http://scienceblogs.com.br/chivononpo/2013/09/armazenar-energia-verde-compensa/)>. Acesso em: jul. 2016.

SHWARTZ, M. **Stanford scientists calculate the carbon footprint of grid-scale battery Technologies.** Stanford News. Disponível em: <<http://news.stanford.edu/news/2013/march/store-electric-grid-030513.html>>. Acesso em: jul. 2016.

STEITZ, C. **Novo dispositivo para armazenar energia solar pode reduzir contas de luz.** Espaço Reuters. Instituto Carbono Brasil. Disponível em: <[www.institutocarbonobrasil.org.br/espaco\\_reuters/noticia=734392](http://www.institutocarbonobrasil.org.br/espaco_reuters/noticia=734392)>. Acesso em: jul. 2016.

SUGIMOTO, L. **Pesquisa analisa sistema híbrido de energia elétrica - Tese da FEM determina quantidade gerada e compara tipos de armazenamento.** Jornal da UNICAMP. Campinas: 2013. Disponível em: <[www.unicamp.br/unicamp/ju/576/pesquisa-analisa-sistema-hibrido-de-energia-eletrica](http://www.unicamp.br/unicamp/ju/576/pesquisa-analisa-sistema-hibrido-de-energia-eletrica)>. Acesso em: jul. 2016.

SULLIVAN, P.; SHORT, W.; BLAIR, N. **Modeling the Benefits of Storage Technologies to Wind Power**. Presented at the American Wind Energy Association (AWEA) Wind Power 2008 Conference. Golden: 2008.

SUSTENTABILIDADE DIGITAL. **Bélgica planeja ilha para armazenamento de energia eólica**. 2013. Disponível em: <[sustentabilidadedigital.com.br/noticias.php?NOT\\_id=732](http://sustentabilidadedigital.com.br/noticias.php?NOT_id=732)>. Acesso em: jul. 2016.

THE USGS WATER SCIENCE SCHOOL. **Hydroelectric power: How it works**. Washington: 2016. Disponível em: <[ga.water.usgs.gov/edu/hyhowworks.html](http://ga.water.usgs.gov/edu/hyhowworks.html)>. Acesso em: jul. 2016.

WILLS, R. G. A. **Challenges for flow battery scale-up**. Energy Storage Forum Europe 2012 Rome. Rome: 2012.