



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

RICARDO ANTÔNIO DE OLIVEIRA SOUSA JÚNIOR

**TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADA À GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA DE ENERGIA: ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS DE
APLICAÇÃO**

FORTALEZA

2017

RICARDO ANTÔNIO DE OLIVEIRA SOUSA JÚNIOR

**TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADA À GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA DE ENERGIA: ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS DE
APLICAÇÃO**

Monografia Apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. MSc. Carlos Gustavo Castelo Branco

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S698t Sousa Júnior, Ricardo.

Tecnologias de armazenamento de energia aplicada à geração distribuída de energia: estado da arte e perspectivas de aplicação / Ricardo Sousa Júnior. – 2017.
62 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Me. Carlos Gustavo Castelo Branco.

1. Armazenamento de Energia. 2. Energias Renováveis. 3. Geração Distribuída. I. Título.

CDD 621.3

RICARDO ANTÔNIO DE OLIVEIRA SOUSA JÚNIOR

**TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADA À GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA DE ENERGIA: ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS DE
APLICAÇÃO**

Monografia Apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M. Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Arthur Nunes Ferreira Costa
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Dedico esse trabalho a Deus,
À minha mãe, Rita Cristiane (*in memoriam*),
Ao meu pai, Ricardo Antônio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida e pelas bênçãos diárias.

Ao meu pai, Ricardo Antônio, por ser exemplo e base da minha vida, e por ter me incentivado e estimulado a estudar.

À minha irmã, Renata Moura, e minha madrasta, Regina Maria, pelo apoio diário.

Ao meu Orientador, Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco por ter ministrado excelentes aulas e pela disponibilidade e atenção durante esse trabalho de conclusão de curso.

Aos colegas de curso pela amizade e apoio durante a minha graduação e, em especial, durante o período final de semestre.

Aos meus grandes amigos, Arthur Nunes e Victor Ferreira, pela amizade.

A todos os colegas de trabalho da AmBev, em especial a Jaqueline Viana e o Lucas Aderito, que me ajudam e apoiam diariamente seja por ações, ou por uma simples conversa. Também, agradeço a Marta Lins e o Eduardo Prestes pela força e compreensão durante a minha graduação, e pelos desafios diários que me são propostos no intuito de promover o meu crescimento.

Aos meus amigos de intercâmbio: Dênio Silva, José Luís, Lucas Penha, Tomás Dahas e Victor Lorhan.

À Capes pelo financiamento do meu intercâmbio acadêmico para a Alemanha pelo Programa Unibral. As experiências adquiridas durante esse período me proporcionaram crescimento acadêmico, cultural e profissional inestimável.

À Universidade Federal do Ceará, por todas as oportunidades que me foram ofertadas e que me ajudaram a crescer.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para essa conquista, meu sincero agradecimento.

“Toda ação humana, quer se torne positiva ou negativa, precisa depender de motivação.”
(Dalai Lama)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a apresentação do atual estado da arte das tecnologias de armazenamento de energia e de sua futura perspectiva de aplicação na matriz energética brasileira. O estudo da viabilidade prática e financeira é realizado por meio de dois estudos de casos, o primeiro é um projeto americano de armazenamento em um sistema altamente integrada à rede de geração distribuída, e o segundo caso é um projeto de P&D da Aneel para a construção de uma Usina Hidrelétrica Reversível (UHR) na Serra do Mar, em São Paulo. Para isso, esse trabalho primeiramente apresenta o atual cenário da geração fotovoltaica e eólica de energia e o seu potencial de crescimento no Brasil, em especial na região do Nordeste. É analisado também os atuais desafios da intermitência desse tipo de fonte de geração, identificando, assim, o investimento em tecnologias de armazenamento de energia como solução para esse problema intrínseco a geração eólica e a fotovoltaica. Em seguida, é discorrido sobre as características dessa tecnologia de armazenamento. Nessa parte, as vantagens e as desvantagens das diferentes tecnologias são apresentadas, com destaque para a aplicação das baterias de níquel, das baterias fluxo-redox e das UHR em projetos. Esses elementos de armazenamento são importantes para a automação da rede, e o desenvolvimento de *smart grids* no Brasil. Por fim, é analisado como seria a aplicação de tal método de armazenamento no Sistema Integrado Nacional, por meio da instalação de usinas de *backups* na proximidade de parques eólicos e de linhas de transmissão.

Palavras-chave: Armazenamento de Energia. Geração Distribuída. Energias Renováveis. Eficiência Energética.

ABSTRACT

The objective of this work is to present the current state of the art of energy storage technologies and their future perspective of application in the Brazilian energy matrix. The study of practical and financial feasibility will be carried out through two case studies, the first case being a US storage project in a highly integrated distributed grid system, the other case being an Aneel R&D project for the building of a pumped hydroelectric energy storage (PHES) in the Serra do Mar, in São Paulo. For this, this work first presents the current state of photovoltaic and wind power generation and its potential for growth in Brazil, in particular in the Northeast region. It also analyzes the current challenges of the intermittence of this type of generation source, thus identifying the investment in energy storage technologies as a solution to this problem of wind and photovoltaic generation. It then discusses the characteristics of storage technologies. In this part, the advantages and disadvantages of the different technologies will be presented, with emphasis on the application of nickel batteries, flux-redox batteries and PHES in projects. These storage elements are important for network automation, and the development of smart grids in Brazil. Finally, the application of such a method of storage in the National Integrated System is analyzed, through the installation of backup plants in the vicinity of wind farms and transmission lines.

Keywords: Energy Storage. Distributed generation. Renewable energy. Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Fábrica de Locomotiva de Richard Hatmann, 1868.....	15
Figura 2	- Fluxo de expansão da energia recebida pelo subsistema Nordeste (MW)	24
Figura 3	– Fluxo de expansão da energia fornecida pelo subsistema Nordeste (MW).....	24
Figura 4	– Estrutura de um capacitor.....	28
Figura 5	– Densidade de Energia <i>versus</i> Densidade de Potência para diferentes meios de armazenamento de energia.....	29
Figura 6	– Estrutura da Bateria de Chumbo.....	32
Figura 7	– Compostos formados a partir do Lítio (ponto vermelho)	33
Figura 8	– Modelo de sistema de dados energético baseado em IoT.....	36
Figura 9	– Modelo de bateria de Fluxo-Redox de Vanádio	37
Figura 10	– Modelo de Sistema Smart Grid.....	42
Figura 11	– Esquema do sistema de Smart Grid com a aplicação de armazenamento de energia	46
Figura 12	– Distribuição da capacidade de armazenamento global.....	47
Figura 13	– Mapa do potencial de geração eólica no Nordeste.....	48
Figura 14	– Representação do estudo de Caso (UHR).....	51
Figura 15	– Modelo proposto de integração entre eólica e UH.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Representação dos Índices de Irradiação para Diferentes Graus de Latitude	19
Gráfico 2 – Evolução da Capacidade Instalada (MW).....	20
Gráfico 3 – Percentual de Perdas de Energia em Relação à Energia Injetada na Rede pelas Concessionárias de Distribuição	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características dos principais tipos de armazenadores de energia.	27
Tabela 2 – UHR construídas no Brasil.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAG	Controle Automático de Geração
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
Celpe	Companhia Energética de Pernambuco
Chesf	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
LTS	<i>Low Temperature Superconduct</i>
HTS	<i>High TemperatureSuperconduct</i>
SIAP	Sistema Inteligente para Mudança Automática de Ajuste do Sistema de Proteção
SRA	Sistema de Reposição Automática
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
UHR	Usina Hidroelétrica Reversível

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_0	Irradiação solar disponível em uma dada latitude
C	Capacitância (F)
ϵ	Constante de permissividade do Meio (F/m)
D	Comprimento do dielétrico de um capacitor (m)
A	Área de superfície de um capacitor (m^2)
V	Volume de um reservatório de água (m^3)
ρ	Densidade do meio (Kg/m^3)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivo Geral.....	14
1.3	Objetivo Específico	14
1.4	Motivação.....	15
1.5	Estrutura do Trabalho.....	16
2	Energias Renováveis.....	17
2.1	Cenário Atual.....	17
2.2	Energia Solar.....	17
2.3	Energia Eólica.....	19
2.4	Sistemas Híbridos (Eólico-Solar)	20
2.5	Energias Renováveis no Nordeste (Eólico-Solar).....	22
3	Armazenamento de Energia.....	25
3.1	Geração Distribuída.....	25
3.2	Tecnologia de Armazenamento de Energia.....	25
3.2.1	Conceito de Armazenamento de Energia	25
3.2.2	Classificação dos Tipos de Armazenamento de Energia.....	26
3.2.2.1	Número de Carregamento	26
3.2.2.2	Forma Física de Armazenamento	26
3.2.2.3	Classificação Temporal	26
3.3	Tipos de Armazenamento de Energia.....	27
3.3.1	Armazenamento Elétrico (Supercapacitores)	27
3.3.2	Armazenamento Elétrico (Supercondutores)	30
3.3.3	Armazenamento Químico (Baterias de Chumbo)	30
3.3.4	Armazenamento Químico (Bateria de Níquel-Cádmio)	32
3.3.5	Armazenamento Químico (Bateria de Lítio)	33
3.3.6	Armazenamento Químico (Baterias Fluxo-Redox)	36
3.3.7	Usina Hidrelétrica Reversível (UHR)	38
3.3.8	Usina de Armazenamento de Ar Comprimido.....	40

4	Aplicações para o Sistema de Armazenamento de Energia.....	42
4.1	Sistemas de Distribuição com <i>Smart Grid</i>.....	42
4.2	Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)	46
5	Aplicações de Armazenamento de Energia no Subsistema do Nordeste do SIN..	50
5.1	Aplicação de baterias de íon lítio em parques eólicos.....	50
5.2	Aplicação de UHR para o armazenamento de energia eólica.....	52
5.3	Aplicação de Smart Grid para projetos de armazenamento de energia.....	53
6	Conclusão.....	55
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	52
	Referências.....	57

1.INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um bem indispensável no nosso cotidiano, esse insumo está presente em praticamente todas as atividades humanas. É difícil fechar os olhos e visualizar a vida sem a eletricidade. Com o desenvolvimento de novas tecnologias e de novos hábitos, foi aumentado o consumo desse recurso pelas pessoas, o que resultou na necessidade de criação de instalações mais seguras e robustas para atender esse aumento na demanda.

No entanto, devido a problemas ambientais e de escassez, criou-se a necessidade, nos últimos anos, do desenvolvimento de outras fontes de energia diferentes das oriundas de combustíveis fósseis (carvão e petróleo), da fissão do núcleo de átomos e da energia potencial hidráulica no Brasil e no mundo. A partir desse desafio, foi realizado o estudo e desenvolvimento de diferentes tecnologias em diversos países que tinham como premissa o desenvolvimento sustentável da sociedade.

As fontes de geração de energia a partir de fontes solar e eólica foram as formas de geração que mais obtiveram sucesso tomando como base essa proposta. No ano de 2016, por exemplo, houve um aumento de 10% da capacidade instalada das energias renováveis no mundo, o que representou 161 GW de potencial. Esse valor representou 17% do potencial global de geração. (Carrington, 2016).

No que se refere ao Brasil, nos últimos anos, houve um grande crescimento das energias renováveis impulsionados pelos subsídios do governo em instalações e em canais de transmissão e de distribuição, pela redução dos custos dos equipamentos das instalações e pelas condições geográficas favoráveis. Atualmente, 4% da matriz energética brasileira é representada pelo consumo de energias renováveis.

Com a alteração do cenário de geração energética, houve uma modificação do esquema de geração e de distribuição de energia no país. Houve a alteração do quadro clássico de geração centralizada de energia, para um modelo dinâmico que é caracterizado por diferentes fluxos de energia. Segundo o ex-Ministro de Minas e Energia, Carlos Alexandre, os principais desafios para essa fonte são econômicos e operacionais. “Nosso operador Nacional de Sistema precisa, a cada instante, balancear o quanto é demandado de energia e o quanto é despachado” (Sinimbu, 2017). O não controle operacional dessas fontes pode resultar em graves problemas para o sistema de fornecimento de energia, como falta ou sobrecarga no abastecimento.

O desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia foi realizado com o intuito de garantir a autonomia e a estabilidade ao sistema elétrico. Quanto mais diversificada a matriz energética de um sistema, mais complexa é a malha de controle. Sendo, portanto,

necessários aparelhos de medição *online* em diversos pontos, além de equipamentos de manobras que atuem de acordo com a necessidade.

A fim de melhorar a qualidade de energia de fornecimento, diversos países investem e exigem das concessionárias a construção de usinas de armazenamento de energia. Dessa forma, as instalações de tais estruturas deverão potencializar a geração de energia das fontes a partir de uma fonte sustentável de fornecimento.

1.1 Justificativa

Devido ao crescente aumento na instalação de equipamentos mais sofisticados nas instalações industriais e prediais, criou-se uma dependência em relação à qualidade de energia do serviço elétrico fornecido à instalação. Esses dispositivos estão sujeitos a problemas que podem resultar em avarias a equipamentos da instalação, ou até mesmo interrupção do fornecimento de energia elétrica da instalação. No sistema elétrico atual, também, ocorrem flutuações de energia que afetam a confiabilidade nas linhas de transmissão e de distribuição de energia. Os sistemas de armazenamento de energia são uma alternativa para esse problema, resultando em uma melhor transmissão e distribuição de energia ao sistema.

Este trabalho tem como justificativa o estudo dessas tecnologias de armazenamento de energia em redes que apresentam considerado porte de geração de energia no Brasil. Apesar da tímida presença no setor energético, a implantação dessa técnica se torna necessária devido ao crescente avanço no aumento da geração elétrica descentralizada no país.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o estado das atuais tecnologias de armazenamento de energia, mostrando suas propriedades, seus benefícios, assim como os desafios da implementação de tais projetos no Brasil.

1.3 Objetivo Específico

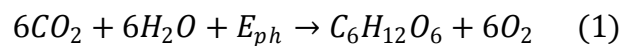
Dentre os objetivos específicos deste trabalho, estão:

- ✚ Revisão bibliográfica sobre a aplicação da tecnologia de armazenamento de energia – Identificando vantagens, características dessas tecnologias ao setor elétrico.
- ✚ Verificar o estado atual das instalações de geração distribuída de energia no sistema elétrico brasileiro.

- ✚ Desenvolver um estudo relacionando as tecnologias de armazenamento de energia aos sistemas de geração distribuída de energia discorrendo sobre os benefícios à qualidade e à eficiência do sistema de energia.

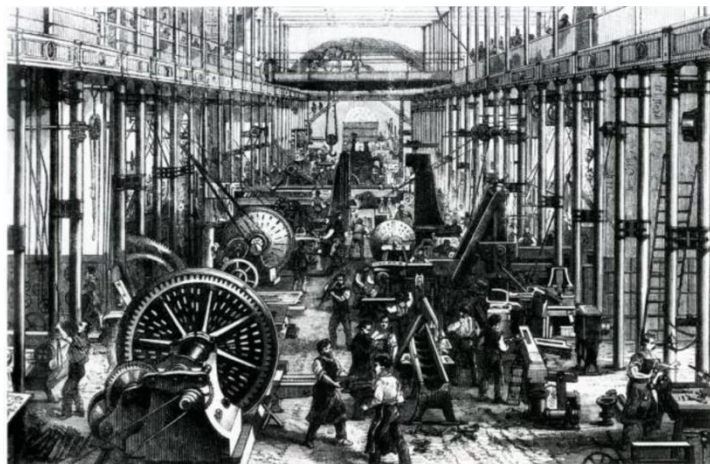
1.4 Motivação

Desde o princípio da Humanidade utilizamos armazenamento de energia, sendo a fotossíntese a primeira forma de armazenamento já registrada. Ao longo desse processo, a energia solar é transformada em compostos orgânicos (glicose) que armazenam energia. A equação química 1 representa o processo de armazenamento de energia, no qual a água mais gás carbônico se combinam na presença de luz (energia de ativação do processo) em oxigênio e glicose. (Sterner; Stadler, 2014).



Antes da I Revolução Industrial (séc. XVIII), eram utilizadas apenas fontes renováveis de energia, o combustível mais importante nessa época era a biomassa (madeira), o qual era utilizada como fonte de calor para cozinhar e para aquecer ambientes. Além disso, outras fontes de energia, como a eólica e a hídrica, foram sendo desenvolvidas para a realização de trabalhos mecânicos. Essas formas de energias são indiretamente oriundas de Energia Solar.

Figura 1 – Fábrica de Locomotiva de Richard Hatmann, Alemanha, 1868.



Fonte: Leão, 2017.

Apenas após a I Revolução Industrial, foram utilizadas energias fósseis no setor industrial. Essa mudança foi motivada pelo aumento na demanda de energia na indústria. Inicialmente, o carvão foi utilizado devido à sua grande disponibilidade e a sua fácil extração a partir de jazidas. Nessa época, o carvão era utilizado apenas para gerar energia para as máquinas e para as locomotivas, um exemplo dessa aplicação é mostrado na Figura 1. Cerca de 40% da

energia consumida atualmente no mundo é originada a partir do carvão, o qual é queimado em usinas termoeletricas para a geração de energia.

Ao longo dos tempos, outras fontes de combustíveis fósseis, caso do petróleo e do gás natural, foram sendo utilizadas na operação industrial devido à crescente demanda energética nos países em desenvolvimento industrial. Esses combustíveis são formados durante milhões de anos por processos bioquímicos e geológicos.

Em contraste a sua formação, esses combustíveis fósseis são consumidos em um período de tempo bem mais curto, cerca de segundos, e a utilização desses combustíveis é acompanhada pela exploração e pela poluição do ambiente. Resultando, assim, em efeitos negativos ao microclima da região, à qualidade da água, ao solo e às espécies da região de exploração.

Devido a esse fato, outras fontes de geração e de armazenamento estão em desenvolvimento. As principais fontes são a energia eólica e a solar. Substituir energias oriundas de combustíveis fósseis por renováveis e por tecnologias de energia livres de emissão de CO_2 , para restringir a emissão dos gases do efeito estufa, é o objetivo das atuais políticas climáticas. Não falta potencial para as energias renováveis, o desafio atual é compensar as fontes de energia que são dependentes das condições climáticas e da não garantia temporal e espacial da segurança de fornecimento.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, organizado conforme indicado a seguir. O capítulo 1 representa a introdução ao tema, justificando a relevância do assunto no atual cenário de geração de energia.

O capítulo 2 descreve o cenário da matriz energética no país, destacando o papel das fontes renováveis na geração de energia, assim como descreve suas perspectivas para o futuro.

No capítulo 3, há a apresentação do estudo das tecnologias de armazenamento de energia, sendo comentado sobre o seu conceito, suas segmentações, seu potencial, assim como sua importância no atual mercado de energia.

No capítulo 4 é apresentado diferentes aplicações práticas dessa tecnologia de armazenamento, assim como as conclusões obtidas e análises de aplicação no atual cenário brasileiro.

Por fim, no capítulo 5 é realizada uma proposta de um modelo de armazenamento de energia no país, sendo realizadas análises de seu potencial, de suas especificações e de seus desafios.

2. Energias Renováveis

2.1. Cenário Atual

O uso da geração fotovoltaica e da eólica nas residências e nas indústrias visa reduzir a emissão de poluentes na atmosfera, visto que são processos que não necessitam de combustão para a geração da energia elétrica. Além desse efeito positivo, a energia renovável apresenta os seguintes benefícios: recurso inesgotável, desenvolvimento econômico local, transferência de tecnologia, criação de empregos, e a criação de mercados descentralizados.

Apesar dos altos custos para a implementação, cerca de R\$ 3.350/KW instalado para geração eólica (Eberspacher, 2012), por exemplo, o custo com a instalação de projetos de energias renováveis vem diminuindo anualmente com o incentivo às energias renováveis, a redução dos custos dos equipamentos para esse tipo de geração, e a oferta de financiamentos pelo governo. No Brasil, visando regulamentar o desenvolvimento das energias renováveis, a Resolução Normativa da Aneel nº482, de 17 de abril de 2012, regulamentou a geração de energia em troca de créditos em KWh na conta de energia elétrica residencial e comercial, o que impulsionou esse setor. (Leoni; Carvalho; Abreu, 2017).

De acordo com a recente atualização do Plano Decenal de Expansão de Energia, o valor médio de crescimento de carga instalada no país será de 3,8% ao ano, representando 2900 MW médio ao ano até o ano de 2024. As fontes de energias renováveis apresentam um grande potencial para atender essa demanda de energia, representando, juntas, um valor de 20% da participação nesse crescimento durante esse período. (Leoni; Carvalho; Abreu, 2017).

2.2. Energia Solar

O aproveitamento da energia solar não é uma atividade recente, no entanto, o aproveitamento da energia fotovoltaica só foi possível devido ao desenvolvimento dos semicondutores na década de 50. A geração fotovoltaica, atualmente, é uma das fontes de energia mais promissoras para a produção de energia elétrica devido a sua facilidade de implementação em projetos e a facilidade de manutenção de seus módulos. (Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017).

Em geral, um sistema solar fotovoltaico é composto de painéis fotovoltaicos (módulos), controladores de carga, inversor CC/CA e bancos de baterias para os casos de armazenamento. Os painéis fotovoltaicos podem ser de silício cristalino ou de filmes finos (silício amorfo, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre-índio-gálio).

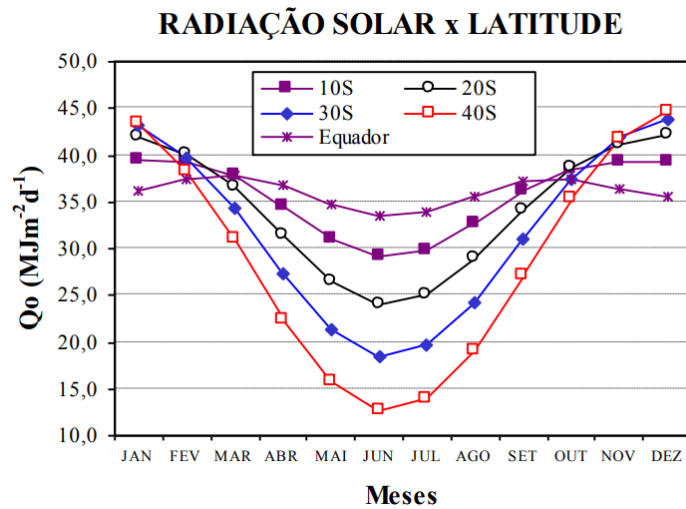
O potencial para geração fotovoltaica é alto no Brasil. No ano de 2017, esse setor deverá movimentar R\$ 4,5 bilhões, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), o que representará o atingimento da marca de 1 GW de geração. A concentração desses investimentos se encontra, em especial, em toda a região Nordeste do país. Segundo o estudo de Tolmasquim (2016), a irradiação solar na região nordeste é praticamente constante ao longo do ano, o que resulta em condições propícias para a utilização desse tipo de energia. (Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017). Por exemplo, a incidência média diária nessa região varia de 4,5 a 6 kWh, em contrapartida, na Europa, esse valor varia de 1 a 2 kWh. (Fontes, 2017).

No Gráfico 1, há a representação dessa característica intrínseca a essa região do país, que a caracteriza como grande polo de geração energética. Q_0 representa a irradiação solar disponível em uma dada latitude. Nessa figura, cada curva representa a característica de irradiação para latitudes diferentes.

No ano de 2016, com o investimento do Banco do Nordeste em instalações, houve um aumento no crescimento desse setor no Brasil, sendo uma das únicas áreas do setor de engenharia que não apresentaram resultados negativos durante a crise econômica. O público alvo dessa linha de financiamento, FNE SOL, é destinada a implantação de projetos de micro e minigeração de energia em empresas, produtores rurais cooperativas e associações legalmente constituídas.

No que se refere a grandes projetos de instalação, atualmente, existem quatro grandes projetos de usinas solares no Nordeste, três na Bahia e um no Piauí. Cada projeto tem, em média, uma capacidade de 200 MW. No caso do projeto do Piauí, há a construção do maior parque solar da América Latina com capacidade instalada de 292 MW, capaz de atender as necessidades de cerca de 300.000 famílias. Esse empreendimento, Parque Solas Nova Olinda, foi construído na cidade de Ribeira do Piauí por meio da subsidiária brasileira do grupo italiano Enel S.p.a. (Fontes, 2017).

Gráfico 1 – Representação dos índices de irradiação para diferentes graus de latitude.



Fonte: Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017.

2.3. Energia Eólica

Em relação ao Setor Eólico, no ano de 2016, foram adicionados mais de 2 GW de energia à matriz elétrica brasileira distribuídos em 81 novos parques. Nesse ano, 52 milhões de pessoas receberam energia elétrica gerada pelos ventos. Assim, no ano de 2017, essa fonte representou 8,0 % da matriz elétrica do país. (Leoni; Carvalho; Abreu; Barbosa, 2017)

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a geração de eólica apresentou, no ano de 2016, um crescimento de 55% em relação a 2015. O Gráfico 2 representa bem a alta do crescimento dessa fonte de geração nos últimos anos no Brasil. (Leoni; Carvalho; Abreu; Barbosa, 2017)

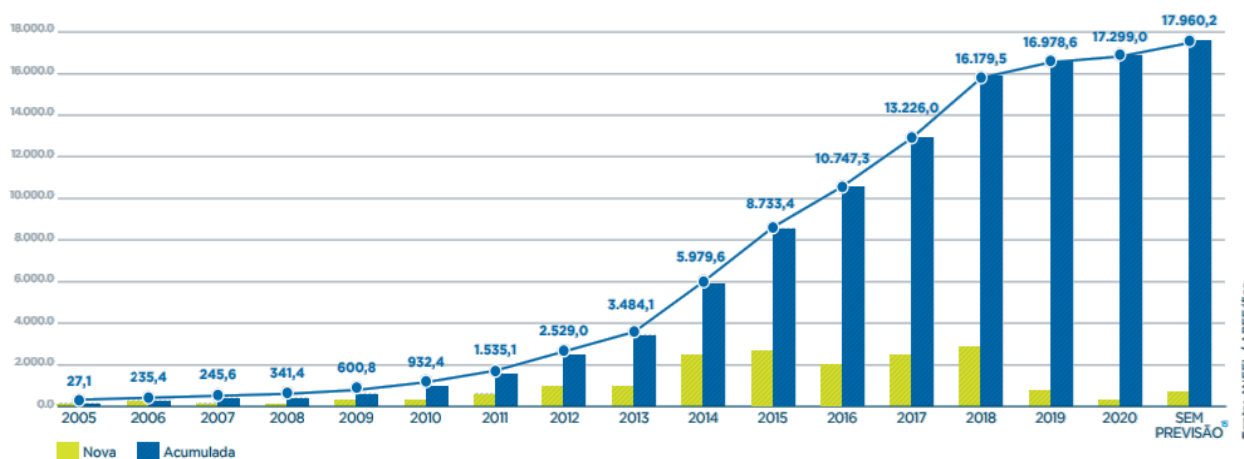
No ano de 2017, a geração eólica representou um importante papel para a geração energética no país, principalmente no início do ano, num momento em que os reservatórios de água estiveram com níveis bem baixos, especialmente no Nordeste, onde a eólica tem chegado a atender mais de 60% da carga em alguns dias.

Em relação à eficiência, o aproveitamento dos ventos no Brasil para a aplicação de geração elétrica vem se mostrando eficiente. Apresentando um aproveitamento do vento (relação entre o GWh gerado e a potência instalada ao longo de um ano) de 40,7%. Em picos instantâneos, o fator de capacidade dos parques eólicos atingiu valores superiores a 70%. (Leoni; Carvalho; Abreu; Barbosa, 2017).

Já em relação ao custo-benefício, a eólica representa a segunda fonte mais barata. A primeira é a energia das grandes hidrelétricas. Como o investimento nesse tipo de geração está sendo mais escasso devido a questões ambientais, a eólica pode ser considerada como a oferta

mais barata de contratação. No mês de dezembro de 2017, haverá dois leilões, um A-4 e um A-6 que irá contribuir ainda mais para o crescimento desse setor.

Gráfico 2 – Evolução da Capacidade Instalada no Brasil (MW).



Fonte: Boletim Anual de Geração Eólica, 2016.(ABEEÓLICA, 2016).

Apesar do resultado positivo obtido por essa fonte, houve uma queda considerada no investimento no setor brasileiro nesse setor devido à crise econômica presente no país, caso do cancelamento do leilão de Energia de Reserva no ano passado. Sendo o ano de 2016 o primeiro ano, desde 2009, a não ser realizado o leilão para a fonte eólica, o que representou um grande impacto para as indústrias do setor. (ABEEÓLICA, 2016).

2.4. Sistemas Híbridos (Eólico-Solar)

Os sistemas híbridos são aqueles formados por mais de um tipo de fonte de geração de energia, que de acordo com a oferta do recurso, deve gerar e distribuir energia de forma otimizada e com custos mínimos. Esse tipo de sistema é recomendado para localidades que estão distantes e isoladas da rede de distribuição, aumentando, assim, a confiabilidade do sistema.

A implementação de projetos híbridos eólico-solar é uma alternativa para aumentar a competitividade nesse setor, e, também, para incentivar o aumento na instalação de projetos fotovoltaicos de grande porte e a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica no país.

Os primeiros sistemas híbridos foram instalados na década de 70 motivados pela busca de uma fonte alternativa diante da crise de petróleo de 1973. No Brasil, o primeiro projeto de sistema híbrido foi instalado em 1986, na ilha de Fernando de Noronha. Esse sistema (híbrido diesel-eólico) apresentava uma potência de 125 KW. Em 2014, a Celpe, em parceria com o

governo americano e alemão, ampliou a usina solar Noronha I com potência instalada de 400 KW. (Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017).

Em julho de 2016, um segundo projeto solar foi inaugurado em Noronha, Noronha II. Essa Usina é constituída por 1.836 módulos fotovoltaicos (500 KW). Essas duas usinas representam 10 % da energia consumida no arquipélago. Representando, assim, um *saving* anual de 400 mil litros de diesel na termoeétrica local. (Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017).

Em 2014, iniciou-se a operação no município de Taracatu, Pernambuco, de mais uma usina híbrida eólica-solar. O projeto é formado por um parque eólico de 80 MW (“Fonte dos Ventos”), e duas plantas fotovoltaicas (“Fontes Solar I e II”) com capacidade total de 11 MW. Essa usina é capaz de produzir mais de 17 GWh por ano, equivalente ao consumo de 90 mil residências. (Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017).

De acordo com a forma de interligação à rede elétrica, os sistemas híbridos podem ser classificados em sistemas isolados, ou por sistemas interligados. No caso dos sistemas isolados, o fornecimento é direcionado para um conjunto de carga totalmente independente, os quais são dotados de grupos de bateria, de modo a garantir a confiabilidade no sistema. Em relação aos sistemas interligados, a geração de energia do sistema híbrido funciona como blocos de geração complementar dentro da matriz energética, conectando-se através do sistema elétrico interligado. Esse último sistema é ideal para fontes complementares de geração distribuída no sistema. (Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017).

O aspecto regulatório é o ponto negativo desse sistema de geração. O Brasil carece de regulamentação para tais projetos, fato que dificulta a inserção desse sistema na matriz energética do país. Por exemplo, para um projeto desse tipo ser elaborado, é necessário tratar separadamente tal sistema segundo as regulamentações específicas da Aneel. Assim, vantagens que poderiam ser obtidas com a sinergia da infraestrutura e outorgas para a construção de tal obra acabam não sendo aproveitadas pela falta de elemento regulatório. (Retorta; Block; Donadon; Schumacher; Camargo; 2017).

2.5. Energias Renováveis no Nordeste (Eólico-Solar)

Historicamente caracterizada como dependente da geração energética das regiões sudeste e da CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco), a região vem virando essa página com o desenvolvimento de fontes alternativas. Segundo Luiz Eduardo Batista, diretor-geral do Operador Nacional do Sistema (ONS), no último dia 16 de julho de 2017, a energia gerada no Nordeste respondeu por 12,6% de toda a energia fornecida ao Sistema Interligado Nacional (SIN). (Agência Brasil, 2017).

A expressiva geração de energia por meio das fontes eólicas e solares no Nordeste possibilitou o replecionamento das bacias hidrográficas dessa região. Essas bacias foram fortemente afetadas pelos últimos anos de seca. Essa rápida expansão dessas fontes tem trazido desafios não só para a operação em tempo real do SIN, mas também para a etapa de programação diária (D-1).

Atualmente, o controle dessa variabilidade de geração tem sido realizado por meio de sistemas de Controle Automático de Geração (CAG) das usinas hidroelétricas na região Sudeste/Centro-Oeste, uma vez que o CAG da região Nordeste está desligado devido à crise hídrica na região.

Segundo o diretor da ONS, apesar do crescimento da geração energética por meio das fontes eólicas e solares no Nordeste, 50% da energia dessa área é proveniente das fontes térmicas e hídricas que vem do Norte e do Sudeste. (Agência Brasil, 2017). Devido a esse fato, a geração de energia do Nordeste é ainda dependente dos outros subsistemas nacionais.

A rede de linhas de transmissão no Nordeste é formada por linhas de transmissão de 500, 230, 138 e 69 KV. No total, são 114 subestações e 20.443 km de linhas de transmissão. Esse sistema foi desenvolvido para, em caso de falha em alguma linha de transmissão, outra linha em paralelo ser acionada imediatamente, garantindo, assim, a confiabilidade no sistema.

Atualmente, um dos principais desafios para a geração de energias renováveis é em relação a infraestrutura de transmissão. Por exemplo, em 2014, uma auditoria do Tribunal de Contas da União calculou que a falta de linhas impediu que, durante 2012 e 2013, que 48 parques no Rio Grande do Norte e na Bahia escoassem sua produção, resultando em prejuízo de R\$ 929 milhões. (Barifouse; Schreiber; 2015)

Segundo o Programa de Expansão da Transmissão (PET), publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no segundo semestre desse ano, há o projeto de instalação de 41 novos projetos de linhas de transmissão nessa região até o ano de 2022, que contabilizarão 2.367 km de extensão e um investimento total de quase 3 bilhões de reais. Esses projetos, atualmente, não se encontram autorizados ou licenciados. (EPE, 2017).

Em relação ao consumo, segundo o estudo de previsões de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2018-2022, a carga de energia do subsistema do Nordeste do SIN apresentará uma taxa média de crescimento anual de 4,0% o que representará uma média anual de 450 MW.

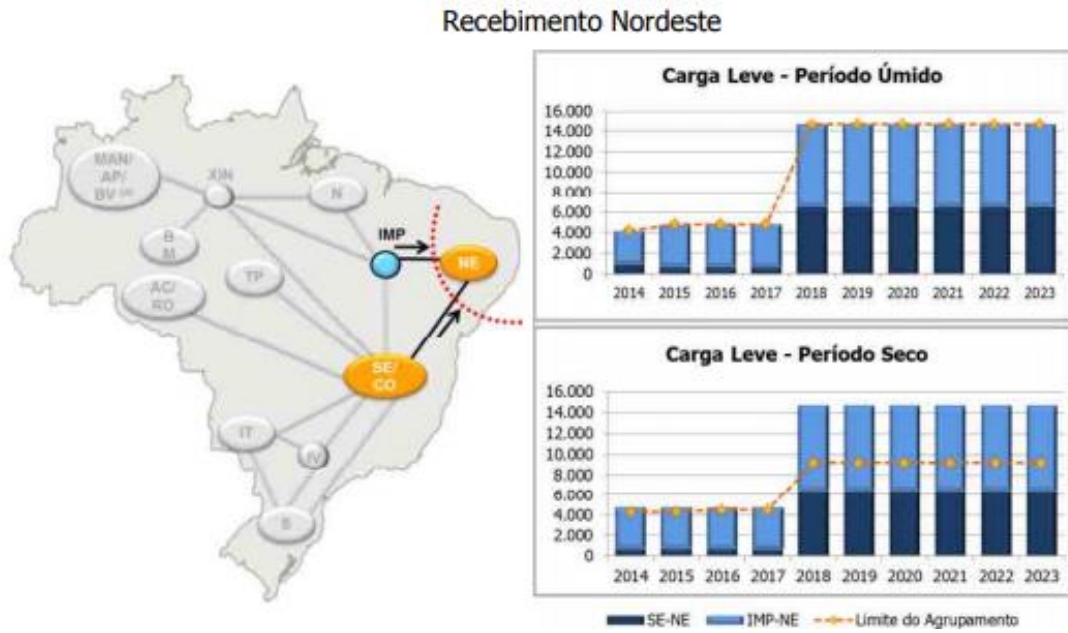
Para atender essa futura demanda, é preciso continuar os investimentos em geração de energia na região. Devido a atual crise hídrica no país, é inviável focar no desenvolvimento de usinas hidroelétricas e térmicas. É preciso continuar a linha atual de crescimento das energias mais sustentáveis, principalmente a eólica. Atualmente, 70% da geração eólica se encontra no litoral dessa região, é preciso avançar em direção ao interior.

No caso do estado do Ceará, cuja produção de energia eólica nos parques representaram o quarto maior volume de geração no Brasil no ano de 2017 (1,6 GW de potência instalada distribuídas em 61 parques), estima-se um aumento de 44% do potencial nos próximos anos com a entrada em operação de 19 (398,5 MW) projetos em construção, e 17 (337,4 MW) projetos com construção ainda não iniciada. (Cabral, 2017).

Há na representação na Figura 2 e 3 o quanto de energia será recebido e fornecido no Nordeste pelos outros subsistemas nos próximos anos, respectivamente. Observa-se que o valor da carga disponibilizada pelos outros subsistemas é ligeiramente maior (2.000 MW médio) do que a energia injetada pelo subsistema nordeste. Essas figuras evidenciam o quanto o subsistema do Nordeste é ainda dependente dos outros sistemas. Caso aja uma falha em alguma linha de transmissão do subsistema do Sudeste, por exemplo, irão, possivelmente, ocorrer impactos diretos ou indiretos no subsistema do Nordeste. Em períodos úmidos, por exemplo, época em que os reservatórios estão mais cheios, 14.000 MW de energia serão recebidos pelo subsistema do Nordeste, em contrapartida, durante o mesmo período, cerca de 12.000 MW serão injetados em outros sistemas. Outra observação que pode ser extraída a partir das duas representações é o relativo perfil linear do fluxo de energia nos próximos anos, entre 12.000 e 14.000 MW para o período úmido, e entre 12.000 e 14.000 MW para o período seco.

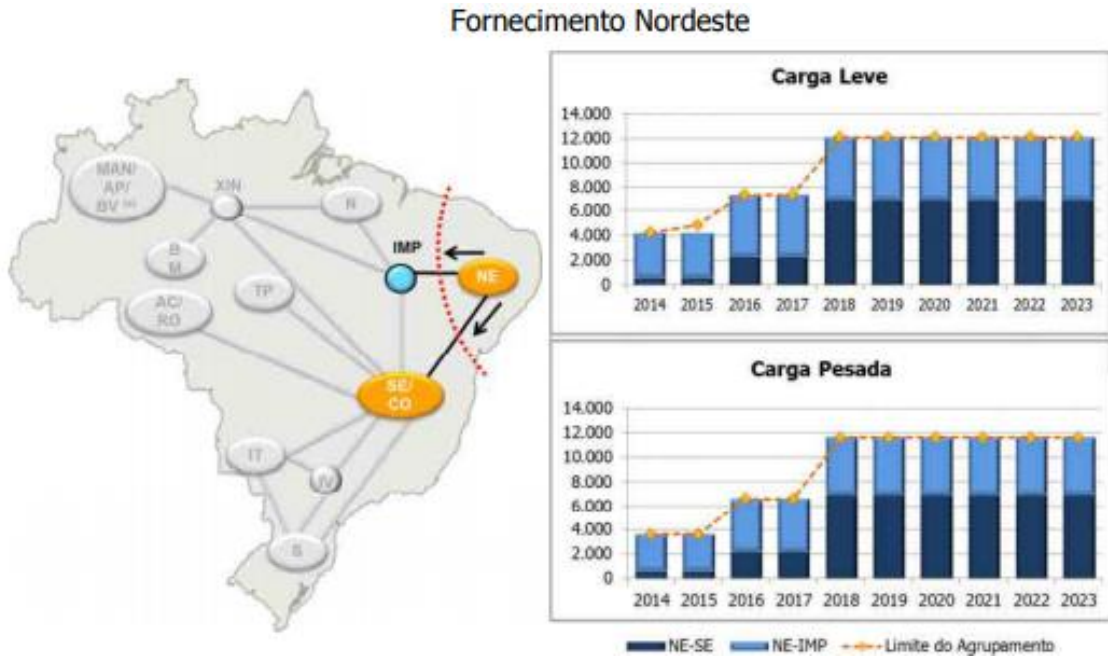
Percebe-se, portanto, uma considerada dependência do subsistema nordeste em relação aos outros sistemas. Sendo o subsistema Nordeste diretamente impactado por falhas em outros sistemas. Logo, há a necessidade de maior desenvolvimento de tecnologias de armazenamento na região para garantir maior autonomia no sistema, e, também, a segurança no fornecimento de energia para os casos de falhas externas.

Figura 2 – Fluxo de expansão da energia recebida pelo subsistema Nordeste (MW).



Fonte: EPE, 2014.

Figura 3 – Fluxo de expansão da energia fornecida pelo subsistema Nordeste (MW).



Fonte: EPE, 2014.

3. Armazenamento de Energia

Neste capítulo será apresentada uma introdução sobre a tecnologia de armazenamento de energia, discorrendo sobre suas características e aspectos, e analisando, também, projetos, assim como conceitos de vantagens que essa tecnologia irá resultar para o sistema elétrico de energia.

3.1 Conceito de Armazenamento de Energia

O armazenamento de energia consiste em um armazenamento temporário do excedente de energia com o intuito da compensação temporal entre demanda e oferta de energia. Com esse excedente, há a possibilidade do controle das oscilações de energia na rede e, assim, a qualidade de energia na distribuição é melhorada.

As desvantagens dos sistemas de geração distribuída (Eólico e Solar) decrescem por meio do uso de armazenadores, tornando-se, assim, a implementação de tais instalações mais favoráveis. Resulta-se, como consequência, em menores taxas de emissão de CO₂ ao ambiente. Esses armazenadores de energia também são importantes na geração de energia térmica a partir da conversão de energia elétrica em países que é necessário suprir as residências com calor durante o inverno.

3.2 Classificação dos Tipos de Armazenamentos de Energia

Há diferentes maneiras de realizar a classificação dos armazenadores de energia. Essa segmentação pode ser realizada a partir da quantidade de carregamento e de descarregamento, forma física de armazenamento, aplicação e nível de densidade de energia, algumas dessas classificações serão discutidas nesse capítulo.

3.2.1 Número de carregamento:

Armazenadores Primários: armazenadores que são carregados e descarregados apenas uma vez. Exemplo: pilhas e baterias descartáveis.

Armazenadores Secundários: armazenadores que podem ser carregados e descarregados múltiplas vezes. Exemplo: Acumuladores (Baterias Secundárias), capacitores, usinas reversíveis e bobinas.

3.2.2 Forma Física de Armazenamento:

Armazenadores de Energia Elétrica: A energia é armazenada em campos elétricos ou eletromagnéticos. Exemplo: Capacitores ou bobinas.

Armazenadores de Energia Química: A energia é armazenada por meio de energia potencial elétrica em eletrodos de baterias ou tanques, ou armazenada por meio de ligações químicas dos hidrocarbonetos. Exemplo: Bateria *Redox-Flow*.

Armazenadores de Energia Mecânica: A energia é armazenada a partir do armazenamento de energia potencial ou de energia cinética. Exemplo: Usinas hidroelétrica reversível, volante de inércia e ar comprimido.

Armazenadores de Energia Térmica: Energia é armazenada em forma de calor sensível ou latente em tanques ou em bombas de calor. Exemplo: Armazenador de calor latente.

3.2.3 Classificação Temporal:

Armazenadores de tempo curto: Armazenam a energia durante nanossegundos ou até um dia, tempo de armazenamento é menor do que 24 horas. Normalmente, apresentam altos valores de eficiência de ciclos de armazenamento. Esse tipo de armazenador é utilizado na rede elétrica para a compensação de oscilações de curta duração. Exemplo de tecnologia de armazenamento: Armazenador de calor sensível, disco de Inércia, bateria de íon-lítio, capacitores de dupla camada.

Armazenador de tempo longo: Armazenam a energia durante vários dias, até mesmo durante meses ou anos. O tempo de armazenamento é maior do que 24 horas. Normalmente, são utilizados para compensar oscilações sazonais da geração de energia, seja pela estiagem de ventos, ou pela falta de água nas usinas hidroelétricas. Esse tipo de armazenamento apresenta baixo valor de eficiência de ciclo de armazenamento. Exemplo de tecnologia de armazenamento: Armazenador por bombeamento, armazenador de ar comprimido e combustível fóssil.

Há na Tabela 1 a apresentação das principais tecnologias de armazenamento de energia, assim como sua classificação baseado em critérios de forma de armazenamento de energia, forma de carregamento e de descarregamento de energia, período de armazenamento e densidade de energia. Conclui-se que é possível obter diferentes especificações para a tecnologia de armazenamento, sendo o tipo de aplicação o principal critério de escolha.

Tabela 1 – Principais características dos tipos de armazenadores de energia.

Classe do Armazenador	Tecnologia	Armazenamento	Descarregamento	Classificação Temporal	Densidade de Energia
Elétrico	Capacitor	Campo Elétrico	Direto	Curto	Baixa
Elétrico	Indutor	Campo Magnético	Direto	Curto	Baixa
Eletroquímico	Baterias Redox-Flow	Tanque	Transformação Eletro-Química	Curto ou longo	Média
Mecânica	Usina Hidroelétrica Reversível	Tanque Superior, Água	Turbina, gerador	Curto ou longo	Muito baixa
Mecânica	Armazenador de Ar Comprimido	Caverna, tubo armazenador	Turbina, gerador	Curto	Muito baixa
Mecânica	Armazenador de Energia Potencial	Movimento de granito, rocha	Turbina, gerador	Curto ou longo	Muito baixa
Mecânica	Armazenador de Disco Flutuante	Energia de rotação	Gerador	Curto	Muito baixa
Mecânica	Armazenador de Mmola	Energia potencial	Trabalho Mecânico	Curto	Muito baixa
Mecânica	Recuperação de Energia do Freio	Energia cinética	Gerador	Curto	Muito baixa
Químico	Armazenador de Combustível	Biomassa, gás, combustível fóssil	Bomba, Motor	Curto ou longo	Alta
Químico	Power-to-gas	Armazenador e rede de gás	Turbina de Gás, Caldeira de Gás	Curto ou longo	Média
Térmico	Armazenador de Calor	Tanque, água	Trocador de Calor	Curto	Média
Térmico	Armazenador de Calor Latente	Materiais em troca de fase	Trocador de Calor	Curto	Média
Térmico	Armazenador Termoquímico	Tanque, Zeolite	Processo Químico	Curto	Média
Térmico	Power-to-Heat	Tanque	Trocador de Calor	Curto	Média

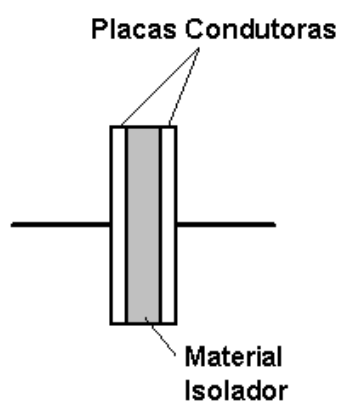
Fonte: Armazenamento de Energia, 2014.

3.3 Tipos de Armazenamento de Energia

3.3.1 Armazenamento Elétrico (Supercapacitores):

Forma de armazenamento no qual a energia é armazenada a partir da sua conservação em um campo elétrico. Normalmente, utiliza-se capacitores ou supercapacitores para esse tipo de armazenamento. Esses elementos podem ser formados por um par de placas condutoras que possui área de superfície A , e são separadas por um dielétrico de comprimento d (Figura 4).

Figura 4 – Estrutura de um capacitor.



Fonte: Arvind Krishnan, 2017.

Considerando-se um campo elétrico uniforme no *gap* entre as placas e desprezando-se o efeito de borda, a capacitância C do capacitor é definida pela fórmula 2. A permissividade do meio (ϵ) é uma constante que o seu valor vai depender do meio onde se encontra o capacitor.

$$C = \varepsilon \frac{A}{D} \quad (2)$$

Os Supercapacitores são dispositivos parecidos aos capacitores, diferindo apenas pelo valor da capacitância. Essas estruturas apresentam altos valores de capacitância quando comparados aos capacitores. Essa característica é devido à configuração desse dispositivo, que é formada em multicamadas ou em forma de espiral. Esse aumento da área das placas capacitivas resulta no aumento da capacitância (Fórmula 2). Os supercapacitores comerciais apresentam a capacitância na escala de *farads* (F). (Sternier; Stadler; 2014)

Esses dispositivos são, normalmente, utilizados para armazenar energia sofrendo frequentes ciclos de carga e descarga em alta corrente e curta duração. Diferentes tipos de eletrólitos são utilizados e o sistema mais comum é o capacitor de dupla camada, na qual se tem uma camada orgânica, o qual facilita a confecção do material.

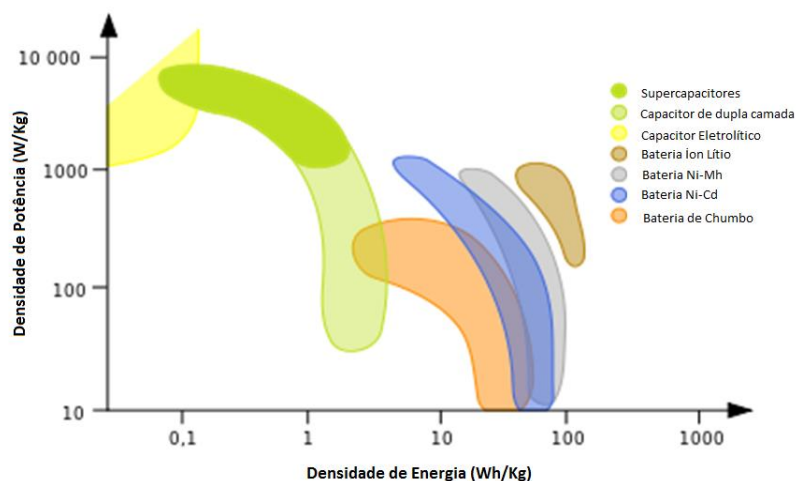
Os supercapacitores possuem um limite de tensão que pode ser aplicada em seus eletrólitos. Esses equipamentos são construídos para suportar tensões na faixa de 2,5-2,7 V. No caso de capacitores eletrostáticos, é possível a aplicação de tensões maiores, porém se reduz o tempo de vida desse elemento. Normalmente, os supercapacitores são conectados em série para que seja possível a aplicação de valores maiores tensões terminais, essas conexões reduzem a capacitância total e aumentam as perdas geradas devido ao aumento da resistência interna da conexão.

O “envelhecimento” dos supercapacitores ocorre devido à temperatura, à tensão e às condições mecânicas aplicadas. Como comentado anteriormente, exceder a tensão aplicada resulta em danos ao eletrólito. No entanto, a maior influência no funcionamento desses elementos resulta da temperatura no capacitor. (Sternier; Stadler; 2014)

Em relação a capacidade de armazenamento, esses dispositivos armazenam na faixa de 1W.h/kg – 30 W.h/kg, 10 – 50 vezes menor do que a baterias de íon lítio, porém apresentam elevada densidade de potência, são capazes de fornecer elevadas taxas de potência em um curto intervalo de tempo, como pode ser visto na Figura 05. Devido a esse fato, esses equipamentos são mais recomendados para situações que o mais importante é o fornecimento de potência do que a carga elétrica. Assim, recomenda-se a utilização de capacitores em veículos de trilho para o auxílio no sistema de geração em caso de falta ou de flutuação na rede. O processo de armazenamento de energia é realizado durante o processo de frenagem regenerativa. Durante esse processo, a energia cinética desenvolvida pelo veículo é convertida em energia elétrica. Em momentos de demanda de carga, essa energia armazenada é

descarregada. É possível economizar até 30% da energia por meio da frenagem regenerativa. (Sterner; Stadler; 2014)

Figura 5 – Densidade de energia *versus* densidade de potência para diferentes meios de armazenamento de energia.



Fonte: Wikimedia, 2014.

Os supercapacitores podem ser utilizados, também, em turbinas eólicas. Em situações de forte rajada de ventos, é necessário o fornecimento de potência elétrica aos motores elétricos para que as pás do rotor sejam posicionadas para fora do fluxo do vento. Evitando, assim, que essas estruturas sejam danificadas. Nessa situação, os capacitores têm baixo custo de manutenção em relação às baterias, sendo sua aplicação recomendada. O seu tempo de vida é de cerca de 15 anos (500.000-1.000.000 ciclos de carga/descarga). Devido a esse fato, os supercapacitores são adequados para aplicações de difícil acesso, caso das usinas eólicas *off-shore*. (Sterner; Stadler; 2014).

3.3.2 Armazenamento Elétrico (Supercondutores):

A supercondutividade representa uma situação física em que o transporte de energia em certos materiais é realizado sem perdas devido à baixa resistência ôhmica. Esse fenômeno foi descoberto em 1911, pelo físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes a partir de experimentos de condutividade realizados no mercúrio em baixa temperatura. (Sterner; Stadler; 2014).

O SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) é uma estrutura em forma de bobina capaz de armazenar a energia elétrica no campo magnético quando uma corrente elétrica percorre o material. Esses armazenadores apresentam uma alta eficiência, cerca de

90%, devido à baixa resistência e a não necessidade de conversão de energia a partir de uma forma para outra. (Sterner; Stadler; 2014)

Um sistema SMES é constituído essencialmente de uma bobina supercondutora, um sistema de refrigeração criogênico e um inversor. Esses sistemas são operados apenas por correntes contínua. Os Sistemas SMES apresentam alta capacidade de amortecimento das oscilações e resultam em aumento da eficiência da transmissão de energia.

Em relação a temperatura de trabalho, pode-se classificar os supercondutores em: LTS (*Low Temperature Superconduct*) e HTS (*High Temperature Superconduct*). Os LTS possuem baixas temperaturas de trabalho, normalmente utiliza-se hélio líquido como líquido refrigerante. Já no caso do HTS, a temperatura de trabalho é mais elevada em comparação aos demais condutores, reduzindo o custo da operação. Normalmente, utiliza-se nitrogênio ou azoto líquido.

Os sistemas de supercondutores podem armazenar a energia diretamente, não necessitando, por exemplo, de conversão química. Devido a esse fato e a ausência de componentes em movimento, esses sistemas apresentam alto ciclo de vida (em torno de 30 anos), podendo ser carregados/descarregados por várias vezes (mais de um milhão). (Sterner; Stadler; 2014).

Assim como os supercapacitores, os supercondutores apresentam alta densidade de potência, porém não apresentam alta densidade de energia. Devido a esse fato, o SMES é indicado para situações de estabilização e segurança do fornecimento de energia e armazenamento de curto prazo. Devido ao alto custo de implementação, projetos de SMES ainda se encontram em fase de desenvolvimento.

3.3.3 Armazenamento Químico (Baterias de Chumbo)

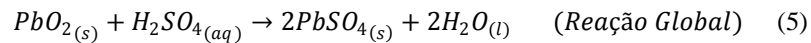
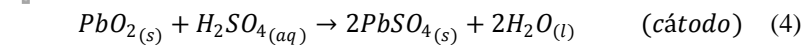
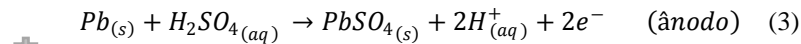
Forma de armazenamento no qual a energia é resultante de reações *redox* (redução-oxidação) em eletrólitos. Esse processo eletroquímico é associado a um transporte de carga que resulta em um potencial elétrico. O processo de armazenamento de energia ocorre em pilhas e baterias. Esse processo é, geralmente, de baixo custo e apresenta alta capacidade de armazenamento quando comparado ao armazenamento direto de energia elétrica em capacitores e em bobinas.

Os eletrodos de uma célula são designados de acordo com a reação como ânodo (oxidação) ou cátodo (redução). O eletrodo positivo de uma bateria é o ânodo durante a carga,

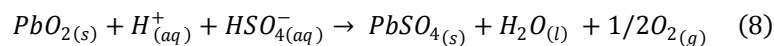
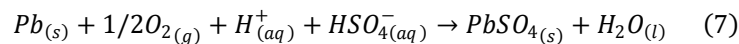
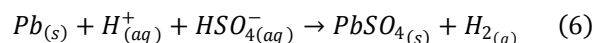
e cátodo durante a descarga. Os termos ânodos e cátodos são acoplados às reações, no entanto são utilizados incorretamente como sinônimo de polaridade do eletrodo.

A bateria de chumbo-ácido é, atualmente, o armazenador mais comumente utilizado. Esse elemento de armazenamento é constituído de pilhas ligadas em série. A tensão elétrica em cada pilha é de cerca de 2 volts.

Esse acumulador é constituído de dois eletrodos, um formado por placas de chumbo e outro por dióxido de chumbo, que estão mergulhados em uma solução de ácido sulfúrico. Uma configuração típica desse tipo de bateria é apresentada na Figura 6. As reações químicas que ocorrem durante a descarga são: (Sterner; Stadler; 2014).



As equações acima (Eq. 3, Eq. 4 e Eq. 5) não são as únicas que ocorrem na bateria de chumbo. Existem reações secundárias que ocorrem em ambos os eletrodos. Essas reações são relacionadas à principal e ramifica uma parte da corrente durante o procedimento de carregamento ou descarga, atuando, assim, como “resistências” ao processo de armazenamento de energia. Alguns exemplos de reações secundárias são: (Sterner; Stadler; 2014).

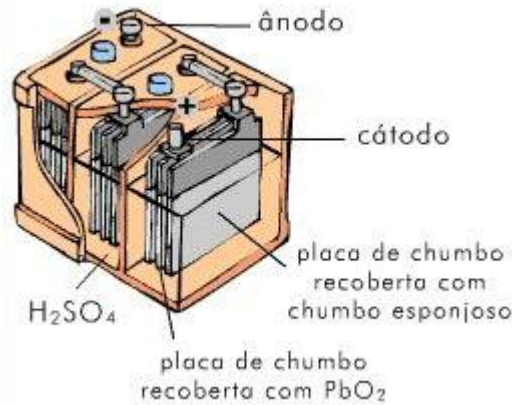


Essas reações secundárias resultam em perda de água a partir dos eletrólitos. A perda dessa água resulta em aquecimento excessivo da estrutura. Uma reposição desse material resultaria em uma manutenção que poderia ser cara para instalações distribuídas. A bateria de chumbo regulada por válvula contorna esse problema, pois suspende os gases da eletrólise na célula e impede o acesso do oxigênio atmosférico no interior das células.

As principais aplicações para as baterias de chumbo são: baterias de acionamento elétrico, sistemas elétricos de tração para veículos e máquinas elétricas e fontes alternativas em

nobreaks. Em uso estacionário, as baterias de chumbo podem ser conectadas à rede e são frequentemente utilizados em sistemas de armazenamento em energias renováveis.

Figura 6 – Estrutura da Bateria de Chumbo



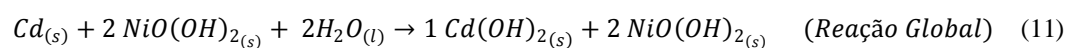
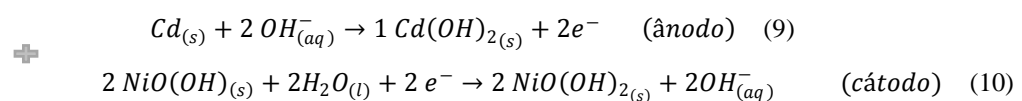
Fonte: Shaoxing Biotech, 2015.

3.3.4 Armazenamento Químico (Bateria de Níquel-Cádmio)

Baterias de Níquel-Cádmio são formadas por eletrodos de Níquel-Cádmio, na qual apresentam tensão nominal igual a 1,3 V. Essas baterias apresentam uma maior densidade de energia e robustez quando comparadas às baterias de chumbo. Essas células trabalham com eletrólitos alcalinos que são compostos de solução de Hidróxido de Potássio (KOH). (Sterner; Stadler; 2014).

A vida útil da Bateria de Níquel-Cádmio depende do perfil de carga (intensidade da carga e da descarga) e da temperatura de operação. Devido a esse fato, a célula de Níquel é indicada para operações em baixa temperatura. Nessas baterias dificilmente ocorrem processos de envelhecimento por corrosão.

As baterias de Níquel-Cádmio exibem longa vida útil, que pode ser carregada até 4000 vezes, e apresentam relativa tolerância a perturbações como, por exemplo, descarregamento profundo e sobrecarga. Essas células são utilizadas em aparelhos portáteis, por exemplo: celulares, aparelhos eletrônicos e câmeras fotográficas. As semi-reações que ocorrem nos eletrodos e a equação global são:

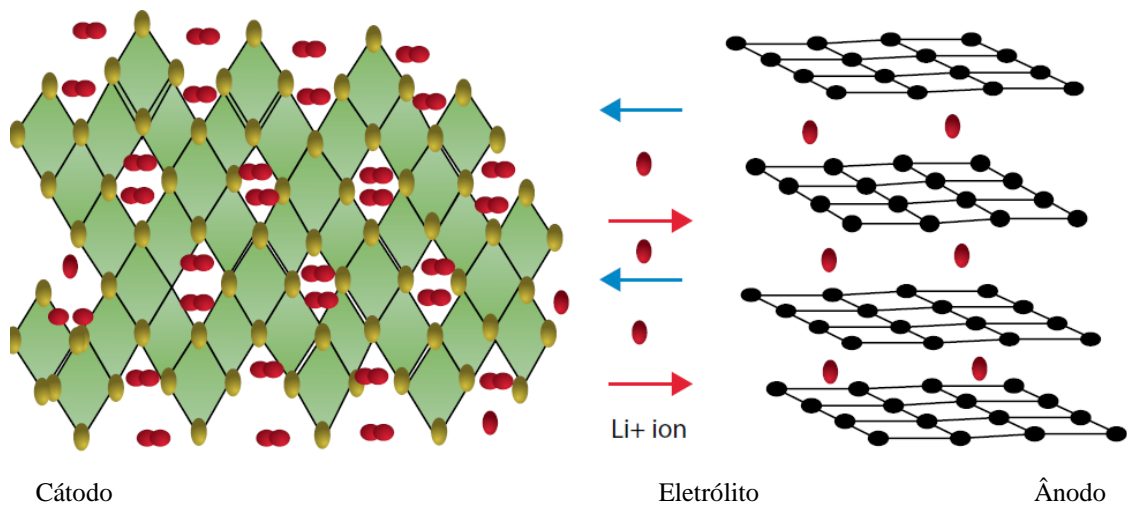


3.3.5 Armazenamento Químico (Baterias de Lítio)

Outro tipo conhecido de bateria é a de íon Lítio. Nessa estrutura, o ânodo e o cátodo são formados por átomos dispostos em planos em formação laminar, entre os quais os íons são inseridos.

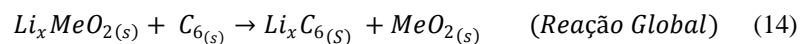
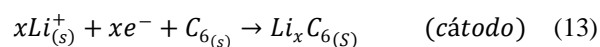
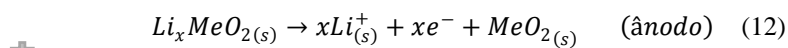
Nessas células, o ânodo é constituído por grafita com cobre, e os íons se intercalam nos planos das estruturas hexagonais de carbono resultando a seguinte substância: Li_xC_6 . O cátodo é formado por íons lítio intercalado em estrutura laminar (Li_xMeO_2). O eletrólito é uma mistura de solventes orgânicos apróticos (PC, EC, DMC) e sais de lítio (LiClO_4 , LiPF_6 , ...), como apresentado na Figura 7. (Sterner; Stadler; 2014).

Figura 7 – Compostos formados a partir do Lítio (ponto vermelho).



Fonte: Armazenamento de Energia, 2014.

O Lítio é um elemento bastante leve e reativo, essas características tornam a densidade de energia da bateria desse material bastante elevada, o triplo em relação às baterias de Níquel Cádmio (NiCd). Devido a esse fato, as baterias de lítio são indicadas a serem utilizadas em equipamentos eletrônicos portáteis, por exemplo, celulares e notebooks. As semi-reações que ocorrem nos eletrodos e a equação global são:



As características de desempenho das células de íon Lítio dependem bastante da montagem e da química utilizada na célula. Para a operação segura dessas baterias, é preciso o monitoramento e o controle da operação. Deve ser gerenciado:

- ✚ **Tensão individual da célula:** A Tensão elétrica entre os eletrodos é de aproximadamente 3,0 V, indo até 4,20 V quando a bateria atinge sua carga máxima. Deve-se monitorar esse valor de tensão com o intuito de assegurar uma operação segura na célula.
- ✚ **Corrente máxima admissível de carga e descarga:** a célula química pode suportar somente a determinadas correntes máximas de carga e descarga. Caso essa corrente máxima seja excedida, haverá uma queda de tensão da célula.
- ✚ **Temperatura da Célula:** quanto maior a temperatura da célula, menor a viscosidade do eletrólito. Com isso, resulta-se em maior mobilidade dos elétrons, diminuindo-se, assim, a queda de tensão ao longo da operação.

Para aplicações em redes elétricas, baterias de íon Lítio ainda estão em fase de desenvolvimento devido à baixa durabilidade (menor do que 5 anos). Apesar disso, o desenvolvimento desse tipo de armazenamento está longe de ser encerrado. Essas células apresentam uma vasta possibilidade de configuração, o que possibilita a potencialização dos seus resultados. Devido a essas características (alta capacidade de corrente, densidade de energia, segurança e ausência de efeito de memória) a bateria de íon lítio possui um grande potencial de aplicação, principalmente em áreas de bens de consumo.

Estudo de Caso: Armazenamento de Energia na Califórnia.

A geração solar é uma das principais fontes atuais de energia. Caracterizada pelo alto grau de variação, a geração dessa fonte pode variar de zero até sua potência máxima em questão de horas. O principal desafio para o planejamento energético fotovoltaico está justamente relacionado a essa incerteza de dados.

Como foi visto, o armazenamento de energia é uma tecnologia que vem se consolidando cada vez mais no mercado energético. Tornando, assim, ainda mais viável o processo de geração de energia a partir das fontes renováveis. A implementação da tecnologia de armazenamento de energia por meio de baterias de íon lítio na Califórnia pode ser mencionada como um caso de sucesso na implementação de tal projeto.

Um dos pontos que são diretamente influenciados pela oscilação da geração é referente ao Montante do Uso do Sistema de Transmissão (MUST), que representa a potência que foi contratada pela distribuidora à concessionária responsável pela transmissão de energia. Um erro nesse valor irá representar um alto custo para as tarifas energéticas aos consumidores. (Botelho, Dutenkefer, Mello, Mendes, 2017).

Um notório caso de erro no cálculo do planejamento energético foi observado nos Estados Unidos. No mês de março de 2017, em 14 dias desse mês, o estado da Califórnia gerou tanta energia solar que teve que vender ao estado do Arizona e do Nevada esse excedente de energia para que, assim, seja evitado a sobrecarga na rede nas linhas de transmissão e de distribuição. (Cardwell, Krauss, 2017).

Há tanto excedente de energia no estado da Califórnia que as fontes de geração de energias renováveis funcionam, em média, com apenas um terço de sua capacidade, e, em alguns casos, o funcionamento dessas plantas está sendo encerrado décadas antes do planejado. (Cardwell, Krauss, 2017).

Esse excesso de energia foi resultante dos incentivos do governo americano para a geração de energia por meio de fontes renováveis e por meio de gás natural. Essas instalações de gás natural proporcionam confiabilidade e *back-up* para a geração distribuída. Apesar da construção de plantas de gás natural ter diminuído nos últimos anos, ainda não é claro quando a Califórnia irá poder se confiar apenas na geração de energia por meio das fontes renováveis. O investimento na indústria de armazenamento de energia foi a solução do governo americano para esse problema. Novas legislações exigiram que as três concessionárias (Southern California Edison, Pacific Gas & Electric e San Diego Gas & Electric) do estado adquirissem uma capacidade equivalente de 2.000 MW de armazenamento de energia até 2024. (Cardwell, Krauss, 2017).

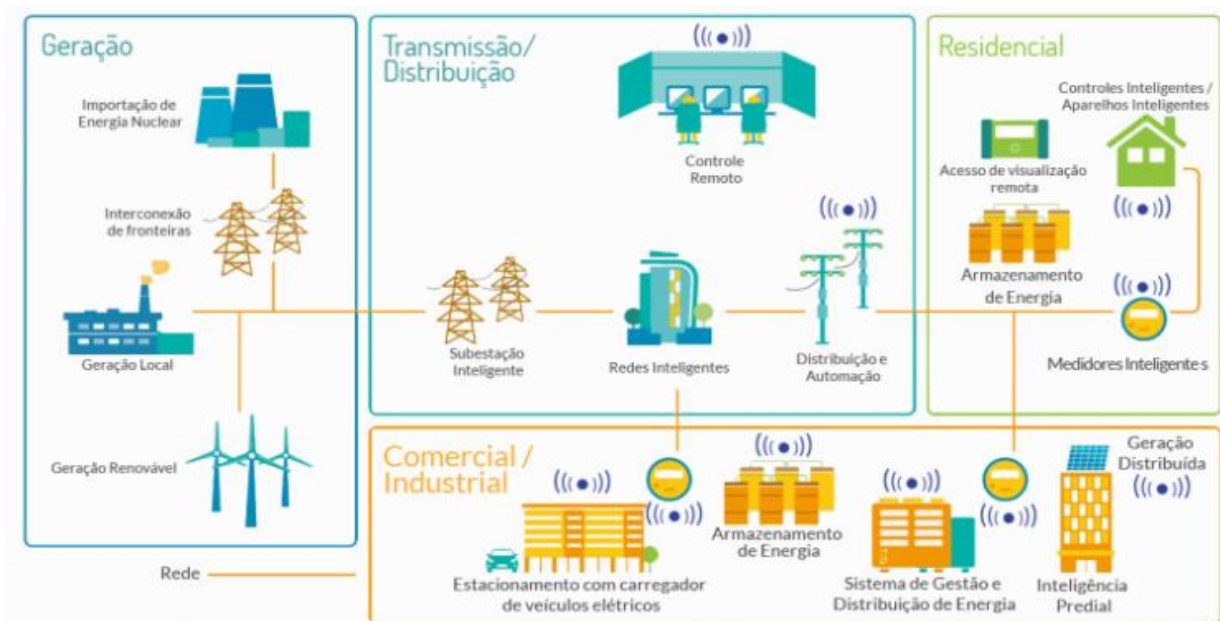
Além de solução para a intermitência das fontes energéticas, essas tecnologias de armazenamento representam uma melhoria no fornecimento de energia em relação à tensão e à frequência, evitando, assim, altos investimentos em transmissão e distribuição. A utilização de baterias em armazenamento de energia está se tornando cada vez mais viável devido à redução dos custos das baterias. No ano de 2016, por exemplo, houve uma redução de 10% do preço da bateria quando comparado ao ano anterior. (Botelho, Dutenkefer, Mello, Mendes, 2017).

Na proposta americana de armazenamento de energia, as diferentes fontes de energia estariam conectadas em uma rede, sendo essa rede controlada remotamente por uma central de controle de dados. A forma de conexão e transmissão de dados é realizado via Internet das Coisas (*IoT*), garantindo, assim, maior autonomia e confiabilidade à rede. Toda essa rede forma

uma planta virtual de geração energética. Na Figura 8, há a representação dessa estrutura de integração de comunicação.

Bancos de bateria de íon-lítio são conectados em série e em paralelo para a realização do controle de energia do sistema. Nesse sistema há o armazenamento de energia durante os períodos excedentes de geração de energia, e a devolução dessa energia armazenada à rede em períodos de demanda. Representando, assim, uma importante ferramenta de controla para o sistema.

Figura 8: Modelo de armazenamento de energia baseado em *IoT*.



Fonte: Abb, 2017.

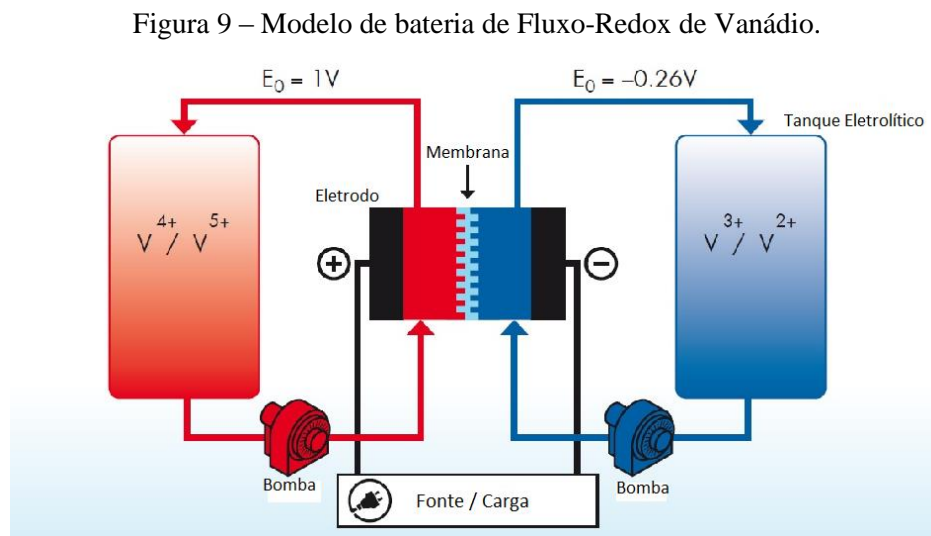
Uma dessas instalações de armazenamento, localizada em Escondido na Califórnia, a San Diego Gas& Electric é composta de *containers* com bancos de bateria capazes de atender a demanda energética de 20.000 casas por quatro horas.

3.3.6 Armazenamento Químico (Bateria Fluxo-Redox)

A Bateria de Fluxo é uma célula recarregável na qual a energia química é fornecida por componentes químicos dissolvidos em líquidos, os quais são separados por uma membrana. O processo de troca iônica ocorre através da membrana a partir da circulação do respectivo líquido no seu tanque (Figura 10). (Karoff, 2017).

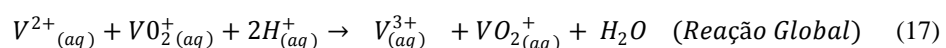
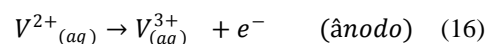
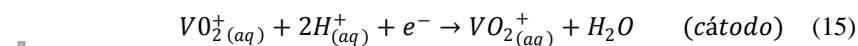
Esses componentes químicos são armazenados em tanques, cujo tamanho está relacionado à capacidade energética. Diferente dos outros tipos de baterias, é independente o dimensionamento da potência e da energia das células de fluxo-redox. Há a representação de tal estrutura na Figura 9.

A eficiência desse tipo de célula é de cerca de 90%, porém, quando se leva em consideração as perdas resultantes aos equipamentos periféricos, bomba, por exemplo, a eficiência cai para 70-80%. Ao longo de vários ciclos de carga e descarga, começa a se formar microscópicas fibras, dendritos, de compostos nos eletrodos. Formando-se no ânodo, essas fibras podem resultar em curto-circuito, resultando em aquecimento da estrutura e explosão. Como medida preventiva, utiliza-se eletrólitos mais finos, resultando no aumento da resistência da bateria. (Karoff, 2017).



Fonte: Conca, 2015.

Uma das atuais limitações desse tipo de célula é a limitação da quantidade de carga/recarga (menor do que 1000 ciclos). Pesquisadores da Universidade de Harvard desenvolveram novas baterias de fluxo que armazenam energia em moléculas orgânicas dissolvidas em pH neutro. Essa descoberta permite a criação de baterias não tóxicas, não corrosivas com um longo tempo de vida, juntamente com a redução do custo de produção. As semi-reações que ocorrem nos eletrodos e a equação global são:



Comparando a bateria de fluxo-redox com outras baterias eletroquímicas, as seguintes vantagens podem ser identificadas: (Karoff, 2017).

- ✚ Estrutura Celular mais simples;

- ✚ Recomendada para grandes armazenamentos de energia;
- ✚ Dimensionamento flexível da energia e da potência;
- ✚ Tempo de resposta curta (menor do que 100 ms);
- ✚ Auto Descarga é limitada devido à separação dos eletrólitos pela membrana;
- ✚ Reduzidos Impactos Ambientais;

Em oposição, comparando a bateria fluxo-redox com outras baterias eletroquímicas, as seguintes desvantagens podem ser apontadas:

- ✚ Densidade de energia relativamente baixa;
- ✚ Presença de correntes secundárias que reduzem a eficiência;
- ✚ Dificuldade na vedação das células e pilhas.

Algumas aplicações desse sistema são:

- ✚ Estabilidade do pico de carga: A bateria Redox-flow de vanádio puro e a célula de zinco/bromo são utilizadas nessa área, especialmente nos Estados Unidos e no Japão.
- ✚ Fornecimento de controle e equilíbrio energético;
- ✚ Backup de sistemas UPS para alimentação de emergência e operação de redes isoladas: Há cidades isoladas na Austrália que utilizam esse tipo de bateria para armazenar o excesso de energia gerado pelas usinas eólicas presentes;
- ✚ Carregadores de veículos elétricos: devido ao rápido tempo de resposta, as baterias fluxo-redox são indicadas para o sistema de carga/descarga de energia de veículos elétricos.

3.3.7 Usina Hidrelétrica Reversível (UHR)

A utilização da energia potencial acumulada pela água na presença de desnível é uma das formas mais antigas de geração de energia. Atualmente, cerca de 20% da matriz energética mundial é oriunda das usinas hidrelétricas. Em certos momentos ao longo do dia, porém é necessário armazenar o excedente de energia gerado para o controle de cargas.

Usinas hidrelétricas reversíveis, ou usinas de armazenamento bombeado, é o método de armazenamento de energia em larga escala que apresenta o melhor desempenho. Essa usina é constituída de um reservatório superior e outro inferior. De acordo com a oferta de energia, o excedente de energia gerado pode ser convertido em energia potencial por meio do bombeamento da água do reservatório inferior para o reservatório superior, enquanto, em horários de grande demanda por energia, a água armazenada no reservatório superior será transferida para o reservatório inferior. Ao longo desse último processo, a pressão da água irá

rotacionar as pás de um gerador que estará presente nesse percurso, convertendo, assim, a energia potencial em energia elétrica. Além de armazenar energia, essas usinas podem ser utilizadas para controle de frequência e para compensação de reativos. (Zuculin; Pinto; Barbosa, 2016).

As UHR são instalações que operam baseado na geração e consumo de energia, na qual o balanço é sempre negativo. Apesar disso, é necessário o investimento em UHR, pois essa estrutura é capaz de proporcionar ao sistema elétrico um alto grau de confiabilidade e de qualidade de energia, uma vez que a energia armazenada pode ser utilizada prontamente em casos de contingência. Devido a esse fato, é resolvido o problema da intermitência de energia da geração distribuída. (Zuculin; Pinto; Barbosa, 2016).

Existem diferentes configurações para o arranjo eletromecânico. A solução menos viável econômica seria a instalação de uma unidade geradora separada por outra para bombeamento. Essa configuração é utilizada em quedas maiores do que 600 m, as quais exigem turbinas do tipo Pelton. A solução mais viável seria a utilização de turbinas reversíveis, as quais em certos momentos funcionam como turbina, já em outros momentos funcionam como bombas. A instalação de tal máquina exige a aplicação de dispositivos especiais para o controle da operação. Essa configuração exige maior manutenção dos equipamentos do que em relação às usinas convencionais devido ao aumento da quantidade de partidas e paradas das turbinas. (Zuculin; Pinto; Barbosa, 2016)

Devido à diferença de altura, o reservatório superior possui maior energia potencial. Essa energia é calculada a partir do volume de armazenamento (V), densidade da água (ρ), aceleração da gravidade (g), diferença de altura (Δh) e eficiência do processo (η) pela seguinte equação:

$$E = V \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (18)$$

Durante a fase de bombeamento, assim como durante a fase de acionamento da turbina pelo fluxo reversível, ocorrem perdas no transformador, no gerador, nos motores, na turbina e na tubulação. Atualmente, obtém-se eficiência energética de até 83% em tais usinas. (Stern; Stadler; 2014).

Como ponto negativo das usinas reversíveis, pode-se citar que a construção de reservatórios e barragens resulta em grandes impactos ambientais. O planejamento e construção de tais projetos acarretam em críticas e protestos de ambientalistas e iniciativas comunitárias.

A instalação de usinas hidroelétricas reversíveis necessita de condições geográficas específicas com grandes diferenças de altura. Uma alternativa para contornar essa premissa é a usina com reservatório anelar. Nessa construção a diferença entre a altura do reservatório

superior e inferior é criada artificialmente. Na construção dessa usina, a massa de terra que é movida da escavação do reservatório é utilizada como parede de delimitação do reservatório superior. Pode-se, também, utilizar cavernas, depressões naturais ou o mar como reservatório.

Os atuais desafios relacionados à UHR são a viabilidade econômica de tal projeto, o estabelecimento de bases regulatórias e aspectos ambientais. Apesar de não resultar impactos ambientais tais quais as usinas de ponta, as UHR afetam a fauna e flora da região de instalação. Devido a esse fato, é preciso realizar um estudo detalhado sobre os impactos ambientais de tal instalação, objetivando, assim, a redução desses.

3.3.8 Usina de Armazenamento de Ar Comprimido

As primeiras ideias para o desenvolvimento da tecnologia de ar comprimido no armazenamento de energia elétrica surgiram nos anos 1948 com F.W. Gay a partir da submissão da patente intitulada: “*Means for Storing fluid for Power Generation*” (“Meios para Armazenamento de fluido para Geração de Energia”). Apesar disso, somente em 1978 que surgiu o interesse na implementação de tal projeto com a construção da Usina de armazenagem de ar comprimido em Huntorf, Alemanha. (Sterner; Stadler; 2014).

Esse interesse tardio pela implementação de Usinas de Armazenamento de Ar Comprimido é justificado pela suficiência das usinas reversíveis para o armazenamento do excedente de energia. A partir da década de 70, esse quadro mudou devido a questões ambientais, técnicas e econômicas. Em 1969, foi elaborado o projeto de construção de uma usina de ar comprimido em *Huntorf*, Alemanha. Diferente da água, o ar pode ser comprimido, então, baseado nesse princípio, uma diferença de pressão entre dois ambientes é capaz de resultar em uma força resultante. O projeto de *Huntorf* foi facilitado pelas formações geológicas locais, onde se encontram camadas de sal em profundidade adequada para construção de cavernas subterrâneas. Esse projeto tinha uma potência elétrica de 290 MW, sendo utilizadas duas cavernas para o armazenamento. (Sterner; Stadler; 2014).

As etapas de armazenagem de energia são: (i) compressão: o ar é arrefecido via compressores a uma pressão de até 72 bar. Os compressores são alimentados pela energia a ser armazenada; (ii) quando há a demanda de energia, esse ar comprimido é aquecido ou queimado por combustão a gás natural e, depois, expandido; (iii) após a combustão, esse ar é utilizado para gerar energia por meio da rotação de turbinas similar à geração de energia em turbinas a gás. (Sterner; Stadler; 2014).

Em 1991, foi instalada a primeira usina de ar comprimido dos Estados Unidos, em *McIntosh*. A principal melhoria em relação ao projeto alemão é referente a integração de um

recuperador de gás de exaustão. Com essa implementação, é possível, durante a fase de expansão, a utilização do calor resultante da fase de compressão, aumentando, assim, a eficiência do processo. A usina de *McIntosh* requer 1,17 kWh de gás natural para fornecer um kWh de energia elétrica (eficiência de 54%), enquanto a de *Huntorf* necessita de 1,6 kWh (eficiência de 42%). (Sterner; Stadler; 2014).

As usinas de armazenamento de ar comprimido requerem uma potência mínima para o acionamento das turbinas a gás convencionais, na faixa de Megawatts. Esse sistema é recomendado para a compensação de picos de energia ou para a proteção de redes isolantes. Devido a essa potência mínima, essa usina é indicada para sistemas com alta flutuação (caso das usinas eólicas) ou com grandes consumidores (caso da indústria).

Em relação ao ciclo de calor, é possível classificar as usinas de armazenamento de ar comprimido em três tipos:

- ✚ Adiabático: utiliza o calor gerado pela compressão do ar para a expansão desse elemento durante a fase de conversão de energia. O calor gerado pode ser armazenado em um fluido (óleo quente), ou sólido (rocha). A eficiência real desse processo é em torno de 70%.
- ✚ Diabático: processo que dissipa o calor gerado durante a etapa de compressão. Com isso, é preciso utilizar uma maior quantidade de gás natural durante a etapa de expansão do ar, liberando, assim, poluentes para a atmosfera. A eficiência desse processo gira em torno de 54%.
- ✚ Isotérmico: procedimento que objetiva limitar as variações de temperatura durante as fases de mudança de pressão. Assim, objetiva-se utilizar a energia a ser armazenada apenas para a compressão do ar, evitando, portanto, as perdas térmicas. Utiliza-se máquinas à pistão com o intuito de reduzir a velocidade do processo, e, assim, manter o equilíbrio térmico.

4. Aplicações para o Sistema de Armazenamento de Energia

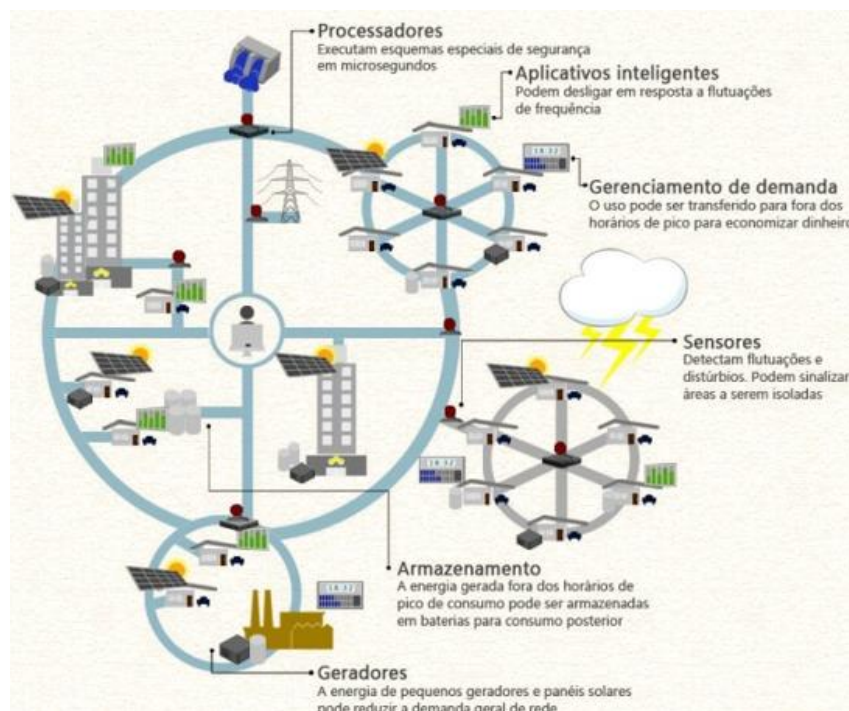
Neste Capítulo será apresentado algumas aplicações práticas de sistemas de armazenamento de energia, sendo discorrido sobre seus princípios de funcionamento, suas características e seus resultados.

4.1 Sistemas de Distribuição com *Smart Grid*:

Smart Grid, ou “redes inteligentes”, se refere a sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica que são dotados de elementos de automação que garantem um maior controle da operação, resultando, assim, aumento da eficiência do processo como um todo.

Esse termo tem sido utilizado com maior frequência desde 2005 quando surgiu no artigo “*Toward a Smart Grid*” (Amian; Wollenberg, 2005). Provavelmente, o termo apareceu por primeiro em 1998, sendo que há um vasto grupo de definição para tais sistemas. O conceito de sistemas de distribuição *Smart Grid* engloba a integração de vastas tecnologias de sensoriamento, monitoramento, tecnologia da informação e telecomunicação para que a rede funcione de forma automatizada, Figura 10. O Departamento de Energia dos Estados Unidos descreve a transformação da rede convencional para a rede inteligente como uma transformação da rede centralizada controlada por uma rede menor e com sistemas de produção mais próximo do consumidor.

Figura 10 – Modelo de sistema *Smart Grid*.



Fonte: Costa, 2012.

Com a tecnologia de *Smart Grid*, é possível saber com detalhe quanto cada aparelho consome. Uma central de monitoramento irá monitorar todas as etapas do processo, os fluxos de energia, falha e consumo e sensores irão transmitir para a rede os dados para os consumidores e geradores de energia. Com esses medidores é possível diminuir os furtos de energia e, assim, definir o padrão de consumo de cada residência. Segundo a IBM, 14,7% do total de energia produzido no Brasil é dissipado no processo de distribuição. (PROOF,2017).

Em relação ao sistema elétrico brasileiro atual, existe a necessidade de uma solução para o problema da ineficiência energética. Uma alternativa para a solução desse problema seria a implementação de *smart grids* no sistema. Com a implementação em larga escala dessa tecnologia, seria possível a análise em tempo real da rede, identificando falhas e distorções. Portanto, essa tecnologia poderia ser utilizada tanto para a análise das perdas técnicas, inerentes ao próprio sistema de distribuição, quanto das perdas não técnicas referentes a furtos de energia.

No Ceará, há o desenvolvimento e implementação de um projeto piloto de Rede Inteligente na cidade de Aquiraz. Esse projeto é constituído de um Sistema de Reposição Automática (SRA) para a rede de média tensão em 13,8 KV, que é dotado de um Sistema Inteligente para Mudança Automática de Ajuste do Sistema de Proteção (SIAP) para a rede e irá atender 19.177 consumidores. (Oliveira, 2014).

É necessário salientar que um dos entraves para essa tecnologia de monitoramento se refere a seleção de padrões e de tecnologias de comunicação, devido, principalmente, a existência de diferentes protocolos e especificações de comunicação. Assim, é necessário realizar o estudo da localidade, afim de evitar ou minimizar os problemas de interface da comunicação de diferentes equipamentos.

Alterações no fornecimento de energia levaram a uma mudança da forma de geração e de distribuição de energia, o que resultou em novos desafios para as empresas responsáveis pelo controle e geração de energia. Uma rede mais inteligente possibilita um maior controle do consumo de energia não só para as concessionárias de energia, mas, também, para os consumidores finais devido a disponibilidade em tempo real do consumo de energia.

Aplicação de *Smart Grid* em sistemas de Armazenamento de Energia:

Com a crescente integração dos sistemas de geração de energia no sistema elétrico brasileiro, criou-se a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que garantissem ao mesmo tempo a autonomia, o controle e a segurança ao fornecimento de energia. O desenvolvimento das tecnologias de armazenamento de energia foi criado justamente para atender essa necessidade.

Como apresentado ao longo do trabalho, a tendência do futuro do mercado de energia está no sentido das fontes renováveis. Apesar do crescente desenvolvimento, ainda existem algumas travas para o desenvolvimento dessas fontes, caso da intermitência da geração. Para contornar esse problema, criou-se a necessidade de desenvolvimento de redes “inteligentes” que apresentassem a capacidade de restabelecimento do funcionamento do sistema em casos de falhas (“*self healing*”).

A instalação de sensores e instrumentos de medição em tempo real irá atender essa demanda visto que irá proporcionar ao sistema ferramentas para a detecção de falha em tempo real, e, assim, identificar automaticamente as anomalias, garantindo uma resposta rápida da rede à falha.

Além da detecção e atuação corretiva em falhas, essa tecnologia de medição irá proporcionar o controle de qualidade de energia da rede, pois a partir da leitura dos medidores digitais, poderá ser possível atuar nos sistemas de armazenamento de energia para o controle do fator de potência da rede, da frequência do sistema, da existência de sobrecargas e da sobretensão na rede.

Uma das dificuldades do avanço da tecnologia de *smart grids* se refere aos custos das adequações. Segundo a Audiência Pública 043/2010 da ANEEL para discutir o modelo comercial de medidores a ser utilizado em residências e estabelecimentos atendidos em baixa tensão, é necessário R\$ 70 bilhões para promover o *retrofit* dos equipamentos de medição (medidores e *switches*). (Péres; Campos; Liang, 2014). Devido a esse fato, para tornar viável a implementação desse projeto, deveria ser realizado estudos de *paybacks* em diferentes redes com o intuito de focar naquelas que apresentam o retorno financeiro em menor tempo.

Em relação ao Brasil, atualmente, existem já algumas aplicações de *smarts grids* que visam a utilização de medidores inteligentes com o intuito de reduzir as perdas técnicas e não técnicas do sistema. O gráfico 3 representa as perdas comerciais (linha vermelha), não técnicas, e técnicas (linha verde) no Brasil ao longo dos últimos anos. Conforme o gráfico 3, no ano de 2016, 6,08 % do total de energia injetado pelas concessionárias de distribuição de energia foram furtados. (ABRADEE, 2017).

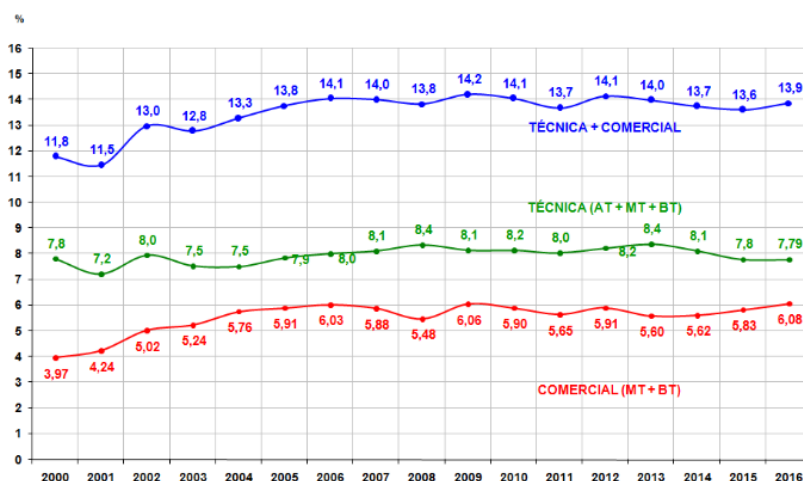
As concessionárias de energia fluminenses foram as pioneiras no Brasil na utilização de medidores inteligentes como forma de solução desse problema. Por exemplo, a Ampla instalou entre 2003 e 2009 cerca de 300 mil unidades, o que reduziu suas perdas em 5%.

A Eletrobrás informou que irá realizar investimentos na ordem de R\$ 700 milhões em automação e novos processos operacionais nas redes de distribuição de sua outorga. Além disso, irá instalar mais de 400 mil medidores em fornecedores de baixa e média tensão.

Em Minas Gerais, há o projeto Cidade do Futuro para a implementação de sistemas de *Smart Grid*. As ações para esse projeto são: automação da medição da energia, sistema de iluminação LED, automação de subestações, automação de redes de distribuição, telecomunicação, gerenciamento e integração de geração distribuída e armazenamento de energia. (Oliveira, 2014)

Com a instalação desses medidores e o desenvolvimento desses processos de automação, será possível a construção básica necessária para a integração de sistemas de armazenamento de energia na rede. Podendo ser gerenciado, assim, não só como a ocorrência de falhas, mas também como o controle da demanda da rede de energia e a identificação de anomalias, caso do furto de energia. Sendo, portanto, uma importante tecnologia para a realização do planejamento energético do país.

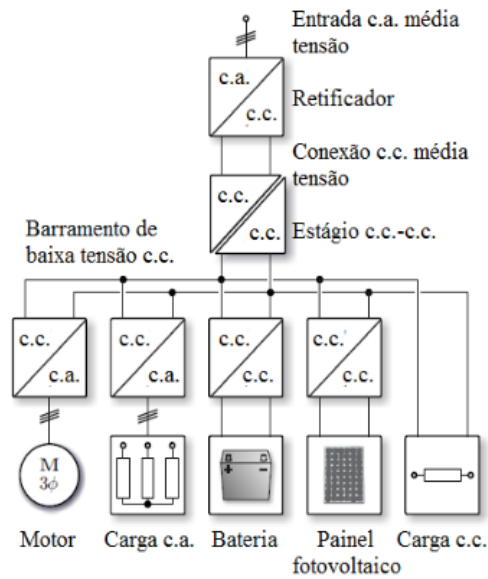
Gráfico 3 – Percentual de Perdas de Energia em Relação à Energia Injetada na Rede pelas Concessionárias de Distribuição



Fonte: ABRADÉE, 2017.

Na Figura 11, há a apresentação de uma configuração esquemática da aplicação de armazenadores de energia em tecnologias de *Smart Grid*. Essa configuração permite a coordenação e integração de fontes de energias renováveis e de sistemas de armazenamento de energia. Assim, um fluxo flexível de energia elétrica é alcançado, integrando fontes renováveis de energia e alimentação de cargas de c.c. e c.a. Nesse esquema, há a incorporação de uma fase de retificação central e um conversor c.c que é solução atraente para os problemas de energia reativa e de proteção dos lados primários e secundários da carga.

Figura 11 – Esquema do sistema de *Smart Grid* com a aplicação de armazenamento de energia.



Fonte: Zuculim, 2015.

4.2 Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)

Durante muito tempo a matriz energética brasileira era formada por grandes usinas hidrelétricas que atendiam a demanda do país. Com o aumento do consumo de energia nas instalações residenciais e comerciais e as limitações geográficas, necessitou-se o avanço de implementação de outras fontes de energia. Como por exemplo, as plantas de geração distribuída e de usinas fio d'água. Nesses casos, é primordial o controle da rede para, assim, garantir a estabilidade do sistema de potência e do controle das oscilações de tensão e de frequência. Para isso, As UHRs no cenário brasileiro têm adquirido novos interesses. A *International Water Power & Dam Construction* (2012) listou 4 UHR construídas no Brasil (Tabela 2). (Canales; Beluco; Mendes, 2017).

Tabela 2 – UHR construídas no Brasil.

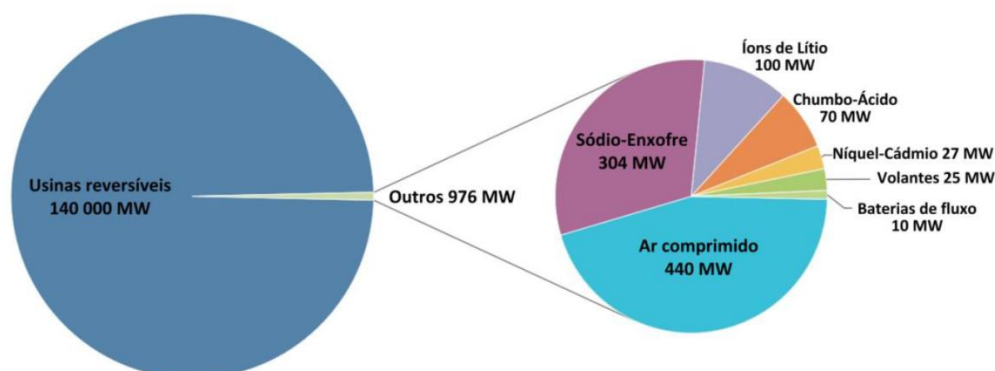
Usina	Inauguração	Instalação	Potência das Turbinas (MW)	Potência das Bombas (MW)	Altura da Queda (m)
Edgard de Souza	1955	1 Francis reversível	14,8	13,3	24
Pedreira	1939	6 Francis reversíveis	78,5	42,6	25
Traição	1940	4 Kaplan reversíveis	7,3	9,4	4
Vigário	1952	4 Francis Reversíveis	90,8	72	36

Fonte: *International Water Power & Dam Construction*, 2012.

No Plano Nacional de Energia Elétrica 1993-2015, a Eletrobrás (1994), apresentou um estudo sobre o potencial e o custo de implementação de UHR em locais propícios. Esses locais se encontram na região Sudeste, Sul e Nordeste do país. Nesse estudo, foram identificados 642 projetos com potencial total de 1.355 GW. Os critérios utilizados nesse projeto foram: módulo de potência maior do que 1000 MW, custo até US\$ 600/KW e tempo de utilização de 14 horas (semanal). Em 2005, a Eletrobrás, por meio do Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), listou os projetos de Caraguatatuba e Pedra do Cavalo como de UHR. (Canales; Beluco; Mendes, 2017)

Estima-se que ao menos 140 gigawatts (GW) de armazenadores de energia sejam instalados no mundo. A maioria da capacidade (99%) é referente a tecnologia de UHR. Os outros 1% é constituído pelas diferentes baterias eletroquímicas e pelo armazenamento em ar comprimido. Na Figura 12, há a especificação, em percentuais, da participação das diferentes tecnologias de armazenamento de energia no mundo. Observa-se o importante papel desempenhado pelas UHR entre as tecnologias de armazenamento.

Figura 12 – Distribuição da capacidade de armazenamento global.



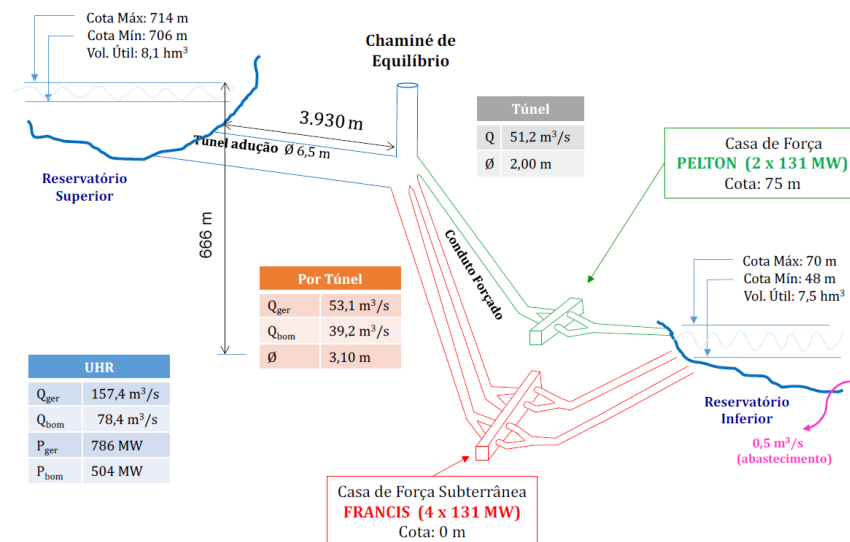
Fonte: *International Energy Agency*, 2014.

Estudo de Caso: Usina Hidrelétrica Reversível (UHR)

Para analisar a viabilidade do investimento em tecnologias de armazenamento de energia, a Aneel desenvolveu um projeto, segundo a Lei 9991 (2000). Esse projeto iria aproveitar um estudo topográfico na região da Serra do Mar em São Paulo, na qual já existia um elevado reservatório de água, para analisar a implementação de tal projeto. Os dados característicos do projeto são: (Zuculin; Pinto; Barbosa, 2016).

- ✚ Potência instalada total de geração: 786 MW (4 grupos turbinas-bombas Francis de 131 MW e 2 grupos geradores Pelton de 131 MW);
- ✚ Reservatório superior com 8,1 hm³;
- ✚ Reservatório inferior com 7,5 hm³;
- ✚ Túnel de adução com 3,9 km de comprimento e 6,5 m de diâmetro (reservatório até a chaminé de equilíbrio);
- ✚ Dois túneis conectando a chaminé de equilíbrio até a casa de força subterrânea (4 grupos turbinas-bombas Francis) com 3,1 m de diâmetro;
- ✚ Túnel conectando a chaminé de equilíbrio até a casa de força contendo 2 grupos geradores de 131 MW (Figura 13);

Figura 13 – Representação do estudo do caso (UHR).



Fonte: Zuculin, 2015.

O custo estimado desse projeto seria de R\$ 600 milhões, sem considerar impostos. Sendo o custo do quilowatt da ordem de R\$ 2.500,00. O prazo para o fornecimento de energia para a 1º unidade era de 32 meses. (Zuculin; Pinto; Barbosa, 2016)

Nesse projeto, identificaram-se três dificuldades regulatórias que impossibilitariam a instalação de tal projeto: (i) A falta de um mercado de potência ou de serviços ancilares (serviços complementares e importantes para o funcionamento do serviço básico); (ii) pequena diferenciação dos preços de curto prazo, dado pelo Preço de Liquidação de Diferenças (PLD), entre as cargas pesadas, média ou leve; (iii) A inexistência de empresas verticalizadas, responsáveis não só pela geração, assim como pela transmissão e pela distribuição.

5. Perspectivas de Aplicação da Tecnologia de Armazenamento de Energia no Brasil

Neste capítulo será apresentada algumas aplicações para o sistema de armazenamento de energia para o sistema de geração distribuída no Brasil. Será feita uma análise a partir das atuais tecnologias de armazenamento, as possíveis melhorias serão identificadas, assim como possíveis dificuldades para a implementação de tal tecnologia.

5.1 Aplicação de baterias de íon lítio em parques eólicos

Analisando o nordeste brasileiro, observa-se que a transição para o uso de fontes elétricas mais sustentáveis já é realidade. Atualmente, cerca de 50% da matriz energética dessa região é fornecida por fontes renováveis. O ponto chave para a autonomia energética dessa região seria por meio da implementação de projetos de armazenamento de energia.

As baterias de íon lítio poderiam ser empregadas com o intuito de armazenar o excedente de energia da rede. Conforme apresentado no capítulo 3, essas baterias são caracterizadas por sua alta densidade de energia (W.h/Kg), e, também pela ausência do efeito memória. Essa última característica possibilita o seu carregamento ou descarregamento parcial sem resultar em danos aos equipamentos.

Desde 1991, quando a Sony lançou a primeira bateria comercial de íon de lítio, que esse equipamento vem sendo aperfeiçoado e estudado. Atualmente, a empresa americana Tesla Motors vem dominando o uso dessa tecnologia de armazenamento de energia, tornando mais viável economicamente o uso dessas baterias para a captura do excedente de energia da rede.

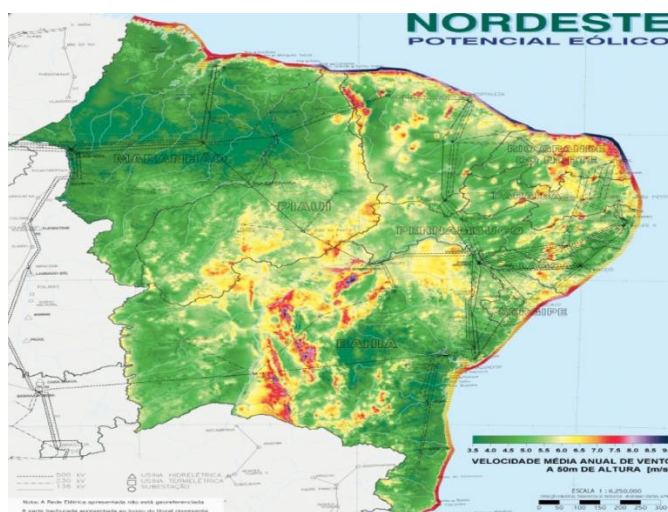
Na Austrália, por exemplo, foi instalado em dezembro desse ano a maior estrutura de bateria de íon lítio do mundo com capacidade para abastecer 300 mil domicílios. (O globo, 2017). Esse projeto faz parte do plano do governo da Austrália Meridional para tornar o estado independente da rede elétrica nacional. Essa usina está instalada em um parque eólico com 99 torres eólicas, e apresenta uma potência elétrica de 70 megawatts e durou cerca de 60 dias para a implementação. Para o desenvolvimento de grandes projetos de armazenamento, a Tesla criou sistemas integrados de bateria, *powerpack*, que apresentam a capacidade de carga de até 200 KWh, a custo de 398 US\$ por kWh.

Um outro grande projeto de armazenamento de energia foi o desenvolvido pela *Southern California Edison (SCE)*, em Tehachapi, California. Esse sistema é constituído por sistemas de bateria de íon lítio com capacidade de carga de 32 MWh, onde é gerado 4.500 MWh de energia por fontes eólicas. Esse projeto foi considerado um marco para a integração de sistemas de armazenamento de energia utilizando baterias de íon lítio em conexões *smart grids*. (Edison, 2012).

A partir dessas informações, observa-se que é viável o emprego das baterias de íon lítio em grandes projetos de distribuição no país, principalmente no Nordeste. Considerando o atual cenário de crescimento das gerações de energia por meio de fontes eólicas, e o enfraquecimento da geração hidrelétrica por conta da forte seca ao longo dos últimos anos, observa-se, porém, que a transição para o uso predominante de energia a partir de fontes renováveis só será finalizada a partir da garantia da segurança da rede.

Usinas de bateria de íon lítio instaladas próximas a parques eólicos na região, poderiam garantir a confiança e a qualidade no fornecimento de energia à rede. Com o intuito em reduzir o custo do investimento, recomenda-se a instalação de tais equipamentos em áreas próximas a linhas de transmissão e em que apresentam relativo potencial de geração eólica, áreas vermelhas da Figura 14.

Figura 14: Mapa do potencial de geração eólica do Nordeste.



Fonte: Freitas; Souza, 2015.

Tomando como exemplo o Complexo Eólico do Alto do Sertão I, localizado em Caetitê (BA), com capacidade de 293,6 MW, a tecnologia de armazenamento iria ajudar a reduzir o *gap* de 2.000 MW (Figura 2 e 3) da dependência do subsistema Nordeste em relação aos outros subsistemas, o que resultaria em maior autonomia para esse sistema.

Uma das principais dificuldades de implementação de projetos de bancos de bateria para armazenamento de energia é o controle de temperatura de operação ($25^{\circ} - 27^{\circ}\text{C}$). Para o caso da bateria de lítio da Tesla, a questão do controle de temperatura não seria um problema, pois a faixa de temperatura de operação é em torno de -20°C a 43°C . Para o caso de temperaturas extremas de operação, o próprio excedente de energia poderia ser utilizado para o resfriamento da temperatura do sistema por meio do acionamento de sistemas de refrigeração. (Novak, 2015).

5.2 Aplicação de UHR para o armazenamento de energia

Segundo estudo do MWH Global para o U.S. Corps of Engineers da região do Pacífico Noroeste dos Estados Unidos, o valor limite de integração da energia eólica à rede sem o uso de sistemas de *backup* é equivalente a 15-20%. É claro que esse valor irá depender do quão integrado é a rede em estudo, porém, para valores acima desse limite, oscilações na rede começarão a aparecer no sistema, logo, não será garantido o controle do sistema em questão. (Pessôa, 2013)

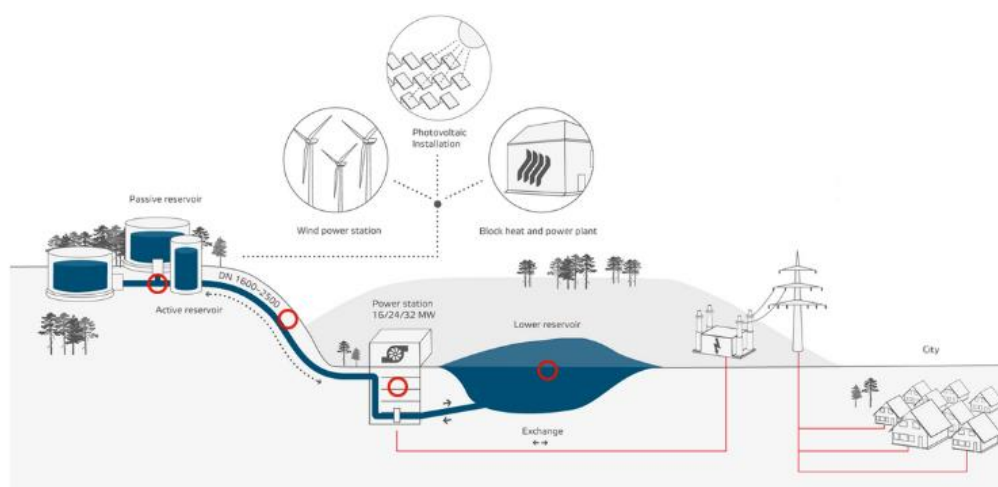
Uma segunda aplicação para sistemas de armazenamento de energia no Brasil seria por meio da instalação de Usinas Hidroelétricas Reversíveis. O desenvolvimento dessa tecnologia iria ajudar a regular o controle dos níveis dos reservatórios de água no país, pois o excedente de energia resultante na rede seria utilizado para bombear a água para um reservatório mais elevado. Apesar dos impactos resultantes da inundação de áreas recorrentes a criação de lagos, a implementação de tal projeto poderia ocorrer em regiões específicas que não resultaria em grandes impactos ambientais, tais como perto de represas de água.

Como a capacidade de armazenamento dessas usinas é na escala de GW, e, a rapidez para passar do bombeamento para a turbina, essa usina iria desempenhar um papel fundamental na regulação energética do sistema como um todo. Além disso, essa instalação poderia ser instalada ao lado de parques eólicos, o que garantia uma certa confiança em relação ao fornecimento de energia, pois a UHR iria armazenar o excedente de energia, e iria fornecer esse excesso quando houvesse a necessidade.

Na Alemanha, na cidade de Gaildorf, está sendo desenvolvido uma tecnologia de armazenamento parecida com o que foi descrito acima. 2 grandes reservatórios foram construídos do lado da mais alta turbina eólica do mundo (178 metros) para bombear o excedente de energia. Após o término da construção em 2018, esse projeto terá a capacidade de gerar 10 gigawatt-hora de energia, o suficiente para atender uma comunidade de 2,5 mil famílias. (Ciclo Vivo, 2017).

Na Figura 15, há a representação do modelo proposto. O reservatório superior iria armazenar o excedente de energia da rede por meio do bombeamento da água. Dependendo do porte do reservatório superior, é possível construir em diferentes escalas a estrutura de armazenamento.

Figura 15: Modelo proposto de integração entre eólica e UHR



Fonte: Ciclo Vivo, 2017.

O custo é o ponto negativo para a implementação de tal projeto, as UHR apresentam a maior taxa de US\$/kW quando é comparada com outras diferentes tecnologias de armazenamento de energia. O custo para a implementação de tal projeto é de 4500 US\$/kW. Apesar desse alto valor, dependendo da formação geológica do local a ser destinado para a implementação, esse custo pode ser reduzido drasticamente (REGET, 2015).

5.3 Aplicação de *Smart Grid* para projetos de armazenamento de energia

Sistemas de *Smart Grids* é o futuro das novas formas de transmissão e distribuição de energia. Caracterizados por um complexo sistema de integração da rede. Essa tecnologia é constituída por 3 blocos: automação da distribuição, medição e sensoriamento inteligente e geração distribuída com armazenamento de energia.

Nesse cenário, a estrutura de armazenamento de energia iria desempenhar o papel de *back-up* da malha de controle do sistema para os casos de necessidade. Dependendo da situação, seria necessária uma resposta rápida e intensa do sistema, ou uma resposta mais lenta, porém de grande volume à rede.

Para a implementação de grandes projetos de armazenamento de energia cria-se a necessidade da alta integração dos sistemas para a detecção de falhas, ou divergências na qualidade de energia da rede. Caso seja detectado alguma anomalia, o sistema deverá se auto-regenerar imediatamente para, assim, não causar grandes impactos no nível de serviço da energia ofertada para os usuários.

Para a implementação de projetos mais robustos de armazenamento de energia é preciso a comunicação integrada entre tais medidores para a realização do mapeamento do sistema

como um todo, não só local. O principal desafio para a implementação de tal projeto é justamente referente a manipulação dessa base de dados, visto que o sistema precisa processar e responder de forma instantânea para não resultar em falha na rede.

Outra função a ser desempenhada pelo sistema de *smart grid* será em relação ao levantamento da Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST), na qual a partir do valor calculado de uso da rede, o sistema de armazenamento receberá um comando para injetar ou para armazenar energia, com o intuito de reduzir a tarifa.

Tomando como base a atual tendência de crescimento da matriz energética do subsistema Nordeste do SIN, observa-se que ao longo dos próximos 10 anos a geração de energia será basicamente constituída por fontes renováveis. Para contornar o problema da intermitência de energia e garantir segurança no fornecimento de energia, será necessário investir na instalação de tecnologias de armazenamento de energia.

Para a realização desses grandes projetos de armazenamento de energia, se torna necessário o cálculo da necessidade em tempo real da energia. Só por meio de tecnologias de *smart grids* que será possível a utilização de tais propostas de projeto. Tendo como um dos principais desafios a aplicação de tal tecnologia em sistemas de grande porte.

6. Conclusão

Com a realização desse trabalho, se permitiu constatar a necessidade de investimento em dispositivos que garantam a confiabilidade, a segurança e a qualidade no fornecimento de energia devido ao crescimento da quantidade de instalações de energias solares e fotovoltaicas no Brasil. Essas instalações foram responsáveis, em 2017, por 7 % da geração de energia no país. Observou-se também que o desenvolvimento dessas fontes estará saturado em relação a segurança de suprimento de energia quando a participação na matriz energética no Brasil corresponder a 20%. A partir do estudo bibliográfico realizado, observou-se que a tecnologia de armazenamento de energia será capaz de suprir a demanda temporária de energia da rede, funcionando, assim, como fonte de *backup*.

Essa técnica irá impactar positivamente o mercado de geração de energia nos próximos anos, virando a chave das fontes fotovoltaicas e eólicas na questão da atuação como fonte principal de fornecimento de energia. Apesar desse potencial, ainda os investimentos em armazenamento de energia no Brasil são tímidos, principalmente devido ao alto preço para a construção de tais projetos, em média R\$ 3.000 O kWh de energia armazenado. A fabricante americana *Tesla Motors* vem rompendo barreiras com modelos comerciais de bancos de baterias de íon lítio (“*powerpacks*”) com capacidade de 10-200 kWh, esse desenvolvimento possibilitou, assim, a viabilidade econômica de tais projetos. A grande quantidade de aplicação dessa tecnologia irá impulsionar também o desenvolvimento desses projetos de armazenamento de energia. Esses sistemas podem ser construídos para auxiliar o acionamento de máquinas industriais, ou de veículos elétricos, para a alimentação em redes de médio ou de grande porte, ou para o controle da frequência e da tensão da rede.

O desenvolvimento de redes inteligentes (“*smart grids*”), também, irá impulsionar o setor de armazenamento, pois permitirá a maior integração da rede de energia, por meio da utilização de sensores e de medidores inteligentes. Assim, serão mapeadas tanto as falhas, como as demandas de carga na rede. Essa tecnologia irá resultar também em maior controle da qualidade de energia do sistema, garantindo um melhor nível de serviço de atendimento para as concessionárias.

Por fim, conclui-se que é viável a utilização de tais projetos no Sistema Interligado Nacional (SIN), visto que a falta de armazenadores de energia poderia ser um entrave para o crescimento das fontes solares e eólicas no Brasil. Projetos de armazenamento de energia por meio do bombeamento de água, ou do armazenamento eletroquímico em baterias de níquel ou fluxo-redox são os que apresentam o maior potencial de aplicação, sendo a escolha do potencial de instalação e de localização da rede os principais critérios de escolha.

Portanto, apesar de ainda não serem tão presentes no atual mercado de geração de energia do país, conclui-se que o próximo passo para a consolidação das fontes alternativas será a implementação de tais projetos de armazenamento de energia em média e larga escala.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como futuros trabalhos, sugere-se a aplicação de análises financeiras, *paybacks*, para a implementação de tecnologias de armazenamento de energia no Brasil. Assim como, o desenvolvimento de estudos de integração de diferentes tecnologias de armazenamento, com o intuito de potencializar o uso dessa tecnologia, ou mesmo a questão de legislação para a instalação de tais projetos.

Referências

- [1] Sterner, Michael, Stadler, Ingo; “Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration”; Springer, 2014.
- [2] Leão, Rafael “Isso não é uma revolução” <<https://economiasdeservicos.com/2017/03/09/isso-nao-e-uma-revolucao/>>2017 – Acessado em 10/06/2017.
- [3] Leoni, P.; Carvalho, C.; Abreu, L.; Barbosa, D.; “Projeto híbrido eólico-solar” – Edição 134 - O Setor Elétrico, 2017.
- [4] Retorta, F.; Teixeira, M.; Block, P.; Donadon, A.; Schumacher, R.; Camargo, J.C.; “Tecnologia Fotovoltaica – Avaliação Econômica de diferentes tecnologias com bancos de baterias” – Edição 135 - O Setor Elétrico, 2017.
- [5] ABEEÓLICA. “Boletim Anual de Geração Eólica” <http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/05/424_Boletim_Anual_de_Geracao_Eolica_2016_Alta.pdf>2016 – Acessado em 10/08/2017.
- [6] Krishnan, A. “Capacitance Calculation using EMS for SolidWorks” <<https://www.emworks.com/blog/capacitance-calculation/capacitance-calculation-ems-solidworks>>2017 – Acessado em 10/08/2017.
- [7] Barbosa, E. “Implantação de Pontos de Recarga para Veículos Elétricos na Cidade de Belo Horizonte” <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgboAAG/implantacao-pontos-recarga-veiculos-eletricos-na-cidade-belo-horizonte>> 2014 – Acessado em 10/08/2017.
- [8] Bocchi, N.; Ferracin, L.C.; Biaggio, S.R. “Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental” <http://qnint.sbq.org.br/qni/popup_visualizarConceito.php?idConceito=45&semFrame=1> 2014 – Acessado em 10/08/2017.
- [9] Botelho, F. K.; Dutenkefer, R.; Mello, J.C.; Mendes, R.; “Utilização de Baterias na Distribuição com a Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída – Avaliação do Impacto” – Edição 141 - O Setor Elétrico, 2017.
- [10] Cardwell, D.; Krauss, C. “A Big Test for Batteries” <<https://www.nytimes.com/2017/01/14/business/energy-environment/california-big-batteries-as-power-plants.html>> 2017 – Acessado em 12/09/2017.
- [11] ABB. “ABB Ability for Virtual Power Plants (VPP)” <<http://new.abb.com/abb-ability/utilities/virtual-power-plants>> 2017 – Acessado em 12/09/2017.
- [12] Karoff, P. “Organic Mega Flow battery promises breakthrough for renewable energy” <<https://www.seas.harvard.edu/news/2014/01/organic-mega-flow-battery-promises-breakthrough-for-renewable-energy>> 2017 – Acessado em 12/09/2017.
- [13] Conca, J. “Vanadium-flow batteries: The Energy Storage Breakthrough We’ve need” <<https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2016/12/13/vanadium-flow-batteries-the-energy-storage-breakthrough-weve-needed/#dcd93e95bde8>> 2017 – Acessado em 17/09/2017.

- [14] Zuculin, S.; Pinto, M.A.R.R.; Barbosa, P.S.F. “A Retomada do Conceito de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Setor Elétrico Brasileiro” <http://www.eletronorte.gov.br/opencms/export/sites/eletronorte/seminarioTecnico/arquivos/Artigo_UHR_zuculin_mirian_paulo_SEMINARIO_ELETRONORTE_nov_2014.pdf> 2016 – Acessado em 17/09/2017.
- [15] Canales, F.A.; Beluco, A.; Mendes, C.A.B. “Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil e no Mundo: Aplicação e Perspectivas”. <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/16002/pdf>> 2015 – Acessado em 17/09/2017.
- [16] Carrington, D. “‘Spetacular’ drop in renewable energy costs leads to record global boost”. <<https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/06/spectacular-drop-in-renewable-energy-costs-leads-to-record-global-boost>> 2015 – Acessado em 17/09/2017.
- [17] Sinimbu, D. “Para onde caminha a geração de energia do Brasil”. <<http://www.ebc.com.br/especiais/energias-renovaveis>> 2017 – Acessado em 17/09/2017.
- [18] Fontes, R. “O avanço da Energia Solar no Nordeste do Brasil”. <<http://blog.bluesol.com.br/energia-solar-no-nordeste/>> 2017 – Acessado em 17/09/2017.
- [19] Agência Brasil. “Eólicas respondem por 60% do abastecimento de energia do Nordeste”. <<http://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2017/08/eolicas-respondem-por-60-do-abastecimento-de-energia-do-nordeste-diz-ons.html>> 2017 – Acessado em 17/09/2017.
- [20] Chesf. “Sistema de Transmissão no Brasil”. <<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaTransmissao/SistemaTransmissao.aspx>> 2017 – Acessado em 17/09/2017.
- [21] EPE. “Estudos para a Expansão da Transmissão”. <[http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/PET_PELP_Ciclo%202017_2o_Semestre%20\(06-09-17\).pdf](http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/PET_PELP_Ciclo%202017_2o_Semestre%20(06-09-17).pdf)> 2017 – Acessado em 17/09/2017.
- [22] Barifouse, R; Schreiber, M. “Como o Nordeste virou principal polo da energia eólica no Brasil”. <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/11/151110_energia_eolica_nordeste_rb> 2017 – Acessado em 17/09/2017.
- [22] Cabral, B. “Geração Eólica no Ceará vai saltar 44% nos próximos anos”. <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/geracao-eolica-no-ceara-vai-saltar-44-nos-proximos-anos-1.1828648>> 2017 – Acessado em 17/09/2017.
- [23] Empresa de Pesquisa Energética (EPE); 2014. “Plano Decenal de Expansão de Energia 2023”. <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023_ConsultaPublica.pdf> 2014 – Acessado em 17/09/2017.

[24]Eberspacher, G. “WWF divulga estudo sobre fontes alternativas de energia elétrica”<
<http://atitudesustentavel.com.br/blog/2012/08/27/wwf-divulga-estudo-sobre-fontes-alternativas-de-energia-eletrica/>> 2012 – Acessado em 17/09/2017.

[25] Oliveira, C. “Sistema de Recomposição Automática Aplicado a Redes de Distribuição de Energia”http://www.academia.edu/8091261/Artigo_SRA_-_XXI_SENDEI 2014 – Acessado em 17/09/2017.