

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**

**LEONARDO PIAZZON COLLIS**

**Armazenamento de Energia Elétrica:  
Estudo de viabilidade das tecnologias disponíveis para aplicação  
em larga e baixa escalas integrados à sistemas de geração de  
energia renovável**

**São Paulo**

**2018**

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**

**LEONARDO PIAZZON COLLIS**

**Armazenamento de Energia Elétrica:  
Estudo de viabilidade das tecnologias disponíveis para aplicação  
em larga e baixa escalas integrados à sistemas de geração de  
energia renovável**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Especialista em Energias Renováveis,  
Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Armazenamento de  
Energia

Orientador: Prof. Dr. José R. Simões Moreira

**São Paulo**

**2018**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

Collis, Leonardo

Armazenamento de Energia Elétrica: Estudo de viabilidade das tecnologias disponíveis para aplicação em larga e baixa escalas integrados à sistemas de geração de energia renovável / L. Collis -- São Paulo, 2018.

74 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.armazenamento de energia 2.intermitência 3.energia renovável  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, pelo apoio e incentivo em alcançar mais uma etapa da vida acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à Deus, pelas tantas oportunidades e conquistas alcançadas ao longo de minha trajetória pessoal, profissional e acadêmica.

Agradeço aos meus pais Generoso e Angela pela incondicional dedicação em minha educação e formação.

Agradeço ao meu irmão Gustavo, pelo companheirismo e incentivo.

Agradeço à minha companheira Bruna por toda a ajuda e enorme incentivo desde a inscrição para a especialização até a conclusão desse trabalho.

## EPÍGRAFE

*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”*

Chico Xavier

## RESUMO

Armazenar energia elétrica só é possível através da conversão de energia elétrica em outro tipo de energia, seja mecânica, química, térmica, potencial, e com a posterior realização do processo inverso. A realização desse processo é desafiador e custoso, o que também torna a presença de sistemas de armazenamento de energia ainda pouco expressivos globalmente. Porém tais sistemas podem ser muito úteis para a rede, ajudando por exemplo na regulação de tensão e frequência além da possibilidade de deslocamento e minimização dos custos da energia nos horários onde a demanda atinge seu pico. Existe ainda a grande capacidade da integração com os sistemas de energia renovável, buscando a minimização das intermitências de geração causadas por variações meteorológicas, no caso de geração solar e eólica.

Essa dissertação tem por objetivo analisar as tecnologias existentes relacionadas ao armazenamento de energia elétrico, tanto em baixa quanto larga escalas para aplicação no cenário nacional. Em larga escala, o objetivo é a busca pela aplicação na contenção da intermitência de usinas com geração à partir de renováveis (solar e eólica), enquanto em baixa escala, a análise será realizada através do armazenamento de energia de pequenos consumidores, como residências quando integrados à sistemas de geração de energia por painéis solares.

Palavras-chave: armazenamento de energia, intermitência, energia renovável.

## **ABSTRACT**

Electricity storage is only possible through the conversion of electricity energy into other energy forms, as mechanical, chemical, thermal, potential, and after the inverse process. This is a challenging as costly process, what makes the presence of energy storage systems not much expressive globally. However, that system can be very useful to the power grids, helping on the voltage and frequency regulation beyond the possibility of load shifting and energy cost reductions, when the demand reaches the peak. There is also the very expressive capacity of integration with renewables, looking for minimization of intermittences caused by meteorological variations, solar and wind generation.

This study has the goal to analyze the existing available technologies related to the electric energy storage, in small and large scales for actual national scenario. In large scale, the main goal is the application in intermittence contention (solar and wind farms), while in small scale the analyses is focused in energy storage for end customers, as residential where PV solar panels are present.

Key words: energy storage, intermittence, renewable energy

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aplicações dos Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica .....	16
Figura 2.1 – Capacidade global de armazenamento de energia por tecnologia .....	18
Figura 2.2 – Necessidades do armazenamento de energia elétrica .....	20
Figura 2.3: Custos de instalação e eficiência por tecnologia de armazenamento e custos em 2016, em relação à tendência em 2030 .....	21
Figura 3.1 – Serviços que o armazenamento de energia pode proporcionar .....	24
Figura 3.2 – Capacidade global de armazenamento por tecnologia e aplicação.....	27
Figura 3.3 – Capacidade de armazenamento de energia por tecnologia .....	28
Figura 3.4 – Diagrama esquemático CAES diabático .....	32
Figura 3.5 – Diagrama esquemático CAES adiabático .....	33
Figura 3.6 – Esquema de uma usina hidrelétrica reversível .....	34
Figura 3.7 – Componentes principais, sistema de armazenamento volante de inércia.....	35
Figura 3.8 – Esquemático armazenamento, baterias de fluxo .....	42
Figura 3.9 – Diagrama de blocos simplificado de um sistema SMES.....	45
Figura 3.10 – Fluxo de energia com armazenamento por H <sub>2</sub> .....	47
Figura 3.11 – Comparativo entre tecnologias de armazenamento e energia: tempo de descarga versus capacidade de armazenamento .....	48
Figura 3.12 – Comparativo entre tecnologias de armazenamento e energia: densidade de potência versus densidade de energia .....	49
Figura 4.1 – Geração de energia eólica, deslocamento da demanda .....	52
Figura 5.1 – Instalação dos sistema de armazenamento 30MW/120MWh, Escondido, Califórnia.....	56
Figura 5.2 – Matriz elétrica do Estado da Califórnia entre 2001 e 2017.....	57
Figura 5.3 – Mapa de Irradiação Solar no território brasileiro.....	59
Figura 5.4 – Mapa do Potencial Eólico no território brasileiro.....	59
Figura 5.5 – Ilustração de container de armazenamento de energia 2,1MW.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens – CAES .....	33
Tabela 3.2 – Vantagens e desvantagens – PHS .....	34
Tabela 3.3 – Vantagens e desvantagens – Volantes de inércia .....	35
Tabela 3.4 – Vantagens e desvantagens – Baterias de chumbo-ácido .....	37
Tabela 3.5 – Vantagens e desvantagens – Baterias de níquel-cádmio .....	38
Tabela 3.6 – Vantagens e desvantagens – Baterias de lítio-íon .....	39
Tabela 3.7 – Vantagens e desvantagens – Baterias de sódio-enxofre .....	40
Tabela 3.8 – Vantagens e desvantagens – Baterias de metal-ar .....	41
Tabela 3.9 – Vantagens e desvantagens – Baterias de fluxo .....	43
Tabela 3.10 – Vantagens e desvantagens – Supercapacitores .....	43
Tabela 3.11 – Vantagens e desvantagens – SMES .....	45
Tabela 3.12 – Vantagens e desvantagens – Hidrogênio .....	47
Tabela 3.13 – Características das tecnologias .....	50
Tabela 5.1 – Características elétricas e dimensionais - EssPro Grid-Compact .....	61
Tabela 5.2 – Custos estimados para Implantação, Operação e Manutenção de uma usina termelétrica à gás natural de ciclo combinado.....	62
Tabela 5.3 – Custos estimados para Implantação, de um sistema de armazenamento de energia à bateria de lítio.....	63
Tabela 5.4 – Valor das tarifas de energia elétrica da concessionária EDP.....	65
Tabela 5.5 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa convencional.....	65
Tabela 5.6 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa convencional, com sistema fotovoltaico.....	66
Tabela 5.7 – Payback do investimento do sistema fotovoltaico – tarifa convencional.....	66
Tabela 5.8 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa branca.....	66
Tabela 5.9 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa branca, com sistema fotovoltaico.....	67
Tabela 5.10 – Payback do investimento do sistema fotovoltaico – tarifa branca.....	67

Tabela 5.11 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa branca, com sistema de armazenamento de energia.....	68
Tabela 5.12 – Payback do investimento do sistema de armazenamento – tarifa branca.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA-CAES	Advanced Adiabatic Compressed Energy Storage
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CAES	Compressed Air Energy Storage
CSP	Concentrating Solar Power
DOD	Depth of Discharge
EDLC	Electrochemical Double-Layer Capacitors
ESS	Electricity Storage System
GN	Gás Natural
GWEC	Global Wind Energy Council
HSP	Horas de Sol Pleno
IRENA	International Renewable Energy Agency
kW	Quilolowatt
MPa	MegaPascal
MW	Megawatt
MME	Ministério de Minas e Energia
NiCd	Nickel Cadmium
PV	Photovoltaic
PHS	Pumped Hydro Storage
PTES	Pumped thermal energy storage
NaS	Sodium Sulphur
O&M	Operação e Manutenção
PSB	Polysulfide Bromide Battery
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
TES	Thermal Energy Storage
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
T&D	Transmissão e Distribuição

UPS Uninterruptible Power Supply

VRB Vanadium redox battery

VRE Variable Renewable Energy

ZBB Zinc Bromine Battery

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. PANORAMA DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....</b>	<b>18</b>
2.1. Armazenamento de Energia: Panorama Global .....	18
2.2. Armazenamento de Energia: Mercado .....	19
2.3. Armazenamento de Energia: Indústria.....	21
<b>3. OS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....</b>	<b>24</b>
3.1. Avaliação dos Sistemas de Armazenamento de Energia .....	28
3.2. Armazenamento de Energia Mecânica .....	31
<b>3.2.1. CAES.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2. Bombeamento Hidráulico (PHS) .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.3. Volante de Inércia (Flywheel) .....</b>	<b>34</b>
3.3. Armazenamento Térmico .....	35
3.4. Armazenamento Eletroquímico .....	36
<b>3.4.1. Baterias.....</b>	<b>36</b>
<b>3.4.2. Supercapacitores .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.3. Supercondutores Eletromagnéticos (SMES) .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.4. Hidrogênio.....</b>	<b>45</b>
3.5. Análise Comparativa das Tecnologias .....	47
<b>4. ESTUDO DE VIABILIDADE .....</b>	<b>51</b>
4.1. Aspectos Técnicos .....	51
<b>4.1.1. Larga Escala .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.2. Baixa Escala.....</b>	<b>53</b>
4.2. Aspectos Econômicos .....	54
<b>5. ESTUDO DE CASO 1: APLICAÇÃO EM LARGA ESCALA NO NORDESTE BRASILEIRO.....</b>	<b>56</b>
5.1. Modelo: Escondido, Califórnia – EUA .....	56
5.2. Aplicação no Brasil – Situação Problema.....	58
<b>5.2.1. Definição Técnica.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2.2. Viabilidade Financeira.....</b>	<b>62</b>
<b>6. ESTUDO DE CASO 2: APLICAÇÃO EM BAIXA ESCALA - RESIDENCIAL.....</b>	<b>64</b>
6.1. A Tarifa Branca.....	64

<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por energia tem levado à buscas por novas tecnologias de geração, mais limpas, eficientes e menos poluidoras. O Brasil destaca-se positivamente por sua matriz elétrica ter base renovável, principalmente hidroelétrica, representando expressivos 62,1% de toda energia elétrica gerada no país (MME, 2018). De qualquer modo a expansão do sistema elétrico através da construção de grandes novas usinas hidroelétricas causa um grande impacto ambiental e social, e também por essa razão, já não é mais a solução a ser empregada na ampliação da capacidade de geração e na segurança do sistema elétrico. Como alternativa temos, já há algum tempo, a geração de energia elétrica através de usinas eólicas e solares, que estão em larga expansão pelo grande potencial que possuem, estima-se por exemplo que até o fim de 2022 teremos mais 5.112MW, (adicionado aos 12.763MW de hoje, 2017) de capacidade instalada nos parques eólicos a serem construídos e comissionados (GWEC, 2017).

A partir de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2012). Assim torna-se ainda maior e acessível o potencial de geração de energia a partir de fontes renováveis, inclusive para o “consumidor final”.

Temos, portanto, de um lado grandes usinas de geração, seja solar ou eólica, gerando energia da ordem de dezenas de megawatts, de outro pessoas que podem investir em mini e microgeração gerando algumas unidades ou dezenas de quilowatts, para minimizar o custo de energia pago à concessionária local, ou mesmo para tornar-se autossuficiente.

Em ambos os casos, a geração está intimamente ligada às condições climáticas da região onde os empreendimentos são instalados, além da questão da sazonalidade de um determinado período do ano, o que pode influir na velocidade e constância dos ventos, no caso de geração eólica, ou no índice de radiação, no caso de geração solar.

Devido à intermitência, variação e imprevisibilidade dos recursos, característicos de fontes renováveis intermitentes como a solar e eólica, torna-se mais difícil a compatibilização dessas fontes com as demandas dos sistemas de distribuição, se

comparada com as fontes despacháveis. É nesse cenário onde as tecnologias de armazenamento de energia podem atuar para regularizar o fluxo de energia momentâneo, a qualidade, ou mesmo funcionar em ciclos de carga e descarga em diferentes períodos, aumentando a confiabilidade e autonomia dos sistemas de geração por fontes renováveis intermitentes.

Diante do atual cenário nacional, esse trabalho tem por objetivo apontar as tecnologias mais adequadas para a interação do armazenamento de energia elétrica com a geração renovável como tendência para efetiva aplicação em massa no decorrer dos anos, à medida que as tecnologias são aprimoradas, os preços tornando-se cada vez mais acessíveis e barreiras sendo rompidas. Também são abordados pontos relativos à compatibilidade técnica para implementação, bem como aspectos econômicos.

Em larga escala, o objetivo é o de utilizar o armazenamento de energia em substituição à uma usina térmica à gás com capacidade instalada de até 20MW. O objetivo é que o armazenamento de energia minimize as intermitências de fontes renováveis (solar e eólica) na região Nordeste do Brasil, onde há a maior concentração desse tipo de geração de energia.

Para as instalações em baixa escala o objetivo é verificar a tecnologia mais adequada para o atendimento de uma capacidade instalada de uma residência com consumo médio adotado de 250kWh/mês, enquanto a média aritmética brasileira é de aproximadamente 150 kWh/mês, dados obtidos através EPE – Consumo Mensal por Classe (regiões e sistemas) (EPE, 2018).

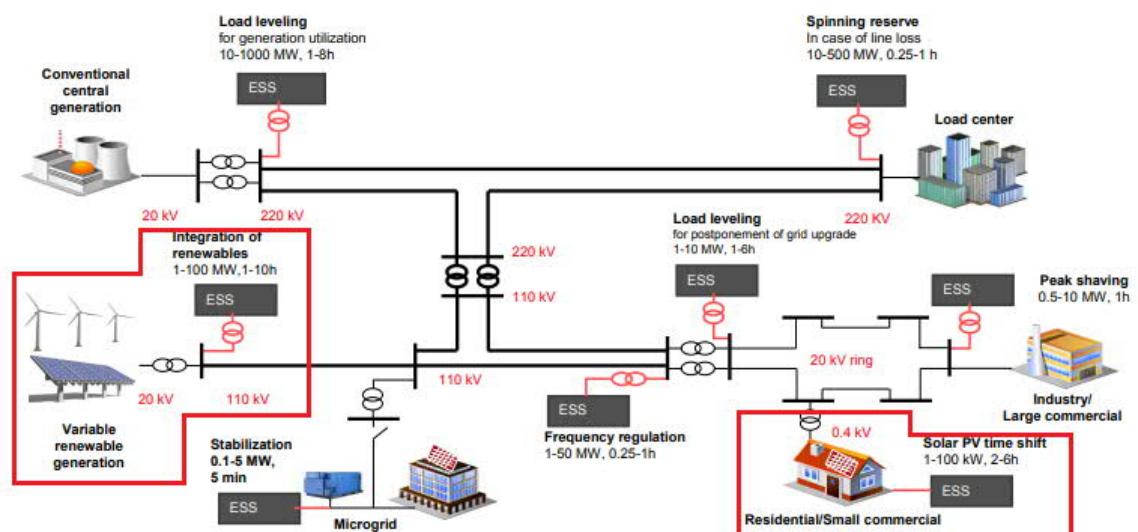


Figura 1.1: Aplicações dos Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica – Fonte: ABB, 2017.

A figura 1.1 ilustra, dentre as mais variadas aplicações no sistema elétrico, as aplicações que esse trabalho tem o objetivo de abordar.

## 1.2. METODOLOGIA E ESTRUTURAÇÃO

Esse trabalho é dividido em sete capítulos, incluindo a introdução. No capítulo 2 abordaremos o panorama dos sistemas de armazenamento, as situações do mercado e indústria, bem como os potenciais e barreiras para a aplicação dos sistemas de armazenamento.

No capítulo 3 faremos as definições das mais variadas aplicações de um sistema de armazenamento, independente da tecnologia aplicada. Definiremos ainda os critérios técnicos a serem avaliados na implementação de um sistema de armazenamento, e da metade do capítulo em diante descreveremos de forma sucinta as principais tecnologias para armazenamento de energia elétrica, apontando as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas.

No capítulo 4 abordaremos os aspectos técnicos e econômicos necessários para implantação de um sistema de armazenamento de energia elétrica em larga e baixa escalas. Ainda citaremos duas tecnologias mais adequadas para cada aplicação.

O capítulo 5 aborda um estudo de caso de armazenamento de energia elétrica, em larga escala, nos EUA com a proposta de aplicação no nordeste brasileiro em substituição à uma usina térmica à gás natural de ciclo combinado.

No capítulo 6 faremos um estudo de caso de aplicação do armazenamento de energia elétrica em baixa escala, em uma residência com consumo de 250kWh mensal, que aderiu à tarifa branca, em que o perfil é o de consumir grande parte da energia diária no horário de pico. Serão feitas ainda algumas comparações da tarifação convencional e tarifação branca considerando sistemas de geração de energia fotovoltaica e sistema de armazenamento de energia.

Enfim, no capítulo 7, teremos as conclusões e as considerações finais.

## 2. PANORAMA DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

### 2.1. PANORAMA GLOBAL

Armazenar energia, principalmente quando o consumo é menor que a capacidade de geração para uso posterior, significa consumir energia da forma mais racional possível. Ao longo dos anos tecnologias de armazenamento têm sido desenvolvidas e aprimoradas de modo que se reduza desperdícios de energia e também auxiliem na solução de problemas como intermitências e flutuações da rede (tensão, frequência).

Ainda hoje o armazenamento por bombeamento hidráulico é tecnologia mais madura, consolidada e que ainda possui a maior capacidade instalada de armazenamento de energia e geralmente menos é a menos custosa por unidade de energia armazenada (REN21, 2018). A figura 2.1 ilustra quão grande é a representatividade do bombeamento hidráulico frente às demais tecnologias existentes, tendo um percentual de mais de 99% de toda capacidade global de armazenamento de energia.

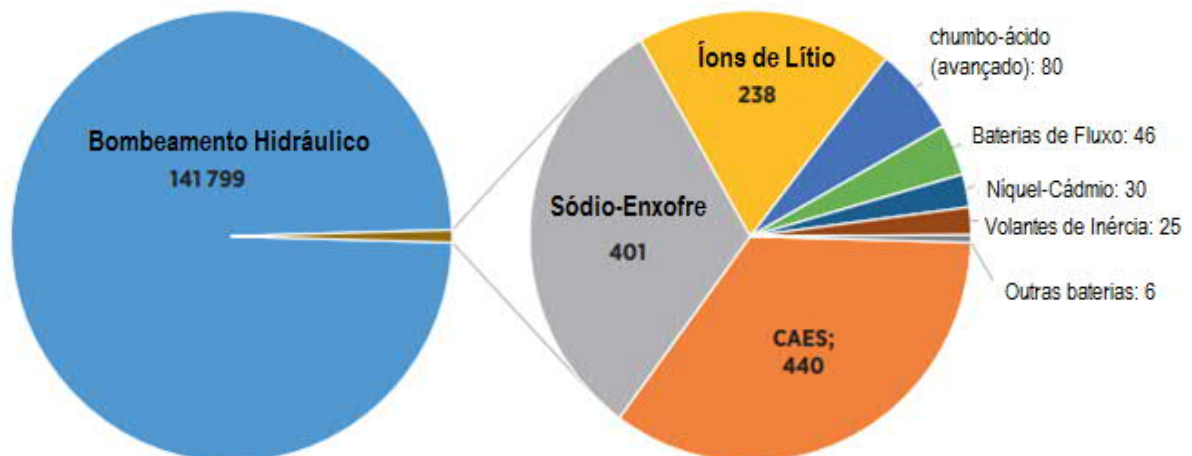


Figura 2.1: Capacidade global de armazenamento de energia por tecnologia, 2015 (em MW).

Fonte: IRENA, 2015- adaptado.

Porém sua instalação depende de questões geográficas para favorecer a utilização do reservatórios (superior e inferior) de modo que o bombeamento possa ser realizado com um balanço energético favorável, limitando de certa forma, sua aplicação em conjunto com as chamadas VREs (Variable Renewable Energy), devido ao fato de que quando a geografia favorece o armazenamento hidráulico, não necessariamente favorece ao mesmo tempo a instalação de usinas solares ou eólicas.

Somado a isso, mais de 75% da capacidade de armazenamento conectada à rede (incluindo armazenamento hidráulico) opera em apenas 10 países em 2017, e quase 50% em apenas 3 (China, Japão e os Estados Unidos) (REN21, 2018). Os países que detêm mais de 50% do armazenamento de energia global, são os que mais consomem e os que mais investem em geração de energia por fontes renováveis.

Os sistemas de armazenamento podem oferecer diversos serviços à rede, aumentando sua confiabilidade, reduzindo perdas, aumentando a eficiência, evitando até mesmo que novas usinas de geração de energia elétrica (sob as mais variadas fontes) sejam criadas.

## 2.2. MERCADO

O armazenamento de energia global ainda não está totalmente consolidado. Ainda existem barreiras políticas, culturais, econômicas e técnicas a serem superadas. De qualquer modo o crescimento observado nos últimos anos é bastante expressivo, impulsionado principalmente pelo crescimento da produção de energia elétrica através de fontes renováveis, que possuem suas limitações de intermitência, bem como pelo mais novo crescente mercado de mobilidade urbana, onde estão inclusos os trens, ônibus e carros movidos à eletricidade, que alavancam principalmente, o mercado de baterias.

A figura 2.2 a seguir, ilustra os desafios, as necessidades e tendências do armazenamento de energia elétrica a serem alcançados nas próximas décadas, nos diferentes setores do mercado. Destacado em vermelho, temos os dois seguimentos da qual esse trabalho tem foco, sendo a integração com as energias renováveis VREs, bem como o consumidor final, já em menor escala.



Figura 2.2: Necessidades do Armazenamento de Energia Elétrica. IRENA, 2017 - adaptado.

Podemos observar que nos dias de hoje a integração do armazenamento de energia com as VREs se apresenta, ainda, de forma pouco expressiva no auxílio da constância do fornecimento de energia, bem como no deslocamento da demanda em horários de ponta. A tendência é que esse cenário se transforme nas próximas décadas de forma que os sistemas de armazenamento de energia integrados à fontes renováveis possam ter a capacidade de manter o fornecimento de energia de forma mais constante possível, (de acordo com a capacidade instalada de determinada usina, seja solar ou eólica), onde tais sistemas poderão ter capacidade de armazenamento por dezenas de horas e até mesmo dias, reduzindo assim as intermitências das VREs (no caso solar e eólica).

Hoje a utilização de painéis fotovoltaicos em residências já é uma realidade. Os preços estão caindo consideravelmente, tornando a tecnologia cada vez mais competitiva e eficiente, além de ter sido alavancada, também, pela regulação da geração distribuída no Brasil, o que irá impulsionar ainda mais a integração dos painéis fotovoltaicos com sistema de armazenamento, principalmente por baterias nos próximos anos, popularizando assim tais sistemas.

Internacionalmente a Alemanha e os EUA lideram os mercados de aplicações de armazenamento de energia elétrica por baterias. Esse fato se deve pelas políticas regulatórias, a significativa queda de preços, as inovações tecnológicas e adequados modelos de negócios praticados nesses países (REN21, 2018).

### 2.3. INDÚSTRIA

O crescimento contínuo da demanda, têm levado à queda nos preços, com destaque para as baterias, em especial as de lítio, onde tendências recentes mostram a expansão massiva da capacidade de sua fabricação ao redor do mundo, tornando os produtos e sistemas mais acessíveis com o ganho de mercado.

A figura 2.3 ilustra a projeção dos preços das baterias em relação à eficiência, por tecnologia, até 2030. Observamos que há uma forte tendência na queda do custo de geração por kWh, podendo chegar até 80% em algumas tecnologias. Além disso a eficiência do sistema em si tende a crescer de modo relevante o que implica diretamente em retorno financeiro, uma vez que haverá um aproveitamento maior da energia armazenada (IRENA, 2017).

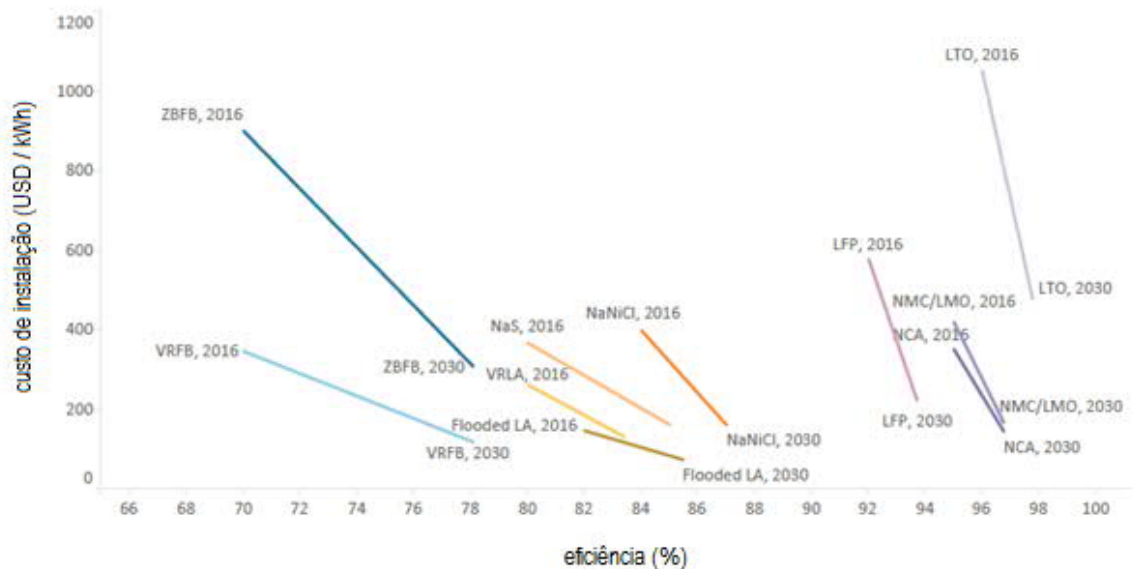


Figura 2.3: Custos de instalação e eficiência por tecnologia de armazenamento e custos em 2016, em relação à tendência em 2030 – Fonte: IRENA, 2017.

Esse avanço tecnológico, deve-se à indústria, que investe em pesquisa e desenvolvimento, buscando novos materiais e tecnologias.

Os recentes investimentos da Tesla na “Gigafactory 1” (fábrica de baterias de lítio localizada em Nevada, EUA), (TESLA, 2018) é um exemplo de como a indústria tem alcançado a evolução com bastante velocidade e significativa capacidade produtiva, fazendo com que as tecnologias se tornem cada vez mais acessíveis e presentes em nosso dia-a-dia.

Empresas de tecnologia como ABB e SAMSUNG também têm se voltado para o mercado de armazenamento de energia elétrica, com soluções para as mais variadas

aplicações de suporte ao sistema, utilizando basicamente baterias de lítio. A concessionária americana AES Company também tem focado seus investimentos no segmento, e já possui vários projetos executados principalmente nos EUA. No início de 2018, juntamente com a SIEMENS fundaram oficialmente a FLUENCE, com o objetivo de focar ainda mais nos projetos de armazenamento. Já contam com 75 projetos em 17 países, somando a expressiva marca de 701MW de energia elétrica armazenada (FLUENCE, 2018).

#### 2.4. POTENCIAL E BARREIRAS

A vasta aplicação técnica dos sistemas de armazenamento de energia na solução dos problemas da rede elétrica faz com que seu potencial de crescimento seja bastante significativo. Fatores como o aumento das tarifas de ponta, podem ajudar a impulsionar seu crescimento. O potencial porém, varia com as características e aplicações de cada uma das tecnologias existentes. Algumas delas ainda estão em fase inicial (laboratorial) de pesquisa e desenvolvimento, enquanto outras apesar de novas, já possuem instalações comerciais ainda que em menor escala. Observa-se ainda que algumas tecnologias têm seu potencial de crescimento limitado, não por razões de maturidade técnica, mas sim por restrições geográficas necessárias para sua implementação, sendo o caso por exemplo das usinas de armazenamento hidráulico.

Além disso existem barreiras que não são apenas técnicas. O termo barreira é amplamente definido como um problema que dificulta a implementação de tecnologias. Em alguns casos, uma barreira pode impedir a implantação; e em outros, pode limitar a implantação, limitar a receita ou limitar considerações para a implantação (COSTA E SILVA; BORTONI, 2016).

Em muitos casos as barreiras, quando não técnicas, estão associadas aos custos (barreiras econômicas) de implantação dos sistemas de armazenamento. Também existem no entanto barreiras adicionais relacionadas principalmente à regulação, o que desencadeia uma série de incertezas e riscos tanto para os investidores, tanto quanto para as concessionárias.

Diante disso é importante que haja incentivos não somente no desenvolvimento de novas tecnologias e na consolidação das existentes, mas também incentivos em pesquisa e desenvolvimento para as aplicações dos sistemas de armazenamento comercialmente, de forma com que as barreiras regulatórias sejam rompidas visando

o aumento da comercialização. Para que isso ocorra de forma satisfatória é necessário um esforço conjunto dos governos, indústria, universidades, centros de pesquisa, empresas, e da comunidade financeira (COSTA E SILVA; BORTONI, 2016).

Segundo FRANCO (2018), a massiva inserção de fontes intermitentes no sistema elétrico brasileiro, à exemplo de outros países com Portugal, pode representar certo risco ao sistema elétrico, pela insegurança e imprevisibilidade ao suprimento de energia. Nesse cenário o Brasil possui um grande potencial de armazenamento de energia elétrica, porém ainda não há projeto piloto, demonstrativo ou experimental comparável ao que se verifica no exterior (ANEEL, 2016). Porém a ANEEL pretende mudar esse cenário com através da chamada nº21/2016, (Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no setor Elétrico Brasileiro”), que é um programa de P&D que tem como objetivo o desenvolvimento de projetos para avaliação e inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro, de forma integrada e sustentável, e criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica, propriedade intelectual (patentes) e infraestrutura de produção nacional (ANEEL, 2017). Após as etapas iniciais de avaliação dos projetos, no início de 2017 a agência aprovou 23 propostas, sendo a maioria delas de concessionárias e distribuidoras de energia brasileiras, utilizando tecnologia desde baterias de lítio, até sistemas CAES em cavernas de sal. O prazo limite para conclusão dos trabalhos é 10/05/2021.

### 3. OS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas de armazenamento de energia cada vez mais possuem um papel importante para na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, provendo serviços que auxiliam de forma bastante significativa a confiabilidade, a qualidade da energia, equalização entre carga e demanda, além da utilização dos recursos energéticos e de infraestrutura de forma mais balanceada. Nesse cenário o armazenamento de energia pode ser empregado nos sistemas de transmissão, distribuição, além de sistemas isolados e mobilidade urbana, como ilustrado na figura 2.3:



Figura 3.1: Serviços que o armazenamento de energia pode proporcionar. Fonte: IRENA, 2017 - adaptado.

A seguir, temos as definições de tais possíveis serviços que os sistemas de armazenamento de energia podem oferecer ao sistema, excluindo as funções integradas com as renováveis, quadros em azul (SANDIA, 2010; IRENA, 2018):

- Regulação: Balanceamento entre geração e consumo;
- Reserva Operacional (*spinning/supplemental reserve*): *Spinning reserve* refere-se à capacidade de geração conectada ao sistema, porém sem carga que pode ser usada para compensar interrupções na geração ou transmissão. *Supplemental reserve* refere-se à capacidade de geração suplementar geralmente não sincronizada e não conectada ao sistema.

- Suporte Tensão (*voltage support*): Geração ou absorção de energia reativa para manter a tensão do sistema dentro dos parâmetros.
- *Black Start*: Capacidade de energizar parte do sistema sem ajuda adicional, após um apagão (*blackout*).
- Alívio do Congestionamento de Transmissão: linhas de transmissão podem ter sua capacidade de transmissão perto do limite em determinados horários. Os sistemas de armazenamento podem desafogar tais linhas, armazenando energia perto de centros de maior consumo, carregando o sistema fora do período de pico.
- Adiamento de Investimentos em T&D: Capacidade dos sistemas de armazenamentos de energia permitirem o adiamento novos investimentos em ampliação do sistema tanto em transmissão, quanto em distribuição, através do suprimento adicional de energia em épocas específicas do ano, por exemplo.
- Qualidade de Energia (*Power Quality*): Capacidade de manter forma de onda, estabilidade de tensão, harmônicos e fator de potência dentro dos parâmetros necessários para o adequado funcionamento do sistema.
- Gerenciamento da Demanda (*Demand Management*): alteração da demanda de energia consumida, com incentivos de consumo fora do horário de ponta, por exemplo com o objetivo de balancear o sistema através do armazenamento de energia.

Os quadros em vermelho da figura 2.3, expressam onde os serviços de armazenamento de energia podem suportar diretamente às energias renováveis, dentre os quais, os quadros vermelhos com moldura verde são objeto de estudo desse trabalho, a seguir temos as definições mais relevantes, relacionados à tais serviços:

- Deslocamento da demanda (*time shift*): consiste em consumir ou armazenar energia da rede quando o preço da energia é mais baixo, e usar ou vender quando os preços são mais altos.
- Capacidade de fornecimento (*Supply Capacity*): assim como no deslocamento da demanda, consiste em acumular energia quando não há congestionamento das linhas de transmissão, de forma garantir a capacidade de fornecimento de energia, principalmente quando é mais custosa.

- Confiabilidade de energia (*Power Reliability*): o armazenamento de energia pode prover maior confiabilidade no serviço de abastecimento de energia, fornecendo energia em casos de interrupção do sistema elétrico.
- Aumento do consumo de painéis solares: o armazenamento de energia pode fomentar o consumo de painéis fotovoltaicos pela possibilidade que o usuário final passa a ter de, ao menos diminuir, a dependência da energia fornecida pela concessionária.
- Sistemas residenciais de painéis solares: o armazenamento de energia pode fomentar o consumo de painéis fotovoltaicos pela possibilidade de autossuficiência do usuário final.
- Mini-sistemas – estabilidade dos serviços: estabilidade no fornecimento de energia em pequenos sistemas isolados.
- Mini-sistemas – integração com as VREs: maior facilidade de integração com fontes de energia renováveis em pequenos sistemas isolados.

As diferentes tecnologias de armazenamento possuem características intrínsecas que possibilitam ou limitam sua aplicação à um determinado serviço, seja na integração com o sistema elétrico ou na alimentação de veículos ou mesmo em sistemas isolados, como ilustra a figura 2.4:

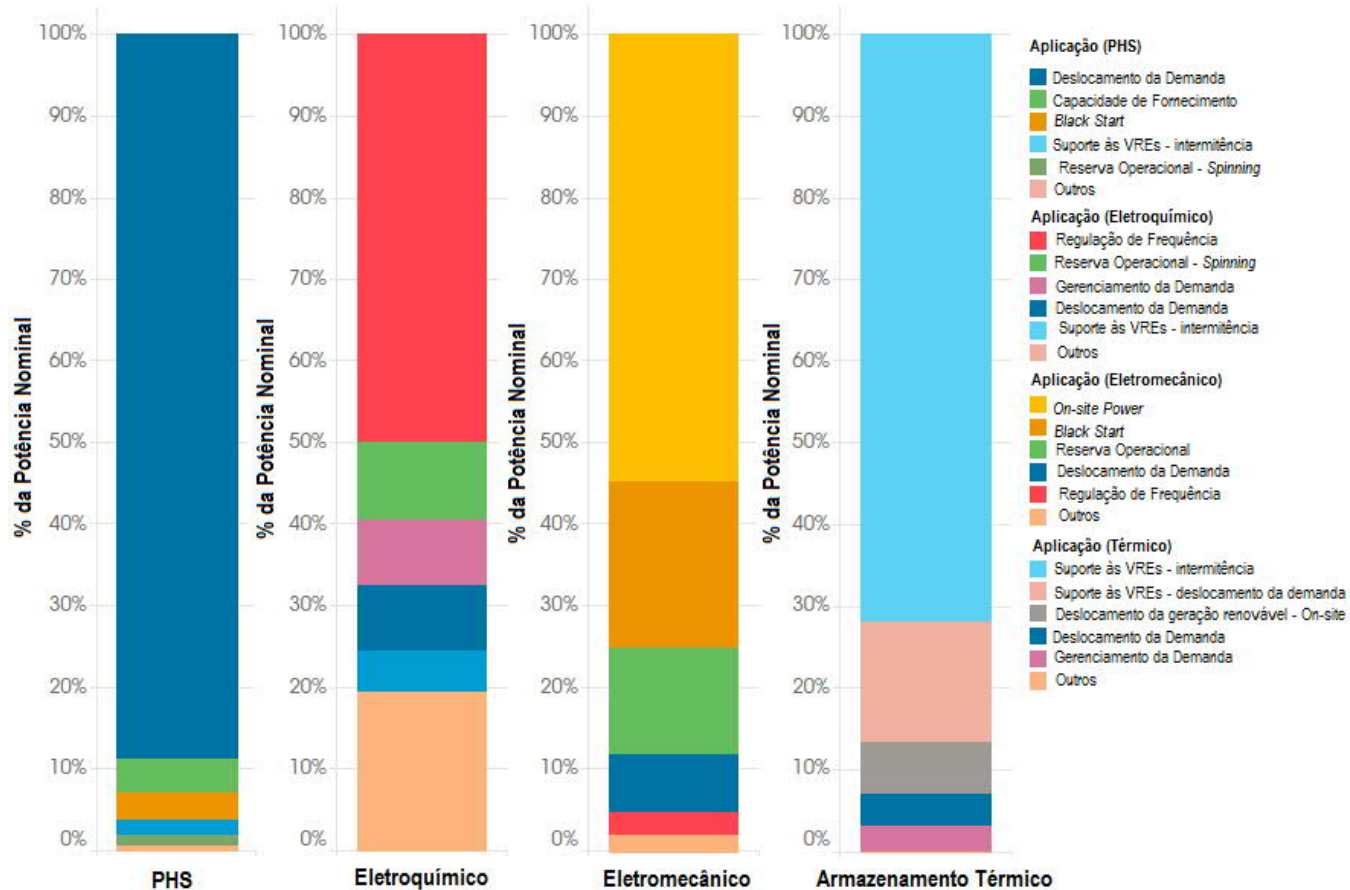


Figura 3.2: Capacidade global de armazenamento por tecnologia e aplicação. Fonte: IRENA, 2017.

Como já destacado anteriormente na figura 2.1, o sistema de armazenamento de energia com maior capacidade instalada, globalmente, é o bombeamento hidráulico. De toda a energia armazenada por essa tecnologia, aproximadamente 85% está aplicado no deslocamento da demanda de ponta do sistema elétrico e menos de 2% é aplicado no suporte às VREs, exclusivamente.

No armazenamento por tecnologias eletroquímicas, a relação do percentual total de energia armazenada comparada às aplicações é melhor distribuída. Aqui, 50% da energia armazenada é aplicada na regulação de frequência. Aproximadamente 8% é destinada ao gerenciamento de custo e carga pelo usuário final, e menos de 5% é efetivamente aplicada no suporte às VREs, objeto de estudo desse trabalho.

O sistema térmico é o que tem maior percentual de participação no suporte às renováveis, ultrapassando os 85% da energia armazenada, para esse fim, com destaque especial à plantas com concentrador solar (*concentrating solar power – CSP*), onde o calor solar é armazenado em sal fundido e usado posteriormente

quando a luz do sol não está mais presente para gerar energia elétrica renovável (IRENA, 2012).

A figura 2.5 ilustrada a seguir, segmenta o percentual de energia armazenada por cada tipo de tecnologia de forma detalhada. No caso do armazenamento químico, por exemplo, onde as baterias são o tipo de armazenamento mais comum, o gráfico apresenta os valores percentuais de cada tipo de tecnologia, sendo predominantemente as baterias de lítio as que possuem maior capacidade de potência instalada.

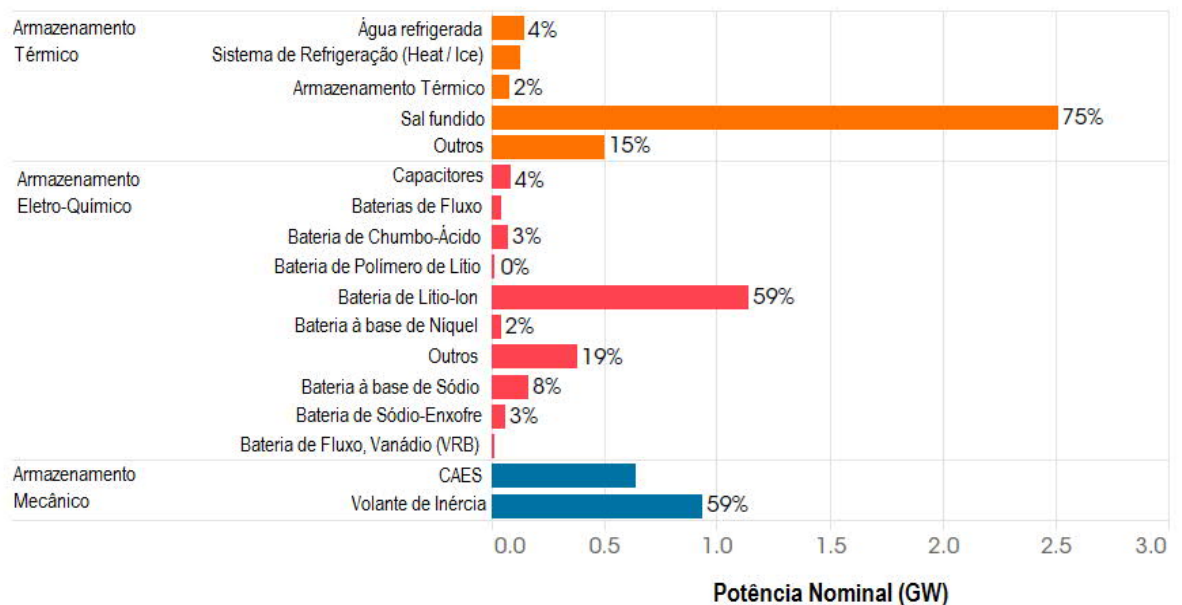


Figura 3.3: Capacidade de armazenamento de energia por tecnologia. Fonte: IRENA, 2017

Importante observar que nesse gráfico não está incluído o armazenamento por bombeamento hidráulico, que como já mencionado representa mais de 99% de toda a energia armazenada no mundo.

### 3.1. AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas armazenamento de energia têm várias aplicações, variações e limitações. Tais características alternam de acordo com tipo de tecnologia a ser empregada. Por essa razão uma avaliação criteriosa deve ser realizada de modo que a tecnologia de armazenamento a ser selecionada funcione adequadamente para uma determinada aplicação.

A seguir, temos algumas definições importantes que compõe a avaliação (SIMÕES-MOREIRA, 2017):

- **Capacidade de Armazenamento:**  
Quantidade máxima de energia que pode ser armazenada pelo sistema (expresso em Wh). Tal capacidade sofre com perdas ao da vida útil do sistema, seja por ciclos de operação, condições térmicas, etc.
- **Potência de Carga e Descarga:**  
Taxa máxima com que a energia pode entrar ou sair do sistema, incluindo as taxas de transformação de energia, quando existentes. Expressa em watts (W). Geralmente os sistemas são classificados pela potência de descarga para compatibilização com a carga a que estão conectados.
- **Tempo de (re)carga e descarga:**  
Tempo necessário para que o sistema tenha toda a sua capacidade de energia carregada ou descarregada.
- **Taxa de autodescarga:**  
Corresponde à redução da capacidade de armazenamento devido à perdas, sendo muitas vezes perdas intrínsecas à tecnologia do sistema (atrito, térmica vazamentos, etc.). Pode ser expressa pela capacidade de armazenamento (valor absoluto ou percentual) por unidade de tempo (Wh/h, Wh/dia, %/h, %/dia).
- **Tempo de resposta:**  
Tempo de reação necessário para que o sistema comece a entregar a energia nominal demandada à partir de uma condição estacionária (sem carga ou descarga). A maioria dos sistemas de armazenamento possuem tempo de resposta expresso em segundos (ou menos).  
Esse é um dos parâmetros mais importante para definição da aplicação de uma determinada tecnologia para conexão com o sistema elétrico.
- **Taxa de resposta (ramp rate):**  
Tempo necessário para que o sistema varie (aumente ou reduza) a potência de saída durante sua operação. Parâmetro expresso em W/s.
- **Densidade de Energia:**  
Relação entre capacidade de armazenamento e volume ou massa ocupada pelo sistema. Tal parâmetro é expresso pela energia armazenada por unidade de volume ou massa (Wh/m<sup>3</sup>, Wh/l ou Wh/kg).

- **Densidade de Potência:**  
Relação entre potência de descarga e volume ou massa ocupada pelo sistema. Tal parâmetro é expresso pela potência de descarga por unidade de volume ou massa ( $W/m^3$ ,  $W/l$  ou  $W/kg$ ).
- **Densidade de área (*footprint*):**
- **Relação a área ocupada pelo sistema em relação à capacidade de armazenamento de energia, sendo expresso em  $m^2/Wh$ .**
- **Eficiência Energética:**  
Relação entre a energia descarregada pelo sistema em relação à energia empregada para carregá-lo.
- **Vida útil:**  
Expressa a longevidade do sistema de armazenamento, de acordo com o tipo de tecnologia. Pode ser expressa pela quantidade de ciclos (principalmente para baterias eletroquímicas), energia fornecida de forma cumulativa, ou tempo de operação.
- **Profundidade de descarga (*DOD – depth of discharge*):**  
Refere-se à quantidade máxima de energia que pode ser extraída do sistema. Em alguns caso, como as baterias de chumbo-ácido o consumo de toda energia armazenada é prejudicial ao sistema, reduzindo sua durabilidade. Em função disso é necessário prever um nível máximo de descarga de modo a não comprometer a vida útil do sistema.
- **Nível de maturidade da tecnologia:**  
Importante parâmetro a ser verificado para escolha de uma determinada tecnologia em função de sua consolidação no mercado. Dessa forma a maioria dos possíveis problemas já foram muitas vezes detectados e solucionados ao logo de muitas aplicações e situações, mitiga de forma significativa o risco aos investidores.
- **Flexibilidade de implantação:**  
Critério para verificação de restrições geográficas (relevo, subsolo), e técnicas (conexão com o sistema elétrico), verificando o impacto dessas restrições na aplicação do sistema.

- **Impactos Ambientais:**  
Aspectos ambientais relacionados à implantação, operação e manutenção. Além dos impactos de um eventual descomissionamento, em relação à descarte e reciclagem dos materiais obsoletos.
- **Custo de Investimento:**  
Custos relativos à aquisição de equipamentos, dispositivos e demais itens que compõe a infra-estrutura necessária para que o sistema de armazenamento seja implantado.
- **Custos Operacionais:**  
Custos relativos à manutenção, operação além de tarefas administrativas necessárias para o adequado funcionamento do sistema de armazenamento.

### 3.2. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MECÂNICA

Relaciona todos os tipos de armazenamento de energia nas quais a energia elétrica é convertida em mecânica, sendo geralmente nas formas de energia potencial e cinética.

#### 3.2.1. CAES

Do inglês, *Compressed Air Energy Storage* (CAES) é uma tecnologia onde o ar comprimido é armazenado em reservatórios de pressão. Tais reservatórios são geralmente formações subterrâneas naturais (antigas minas, rochas, cavernas, salinas etc.), onde as pressões variam tipicamente entre 4Mpa e 8Mpa (IRENA, 2017). Em formações naturais os custos de construção são muito inferiores, se comparados à reservatórios de pressão construídos na superfície. Existem ainda sistemas de aplicação subaquática, onde os reservatórios são construídos no oceano ou lago, como é o caso da usina CAES instalada no lago de Ontario em Toronto, Canadá, que está em funcionamento desde 2015 (HYDROSTOR, 2018).

O sistema clássico (diabático) do CAES é apresentado pela figura 3.1, composto por motor, compressor, câmara de combustível, turbina e gerador.

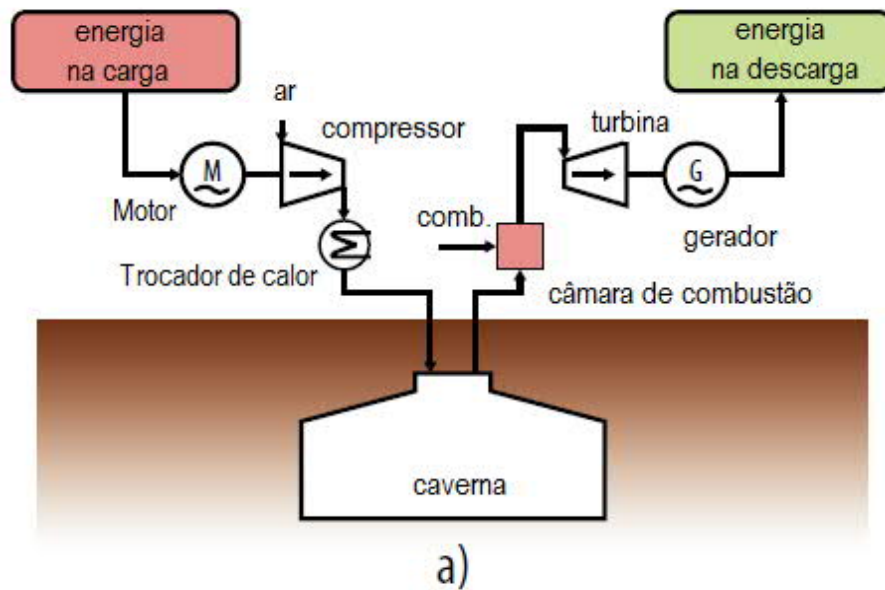


Figura 3.4 – Diagrama esquemático CAES diabático. Fonte: IRENA, 2017.

No CAES clássico (diabático), o ar atmosférico é comprimido e por consequência o ar é aquecido pelo processo, e resfriado antes do armazenamento com o auxílio de radiadores, onde o calor é rejeitado na atmosfera. O processo de armazenamento ocorre geralmente quando a demanda de energia do sistema é baixa. Quando a energia armazenada é solicitada do sistema, o ar comprimido é retirado do reservatório, porém precisa ser aquecido (expansão) para aumentar o rendimento da turbina e gerador a qual está acoplado. Esse aquecimento usualmente é realizado com o uso de gás natural, o que representa uma desvantagem do ponto de vista ambiental.

No CAES adiabático (advanced adiabatic compressed energy storage, AA-CAES), representado pela figura 3.2, o calor dissipado para a atmosfera no resfriamento do ar comprimido pelo é armazenado termicamente (thermal energy storage - TES). Na geração de energia o ar retirado do reservatório é aquecido por trocadores de calor, eliminando assim a necessidade da câmara de combustível para aquecer o ar antes de ser expandido.

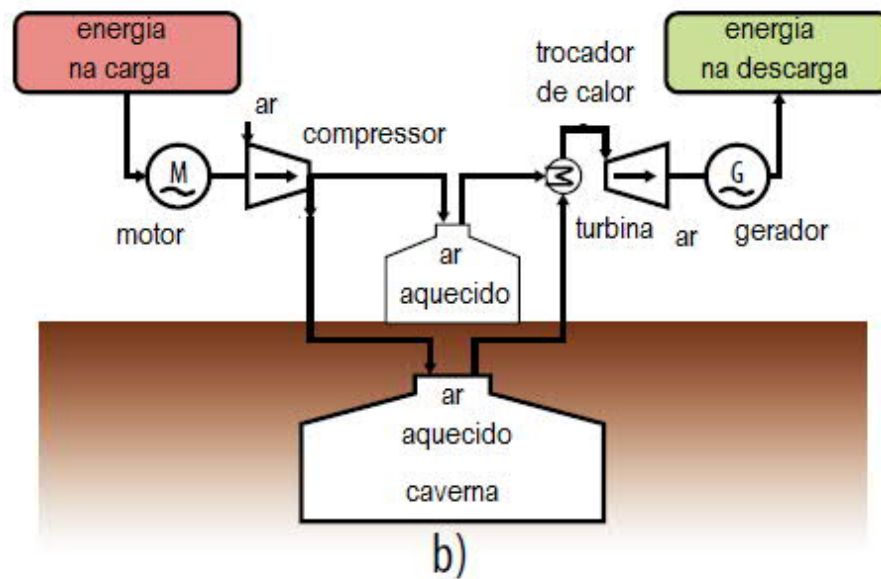


Figura 3.5 - Diagrama esquemático CAES adiabático. Fonte: IRENA, 2017.

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens – CAES, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESvantagens
- Capaz de armazenar energia por longos períodos (meses);	- Limitações geográficas para aplicação em reservatórios subterrâneos de formação natural
- Rápido tempo de resposta	- Baixa densidade de energia
- Armazenamento em larga escala	- Baixa densidade de potência

### 3.2.2. Bombeamento Hidráulico (PHS)

Do inglês, *Pumped Hydro Storage* (PHS) Trata-se da tecnologia mais madura (desenvolvida na Europa nos anos 1890), e com maior capacidade instalada, principalmente para armazenamento em larga escala. Consiste basicamente na existência de dois reservatórios, podendo ser naturais ou artificiais, em diferentes níveis, de modo que haja o escoamento de água, pela diferença de altura entre eles, ativando turbinas hidráulicas (Francis ou Kaplan, por exemplo) para a geração de energia elétrica, como numa usina hidrelétrica comum. O armazenamento em si, se dá na forma de energia potencial gravitacional, com o bombeamento de água do reservatório localizado na cota inferior ao reservatório superior, possibilitando a geração de energia em de forma a suportar o sistema a qual está conectado para suportar determinada demanda, bem como na regulação de tensão e frequência.

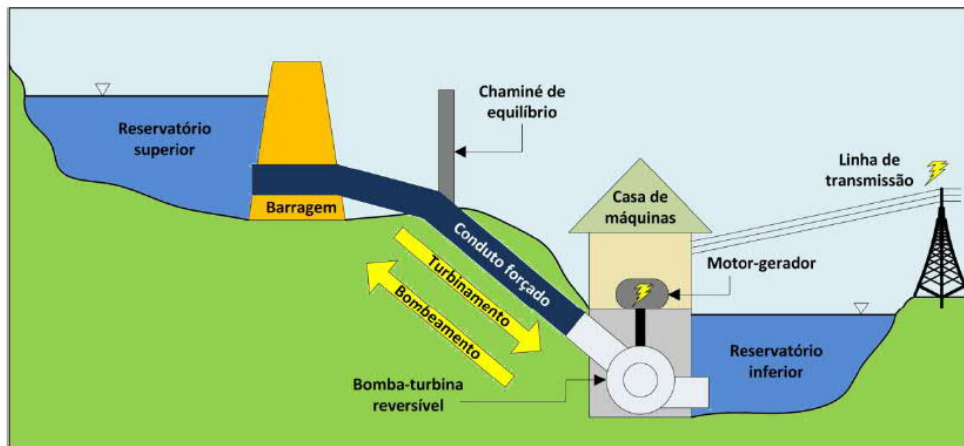


Figura 3.6 - Esquema de uma usina hidrelétrica reversível.

Fonte: CANALES; BELUCO; MENDES, 2015.

O Brasil possuiu destaque no cenário de aplicação de usinas reversíveis, são 4 unidades, Pedreira, Traição, Vigário e Edgard de Souza, sendo a Usina Elevatória de Pedreira inaugurada em 1939, com a entrada em operação da unidade 4, tornando-se a primeira turbina reversível do mundo em operação comercial (EMAE, 2018; CANALES; BELUCO; MENDES, 2015).

Tabela 3.2 - Vantagens e desvantagens – PHS, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
- Tecnologia madura e consolidada	- Limitações geográficas
com vasta experiência operacional	- Baixa densidade de energia
- Baixo índice de Auto-Perda	- Alto impacto ambiental
- Baixo custo de instalação	- Custos iniciais elevados
- Vida útil bastante longa e baixo custo de armazenamento	

### 3.2.3. Volante de Inércia (Flywheel)

Consiste em armazenar energia elétrica na forma de energia cinética rotacional. Durante o carregamento, o volante de inércia chega a rotações de 10.000 RPM (baixa velocidade) à 100.000 RPM (alta velocidade) acionado por um motogerador.

A carga é realizada por motor alimentado pela rede elétrica de modo que a rotação do volante chegue à rotação de trabalho. Durante a descarga, a rotação armazenada no volante de inércia aciona o gerador para produzir eletricidade. Importante destacar que essa tecnologia apresenta um alto índice de alto-descarga por ociosidade, onde a energia armazenada caso não utilizada irá descarregando

automaticamente por perdas intrínsecas à forma de construção. Para reduzir as perdas mecânicas, o atrito é minimizado operando os volantes de inércia no vácuo e utilizando rolamentos magnéticos ao invés de mecânicos (IEA-ETSAP; IRENA, 2012).

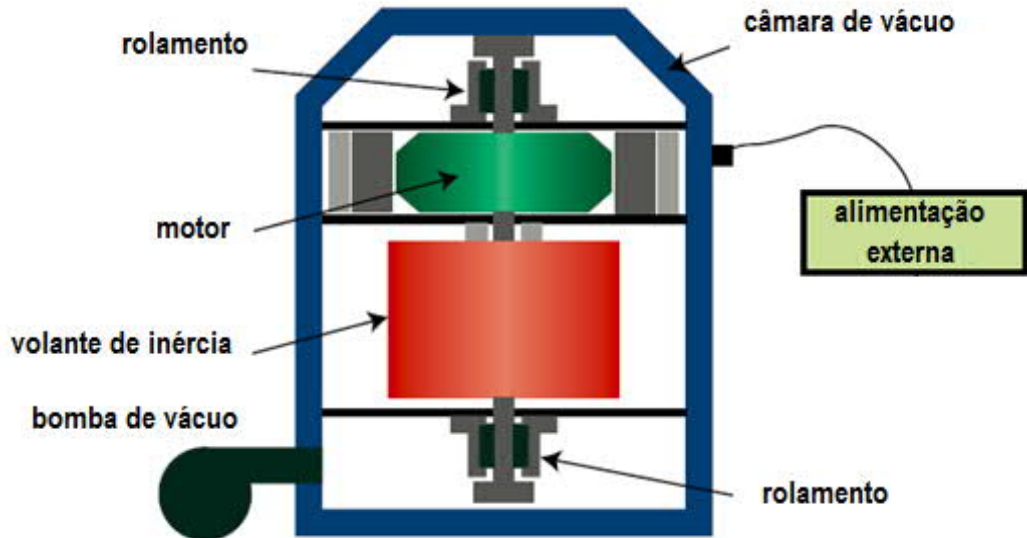


Figura 3.7 – Componentes principais, sistema de armazenamento volante de inércia.

Fonte IRENA 2017 – adaptado.

Os sistemas de menor rotação são historicamente construídos com materiais metálicos, porém quando sistemas são projetados para rotações mais elevadas os metais nem sempre apresentam as características mecânicas mais adequadas para um funcionamento seguro, fazendo com que se utilize compostos de fibra.

Tabela 3.3 - Vantagens e desvantagens – Volantes de inércia, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
- Carga rápida	- Baixa densidade de energia quando comparado com baterias
- Tecnologia consolidada	- Descarregamento por ociosidade
- Baixa Manutenção	- Alimentação externa para rola rolamentos magnéticos
- Alta densidade de potência	

### 3.3. ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Trata-se do tipo de armazenamento na qual a energia é armazenada na forma de calor, sendo na maioria das vezes utilizados em conjunto com processos que necessitam do próprio calor para operar.

Importante atribuir a tecnologia CSP, não só como geração de energia renovável, mas também como armazenamento. A tecnologia predominante para os sistemas CSP utiliza coletores parabólicos constituídos de vários coletores curvados refletidos, instalados enfileirados direcionados à um tubo receptor. O fluido de transferência de calor (geralmente sal fundido) circula por tubos que recebe o calor solar e transfere para uma central onde o calor é usado para produzir vapor. O vapor aciona um gerador convencional de ciclo Rankine (IEA, 2011).

Existe ainda tecnologia de armazenamento térmico PTES (*Pumped thermal energy storage*), ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, onde a energia elétrica é também armazenada na forma térmica, porém com a vantajosa possibilidade de conversão para energia elétrica novamente, não limitando-se apenas à processos térmicos, exclusivamente.

Porém, como a maioria das tecnologias armazenam calor sem necessariamente converterem energia elétrica em térmica, com a posterior conversão em elétrica, que realmente interessam aos serviços de suporte ao sistema elétrico e adicionado ao fato de que a PTES ainda de ainda não ser uma tecnologia comercial, os armazenamentos térmicos não serão foco de estudo e aplicação desse trabalho.

### 3.4. ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICO

São tecnologias onde existe a conversão de energia elétrica em energia química para o armazenamento. Nesse grupo, as baterias têm destaque especial por estarem presentes e ganharem bastante espaço em diversas aplicações desde a sua concepção, através do cientista italiano Alessandro Volta em 1800.

#### 3.4.1. Baterias

De forma geral as baterias são formadas por eletrodos negativos, eletrodos positivos e eletrólitos. Os eletrodos são construídos de diferentes tipos de material com potencial eletroquímico que espontaneamente induzem a uma reação de oxirredução gerando uma corrente elétrica quando o circuito é fechado para o ciclo de descarga (GALLO, A. B. et al, 2016). As baterias se dividem em dois grandes grupos, sendo as baterias primárias aquelas em que a reação química não é reversível, não permitindo recargas, que não será portanto o foco desse trabalho por não terem um papel determinante no suporte às VREs. Já nas baterias secundárias o armazenamento é possível, através de recargas com energia externa. Nesse

segmento destacam-se as tecnologias de chumbo-ácido (PbA), níquel-cádmio (NiCd), a de níquel-hidreto metálico (Ni-MH), íon lítio (Li-íon), sódio-enxofre (NaS), e mais recentemente as baterias de fluxo, com promissoras aplicações. Pelo fato das cargas e descargas ocorrerem através das reações químicas, essa característica faz com que as baterias possuam uma resposta de tempo bastante rápida (segundos ou milissegundos) o que é bastante importante para aplicações como a de suporte às renováveis, por exemplo.

- Chumbo-ácido (PbA): Caracteriza-se por uma tecnologia madura (cerca de 150 anos de aplicação), sendo o mais antigo tipo de bateria secundária, sendo composta por um cátodo de óxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>), e ânodo de chumbo (Pb), imersos em solução de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Está presente por exemplo nas baterias de automóveis. Seu mercado não é maior devido à limitações técnicas relativas à baixa densidade de energia e por grande perda de capacidade quando descarregadas profundamente (“efeito memória”). Outra barreira, é a questão ambiental relacionada com o uso do chumbo (SIMÕES-MOREIRA, 2017)

Tabela 3.4 - Vantagens e desvantagens – Baterias de chumbo-ácido, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
- Baixo custo	- Impacto ambiental (chumbo)
- Tecnologia Madura	- Ciclo de vida baixo
	- Necessidade de constante manutenção
	- Baixa densidade de energia

- Níquel-cádmio (NiCd) e Níquel-hidreto metálico (NiMH): Assim como as baterias de PbA, as de NiCd são uma de tecnologia madura e bastante consolidada, com diversas aplicações. Alguns pontos fracos da tecnologia de PbA foram aprimoradas, como a densidade de potência, maior ciclo de vida, tolerância à baixas temperaturas. Porém ainda continuaram com alguns inconvenientes como o “efeito memória” e a questão da toxicidade do Cádmio, fazendo com que seu uso fosse inclusive proibido em alguns países. Nos anos noventa surgem as baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH), que são uma variação das de níquel-cádmio, sendo o cádmio removido dos eletrodos. As vantagens dessa variação estão não somente relacionadas à

questões ambientais, mas também técnicas, visto que a densidade de energia (SIMÕES-MOREIRA, 2017; GALLO, A. B. et al, 2016).

Tabela 3.5 Vantagens e desvantagens – Baterias de níquel-cádmio, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
- Baixo custo	- Impacto ambiental (cádmio)
- Tecnologia Madura	- Ciclo de vida baixo
	- Baixa densidade de energia

- Íons de Lítio (Li-íon): Trata-se do tipo de tecnologia mais presente em nosso dia-a-dia com a predominância no mercado para as aplicações portáteis, como os telefones celulares, por exemplo. Isso só foi possível pelo fato de possuírem uma densidade de energia e maior nível de tensão por célula (3,7V contra 1,2 das NiCd e MiMH) (SIMÕES-MOREIRA, 2017). O desenvolvimento da tecnologia iniciou-se entre as décadas de 1960 e 1970, mas foi apenas nos anos 1990 que ganhou escala comercial com a fabricante de eletrônicos Sony (IRENA, 2017).

Baterias de Lítio-íon trocam íons de lítio entre o cátodo e ânodo, num processo chamado de princípio de intercalação (IRENA, 2017; GALLO, A. B. et al, 2016). Existem diversos tipos de materiais que podem ser aplicados no cátodo e alguns outros ânodo. O eletrólito porém, é geralmente constituído por líquidos à base de sal de lítio, dissolvido em solvente líquido orgânico, ou em gel à base de filmes poliméricos (GALLO, A. B. et al, 2016). Todos esses tipos de materiais e disposições resulta em uma variedade de tipos de bateria distintos, sendo: níquel-manganês-cobalto (NMC), óxido de lítio-manganês (LMO), níquel-cobalto-alumínio (NCA), lítio-ferro-fosfato (LFP) e lítio-titanato (LTO). Essa variedade traz consigo características únicas de desempenho, custo e portanto versatilidade das baterias de lítio-íon.

A tabela 3.6, a seguir, relaciona as principais características de cada tipo de tecnologia, comparando-as entre si, bem como as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Tabela 3.6 - Vantagens e desvantagens – Baterias de lítio-íon, fonte: IRENA, 2017.

Material	Níquel-Manganês-Cobalto	Lítio-Cobalto-Alumínio	Níquel-Cobalto-Alumínio	Lítio-Ferro-Fosfato	Lítio-Titanato
Tecnologia	NMC	LMO	NCA	LFP	LTO
Catodo	$\text{LiNixMnyCo}_{1-x-y}\text{O}_2$	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$	$\text{LiNiCoAlO}_2$	$\text{LiFePO}_4$	variável
Anodo	C (grafite)	C (grafite)	C (grafite)	C (grafite)	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$
Segurança					
Densidade de Potência					
Densidade de Energia					
Custo x Benefício					
Vida Útil					
Performance do Sistema					
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- boas combinações de propriedades</li> <li>- termicamente estável</li> <li>- pode operar em alta tensão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- baixo custo devido à abundância de magnésio</li> <li>- termicamente estável</li> <li>- boa capacidade de potência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- boa capacidade de energia e potência</li> <li>- bom ciclo de vida em sistemas mais novos</li> <li>- longo tempo de armazenamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- muito estável termicamente</li> <li>- ótimo ciclo de vida</li> <li>- boa capacidade de potência</li> <li>- baixo custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- muito estável termicamente</li> <li>- longo ciclo de vida</li> <li>- alta taxa de capacidade de descarga</li> <li>- dispensa o uso de eletrodos sólidos</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- questões de patente em alguns países</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pequena vida útil</li> <li>- baixo desempenho de energia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sensível à temperaturas entre 40-70°C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- densidade de energia mais baixa em função do nível de tensão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- custo elevado em função do titânio</li> <li>- tensão de célula reduzida</li> <li>- baixa densidade de energia</li> </ul>

Apesar de bastante presente em nosso cotidiano, a tecnologia ainda encontra-se em desenvolvimento, principalmente nos que diz respeito às questões ambientais, pelo fato de alguns compostos serem tóxicos requerendo controle no descarte e reciclagem após sua vida útil. Outro ponto importante é o da segurança: os materiais utilizados, incluindo o próprio lítio são altamente reativos e inflamáveis, o que limita a aplicação da tecnologia em carros elétricos, onde estaria sujeita a temperaturas mais elevadas e com possibilidade de rompimento no caso de uma colisão (SIMÕES-MOREIRA, 2017).

- **Sódio-Enxofre (NaS):** Esse tipo de bateria utiliza sódio (Na) fundido como eletrodo negativo e enxofre (S) fundido como eletrodo positivo, sendo portanto uma bateria que trabalha em altas temperaturas, da ordem de 300~350°C. Já o eletrólito é composto por beta-alumina ( $Al_2O_3$ ), na qual permite que apenas os íons positivos de sódio atravessem os eletrodos (SIMÕES-MOREIRA, 2017; GALLO, A. B. et al, 2016).

Possui uma extensiva aplicação no Japão, com mais de 300MW de capacidade instalada ao longo do país, aplicadas principalmente para regulação de intermitência, como por exemplo no suporte à geração renovável eólica (IRENA, 2017). Os compostos para a produção desse tipo de bateria são de baixo custo. O que encarece e dificulta sua aplicação e operação é a necessidade de se manter as altas temperaturas de modo a possuir o sódio e o enxofre na fase líquida.

Tipicamente possuem taxas muito baixas de auto-descarga, da ordem de 0,05% à 1% ao dia (IRENA, 2017). Apresenta uma elevada densidade de energia, boa eficiência, custos reduzidos de manutenção e possibilidade de descargas profundas.

Tabela 3.7 - Vantagens e desvantagens – Baterias de sódio-enxofre, fonte: o Autor

VANTAGENS	DESVANTAGENS
- Materiais de baixo custo	- Elevado custo de operação (aquecedor externo)
- Boa eficiência	- Questões de segurança: inflamabilidade
- Baixa taxa de auto-descarga	

- Bateria metal-ar (*M-Air*): Trata-se de uma tecnologia ainda em desenvolvimento, porém com características bastante superiores às demais relacionadas principalmente pela densidade de energia bastante elevadas. Isso faz com que sejam grande promissoras candidatas a substituírem a tecnologia de lítio-íon, inclusive para veículos elétricos (ZHANG, 2016).

O armazenamento da energia em si é dado através de reações químicas entre um eletrodo exposto ar (positivo) e um eletrodo de metal (negativo). O eletrodo negativo é tipicamente composto de metais como lítio (Li), zinco (Zn), alumínio (Al), ferro (Fe), ou sódio (Na), enquanto o eletrodo positivo geralmente possui algum composto de carbono poroso e um catalisador. O eletrólito pode ser de natureza aquosa ou não-aquosa, como tipicamente é aplicado para sistemas lítio-ar (EASE, 2018).

Além do potencial para aplicações em mobilidade urbana, uma promissora aplicação está no suporte à intermitência das renováveis, principalmente em larga escala (EASE, 2018).

Tabela 3.8 - Vantagens e desvantagens – Baterias de metal-ar, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
- Alta densidade de energia	- Ainda em P&D - Ciclo de vida baixo - Custos ainda elevados

- Baterias de fluxo: Diferenciam-se das baterias recarregáveis convencionais, onde o processo de carga e descarga é dado por compostos químicos dissolvidos em fluidos eletrolíticos, separados por uma membrana permeável à prótons, conforme ilustrado pela figura 3.5. O fluido eletrolítico do polo positivo é chamado de anólito, enquanto o fluído do polo positivo católito. A figura ainda ilustra a presença de tanques, onde os fluidos eletrolíticos são armazenados, e bombas que são responsáveis por fazer a circulação desse fluido até a célula eletroquímica para conversão de energia elétrica em química, durante o carregamento, e de química em elétrica durante o processo de descarga.

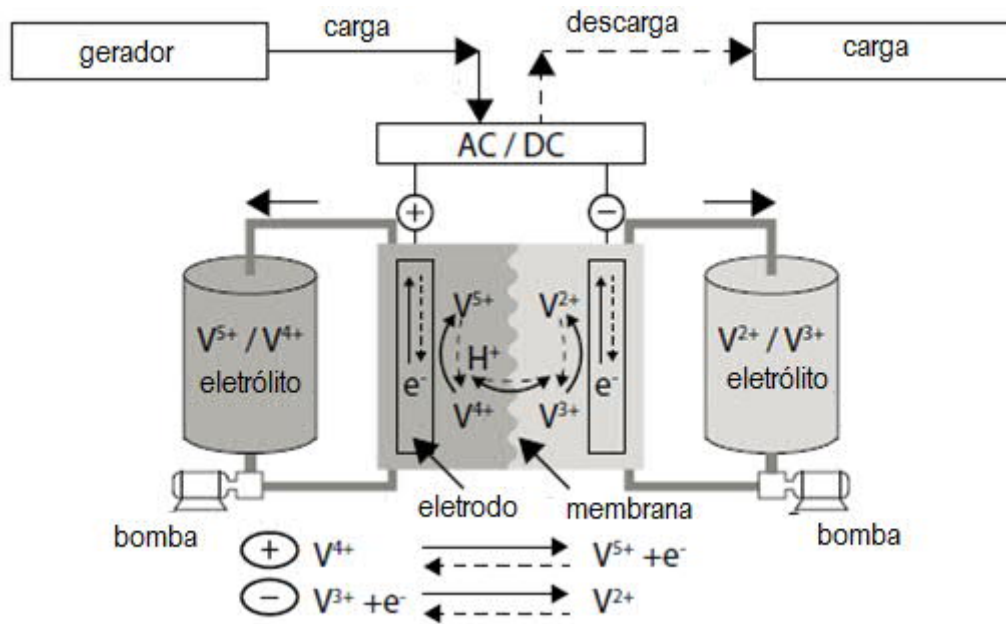


Figura 3.8 – Esquemático armazenamento, baterias de fluxo [24]

Assim como em outras tecnologias, os compostos químicos que compõem as baterias possuem uma série de variações, sendo as classificações destacadas nesse trabalho são: vanádio (VRB – Vanadium redox battery), zinco-bromo (ZBB - Zinc bromine battery) e polissulfeto de brometo (PSB - Polysulfide bromide battery) (GALLO, A. B. et al, 2016).

As baterias VRB são umas das tecnologias mais consolidadas comercialmente. Os estudos foram iniciados pela NASA, também nos anos 1970, mas só tiveram uma relevância mais significativa em meados dos anos 1980 e 1990, principalmente (EPRI, 2003). Utiliza o vanádio como eletrólito positivo e negativo, o que representa uma vantagem por evitar contaminação através da membrana que separa os polos da bateria. Por outro lado a limitação da solubilidade do vanádio em tecnologias em que o ácido sulfídrico é utilizado como eletrólito, a densidade de energia é limitada (GALLO, A. B. et al, 2016). Já as baterias ZBB utilizam o zinco-bromo nos dois tanques ao invés do vanádio. Por não terem o problema de solubilidade, possuem uma maior densidade de energia se comparada às VRBs (GALLO, A. B. et al, 2016). As baterias PSB utilizam duas soluções de sal nos eletrodos e são uma tecnologia ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento. Porém desde seu desenvolvimento a tecnologia foi vendida para um outra companhia que não demonstrou novos desenvolvimentos para aplicações em larga escala (GALLO,

A. B. et al, 2016). As baterias de fluxo têm sido uma boa alternativa para aplicações onde a duração de descarga requerida é de dezenas de horas, chegando em alguns casos ser economicamente mais viável que as baterias convencionais, isso se deve ao fato de que o custo dos compostos (principalmente zinco e sódio) utilizados para a fabricação da bateria possuem um custo relativamente baixo (EPRI, 2003).

Em linhas gerais as baterias de fluxo uma baixa densidade de energia, eficiência moderada e baixa taxa de auto-descarga. Existe ainda questões ambientais que devem ser observadas, pois os compostos ácidos utilizados nos eletrólitos são tóxicos e necessitam de cuidados especiais tanto na operação, quanto no descarte ao fim da vida útil.

Tabela 3.9 - Vantagens e desvantagens – Baterias de fluxo, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESvantagens
- Baixa taxa de auto-descarga	- Tecnologia ainda não totalmente madura - Baixa densidade de energia - Cuidados ambientais - materiais tóxicos

### 3.4.2. Supercapacitores

Capacitores convencionais são a forma mais direta de se armazenar energia acumulando cargas elétricas, induzindo campo elétrico estático, sem a necessidade da transformação da energia elétrica em outra forma de energia, o que resulta em boa eficiência (SIMÕES-MOREIRA, 2017; GALLO, A. B. et al, 2016).

Os supercapacitores foram desenvolvidos para melhorar as características técnicas dos capacitores convencionais, além de atenderem à requisitos técnicos entre as baterias e os convencionais.

Enquanto um capacitor convencional possui como dielétrico um material sólido para separar as placas condutoras, os supercapacitores consistem em dois eletrodos metálicos revestidos de carbono ativado e separados por finas camadas de material isolante poroso preenchidas com eletrólito (SIMÕES-MOREIRA, 2017; BARBOUR, 2018; ENERISE, 2018).

Os supercapacitores se destacam pela alta densidade de potência, tempo de resposta rápido, boa eficiência (85-95%), reduzida taxa de auto-descarga (20-40% ao

dia), reduzidos tempos de carga e descarga e longa vida útil (em torno de 100.000 ciclos), devido à tais características são melhor aplicados em curtos períodos de tempo, como por exemplo no sistema de carregamento de veículos elétricos urbanos (trens e ônibus) (SIMÕES-MOREIRA, 2017; GALLO, A. B. et al, 2016; IEA-ETSAP e IRENA, 2017).

Os inconvenientes da tecnologia estão relacionados aos altos custos dos materiais especiais, necessários para a fabricação dos supercapacitores.

Tabela 3.10 - Vantagens e desvantagens – Supercapacitores, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESvantagens
- Alta densidade de potência - Rápido tempo de resposta - Longa Vida Útil	- Custo dos materiais para fabricação

### 3.4.3. Supercondutores Eletromagnéticos (SMES)

Do inglês, *superconducting magnetic energy storage* (SMES), trata-se do sistema que armazena energia em bobinas de supercondutores, na forma de campo magnético através da circulação de corrente contínua (CC) na temperatura criogênica (da ordem de 4K ~ 70K) (SIMÕES-MOREIRA, 2017). Durante a formação do campo magnético para o armazenamento, as perdas resistivas são desprezíveis na temperatura criogênica, sendo esse o maior desafio do sistema SMES.

SMES é uma tecnologia que se destaca pela alta densidade de potência rápido tempo de resposta, além da grande eficiência do sistema, pois a única conversão de energia em todo o processo é a de corrente alternada para contínua (conversor CA/CC), o que representa uma perda de apenas 2% à 3%, não ocorrendo perdas termodinâmicas, diferentemente de outras tecnologias (IEA-ETSAP e IRENA, 2017; KUMAR, 2015).

A energia armazenada é fornecida de volta à rede com a descarga das bobinas de supercondutores através do conversor CA/CC (IEA-ETSAP e IRENA, 2017; KUMAR, 2015).

Desde os primeiros estudos, iniciados na década de 1960, até os dias atuais, a tecnologia não apresenta grandes avanços em consequência dos altos custos associados aos requisitos de baixíssimas temperaturas dos supercondutores (GALLO, A. B. et al, 2016).

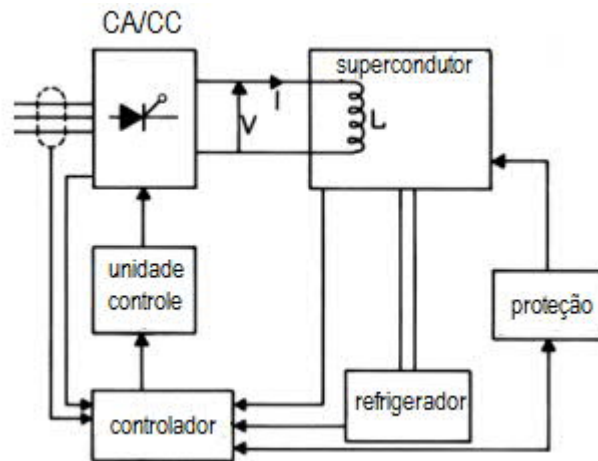


FIGURA 3.9 – Diagrama de blocos simplificado de um sistema SMES. Fonte: (EPRI, 2003)

Os inconvenientes são os custos e consumo de energia relacionados à refrigeração requerido pelo sistema, fato que faz com que o SMES seja mais adequado em aplicações de armazenamento de energia por curtos períodos de tempo (IEA-ETSAP e IRENA, 2017). Outros inconvenientes estão relacionados, principalmente, aos possíveis inconvenientes dos campos magnéticos ao meio-ambiente. Tais efeitos ainda não são totalmente conhecidos e conclusivos, portanto, requerem maior estudo (GALLO, A. B. et al, 2016).

Tabela 3.11 - Vantagens e desvantagens – SMES, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESvantagens
- Alta densidade de potência	- Efeitos ao meio-ambiente, possivelmente
- Rápido tempo de resposta	causados por efeito do campo magnético
- Baixíssimas perdas	- Custo e consumo de energia para Refrigeração

#### 3.4.4. Hidrogênio

Trata-se da conversão da eletricidade em hidrogênio através da eletrólise da água. Existem diferentes tecnologias para o processo de eletrólise, sendo a mais comum e comercial a Alcalina que possui uma eficiência relativamente baixa entre 43 à 66%, existem ainda tecnologias baseadas em membrana de polímero eletrolítico e óxido sólido com eficiências mais altas, variando entre 70 e 98%, porém ainda pouco comercial ou ainda em fase de desenvolvimento. (GALLO, A. B. et al, 2016; SILVA, 2011).

Após a eletrólise o hidrogênio gasoso possui excelente densidade de energia por volume. Seu armazenamento pode ser realizado em vasos de pressão, porém devido sua alta infalibilidade tornam a estocagem e transporte caros e perigosos (SIMÕES-MOREIRA, 2017).

O hidrogênio pode ser misturado ao gás natural para geração de energia elétrica (GALLO, A. B. et al, 2016), o que minimiza os custos e impactos com armazenamento, visto que pode ser aplicado diretamente à medida que o gás é gerado.

O hidrogênio geralmente é convertido em eletricidade através de células de combustível com alta eficiência de até 70%, embora também possa ser aplicado em turbinas adaptadas para esse fim, porém com uma eficiência consideravelmente menor, em torno de 40% (GALLO, A. B. et al, 2016).

Existem vários tipos de células de combustível, diferenciando-se pela tecnologia dos materiais utilizados, combustível de abastecimento, ou pela temperatura de funcionamento, dentre as quais temos Alcalina (*AFC – Alkaline Fuel Cell*) que utiliza eletrólito de solução alcalina; Cerâmica (*SOFC – Solid Oxide Fuel Cell*), que funcionam com altas temperaturas (entre 600°C e 1000°C) e tem um sistema de funcionamento complexo; Carbonato Fundido (*MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell*), possui carbonato alcalino em uma matriz cerâmica de funcionamento complexo; Ácido Fosfórico (*PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell*) comercialmente disponível, porém também trabalha com temperaturas elevadas (entre 160°C e 220°C) e Membrana Polimérica (*PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell*): possui funcionamento simples e não necessita de altas temperaturas (entre 80°C e 90°C). No Brasil já temos fabricantes de células de combustível do tipo PEMFC e são as mais indicadas para aplicações estacionárias de pequeno porte (entre 1 e 10kW) (PINTO, 2014).

O processo de metanação pode ser incorporado à um sistema de armazenamento de energia com hidrogênio, o processo torna o sistema mais caro e complexo e menos eficiente, requer ainda uma fonte de CO<sub>2</sub>. Porém o grande intuito da utilização do metano (CH<sub>4</sub>) é o fato de ser completamente compatível com sistemas de geração por GN, sem qualquer adaptação adicional substituindo portanto fontes fósseis de metano. Outra grande vantagem é que ao requerer uma fonte de CO<sub>2</sub> o sistema contribui ainda mais ambientalmente pela possibilidade de integração com plantas de geração de energia (como biogás) onde o CO<sub>2</sub> é um rejeito de exaustão (GALLO, A. B. et al, 2016).

A figura 3.7 ilustra o fluxo energético de diferentes fontes de energia, conversões, armazenamento e utilização final, seja na mobilidade, aplicações industriais ou integração com o sistema elétrico.

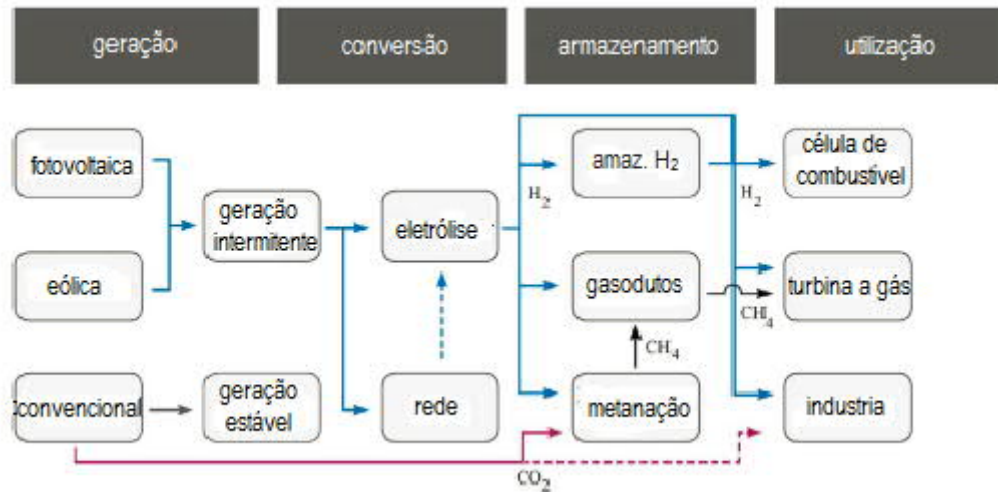


Figura 3.10 – Fluxo de energia com armazenamento por H<sub>2</sub>.

Fonte: (GALLO, A. B. et al, 2016).

Tabela 3.12 - Vantagens e desvantagens – hidrogênio, fonte: o Autor.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande densidade de energia</li> <li>- Grande potencial de integração com as VREs.</li> <li>- Não ocorre auto-perdas (descarregamentos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Armazenamento custoso</li> </ul>

### 3.5. ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS

As diferentes tecnologias de armazenamento possuem propriedades intrínsecas que determinam a melhor adequação técnica para certas aplicações ou para prestar determinados serviços aos sistemas de eletricidade (IRENA, 2017). A figura 3.8 compara as tecnologias de armazenamento quanto à capacidade de armazenamento em relação ao tempo de descarga, que em linhas gerais classifica as principais aplicações de cada tecnologia. Observa-se que tecnologias como CAES e bombeamento hidráulico são quase que exclusivamente aplicadas no gerenciamento em larga escala (>100MW), além de entregar energia por maiores períodos de tempo. Por outro lado as variadas tecnologias de armazenamento por baterias têm maior flexibilidade, possibilitando aplicações desde UPS (Uninterruptible Power Supply) e

qualidade de energia até suporte nas aplicações de Transmissão e Distribuição, bem como deslocamento da demanda de ponta, já em maior escala de potência, variando porém de forma significativa o tempo de descarga de acordo com o tipo de tecnologia específico.

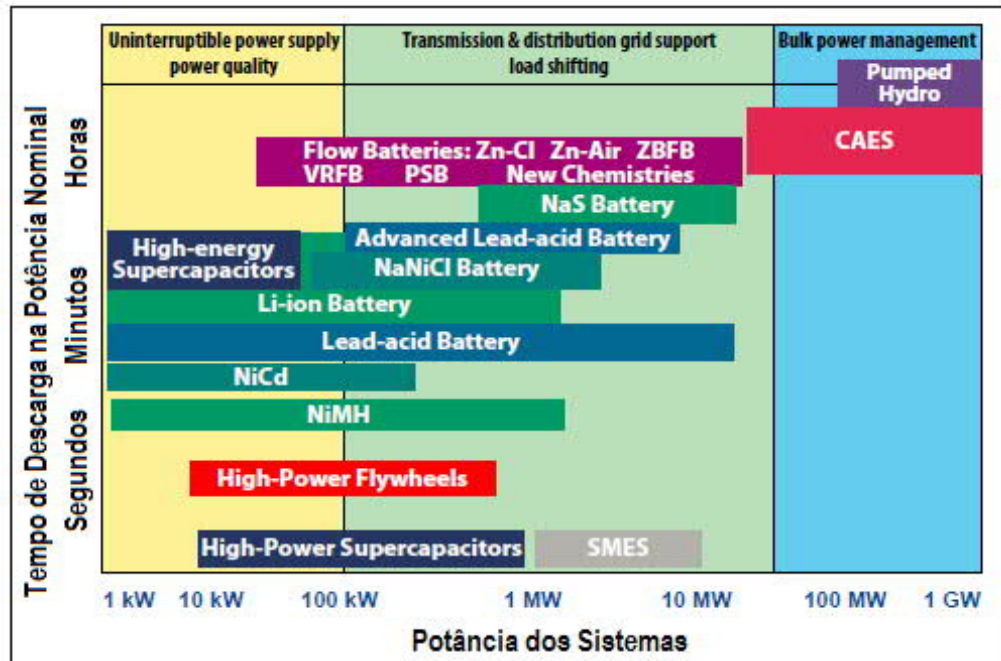


Figura 3.11: Comparativo entre tecnologias de armazenamento e energia: tempo de descarga versus capacidade de armazenamento. Fonte: (IRENA, 2017).

Devemos ainda observar a relação entre as tecnologias e a densidade de potência e densidade de energia, conforme ilustrada pela figura 3.9, que são referências importantes relativas ao volume e área ocupada por cada uma das tecnologias, o que limitar ou possibilitar a aplicação como solução de uma determinada demanda do sistema elétrico.

Observamos que tecnologias como CAES e bombeamento hidráulico possuem baixos índices de densidade de potência e de energia, o que implica em ocupação de maiores volumes e área para suas implantações, o que não as torna tão flexíveis quando ao local de instalação.

Por outro lado, as baterias apresentam altos índices de densidade de potência e de energia o que possibilita maior flexibilidade física dessas tecnologias em diversas aplicações, desde mobilidade urbana (veículos elétricos) à baterias estacionárias.

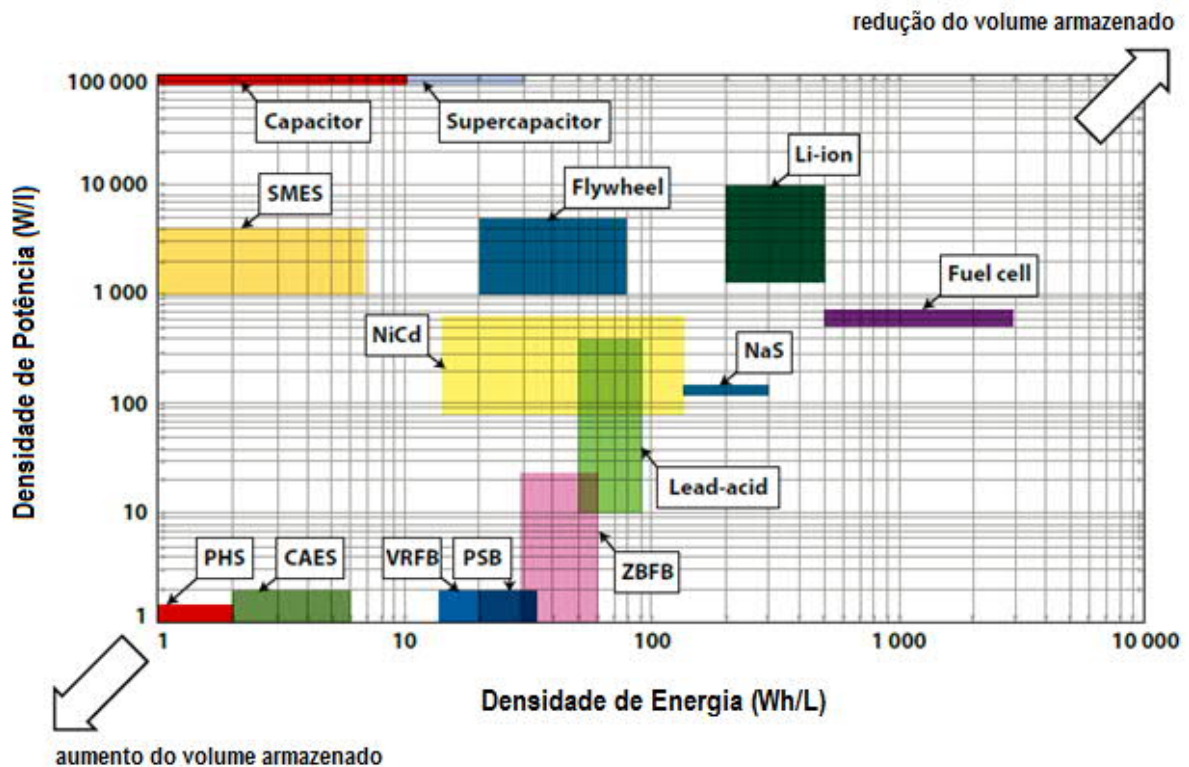


Figura 3.12: Comparativo entre tecnologias de armazenamento e energia: densidade de potência *versus* densidade de energia (expressa o *footprint* – densidade de área ocupada por cada um dos sistemas).

Fonte: (IRENA, 2017).

Importante destacar, porém, que comparações de densidades (potência e de energia), capacidade de descarga em relação à tempo de descarga, verificados nas figuras 3.8 e 3.9 individualmente não são determinantes para a definição da tecnologia, os demais parâmetros devem ser levados em consideração para que se chegue à tecnologia mais adequada à uma determinada aplicação.

No caso específico do suporte às renováveis, objeto de estudo desse trabalho, a tecnologia deve primeiramente possuir capacidade de energia compatível com a potência da geração, possuir tempo de respostas rápidos, além de suprir variações entre minutos e horas (SIMÕES-MOREIRA, 2017). A tabela 3.13 a seguir concentra as características técnicas mais importantes de cada uma das tecnologias mais difundidas e aplicadas atualmente. É possível portanto comparar duas ou mais tecnologias, de modo que possa auxiliar numa decisão de escolha do ponto de vista técnico.

Tabela 3.13: Características das tecnologias. Fonte: GALLO, A. B. et al, 2016 – adaptado.

TECNOLOGIA	POTÊNCIA (MW)	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO (MWh)	TEMPO DE DESCARGA	TEMPO DE RESPOSTA	TAXA DE AUTO DESCARGA (%/dia)	DURAÇÃO DO ARMAZENAMENTO
PHS	100-5000	1000	1-24h	~3min	0,005–0,02	h-mês
Volante de Inércia	0,1-10	0,01-5	s-min	ms-s	55-100	s-min
CAES (D-CAES)	5-300	1-1000	1-24h	~10min	0,003-0,03	h-mês
BAT. PbA	0,001-50	0,1-100	s-h	ms	0,033-0,3	min-dia
BAT. LI-ION	0,1-50	10 <sup>-5</sup> -100	min-h	ms	0,1-0,3	min-dia
BAT. NaS	0,05-50	6-600	s-h	ms	0,05-20	s-h
BAT. FLUXO VRB	0,005-7	0,01-10	s-10h	ms	0,2	h-mês
HIDROGÊNIO	0,1-1000	100-1000	1-24h	s-min	muito baixa	h-mês
Supercapacitores	0,001-10	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-2</sup>	ms-h	ms	20-40	s-h
SMES	0,01-10	10 <sup>-4</sup> -0,1	ms-min	ms	10-15	min-h

Tabela 3.13: Características das tecnologias. Fonte: GALLO, A. B. et al, 2016 - adaptado (continuação).

TECNOLOGIA	EFICIÊNCIA (%)	VIDA ÚTIL		DENSIDADE DE ENERGIA (Wh/l)	CUSTOS	
		ANOS	CICLOS (80% DOD)		POTÊNCIA (\$/kW)	ENERGIA (\$/kWh)
PHS	65-85	30-60	n/a	0,5-1,5	600-2000	5-100
Volante de Inércia	75-95	15-20	20000-100000	20-80	250-350	1000-5000
CAES (D-CAES)	40-60	20-40	n/a	3-12	400-800	2-50
BAT. PbA	70-90	5-15	400-1500	20-50	300-600	200-400
BAT. LI-ION	85-95	5-15	2000-5000	200-500	1200-4000	600-2500
BAT. NaS	70-90	10-15	4000-4500	100-240	1000-3000	300-500
BAT. FLUXO VRB	60-85	5-15	10000-13000	10-35	600-1500	150-1000
HIDROGÊNIO	30-50	20-30	n/a	500-3000	1900-6300	1-10
Supercapacitores	85-95	10-20	>100000	25-50	100-360	300-2000
SMES	80-90	15-20	>100000	0,5-5	200-350	1000-10000

## **4. ESTUDO DE VIABILIDADE**

### **4.1. ASPECTOS TÉCNICOS**

A viabilidade técnica é fundamental para que o sistema atenda adequadamente aos requisitos técnicos solicitados para uma determinada aplicação, como o tempo de descarga, tempo de resposta, capacidade de armazenamento, eficiência, densidades de energia, potência, área, etc.

#### **4.1.1. Larga Escala**

Para o suporte à geração das usinas VREs, o sistema de armazenamento precisa possuir uma capacidade de armazenamento da ordem de dezenas MW. Como já mencionado, precisa ainda suprir variações de minutos à várias horas, e possuir ainda rápidos tempos de resposta, importante para acompanhar as taxas de variação de geração das VREs (SIMÕES-MOREIRA, 2017). Além disso a tecnologia com o propósito de suportar usinas de geração eólica e solar, (geração renovável com volume mais significativo no Brasil), precisam de certa flexibilidade de implantação, sem portanto, grandes restrições principalmente geográficas, já que tais restrições já são intrínsecas às gerações solar (área e índice de radiação) e eólica (área, velocidade e constância dos ventos).

Observa-se porém que o pico da geração de energia solar ocorre justamente quando a demanda também é alta e conseqüentemente o custo da energia acompanha a demanda, isso faz com que o armazenamento de energia de uma fonte solar, em larga escala, não seja tão atrativa comercialmente, quando conectada diretamente ao sistema elétrico (IRENA, 2015). Isso é válido quando analisamos apenas do ponto de vista do deslocamento da demanda, porém outras aplicações viáveis existem, como no caso de uma região isolada, por exemplo. O excedente da geração de energia pelos painéis fotovoltaicos pode ser utilizada em períodos em que a geração é menor ou inexistente, como o período noturno. Dessa forma o armazenamento de energia auxilia também na redução da emissão de gases de efeito estufa, visto que na grande maioria dos casos, a demanda de energia é suprida, principalmente, por térmicas a óleo diesel (ONS, 2018).

Já a geração eólica, apesar de bastante previsível, dependendo de onde a usina está localizada, apresenta o pico de geração que não necessariamente coincide com o pico de consumo. A figura 4.1 a seguir representa um cenário onde a geração é maior durante a noite, sendo a demanda menor que a energia gerada nesse período,

havendo portanto possibilidade de armazenamento. A energia armazenada é devolvida ao sistema à partir do meio do dia, quando a demanda cresce substancialmente, e o ciclo se fecha com o início da próxima noite.

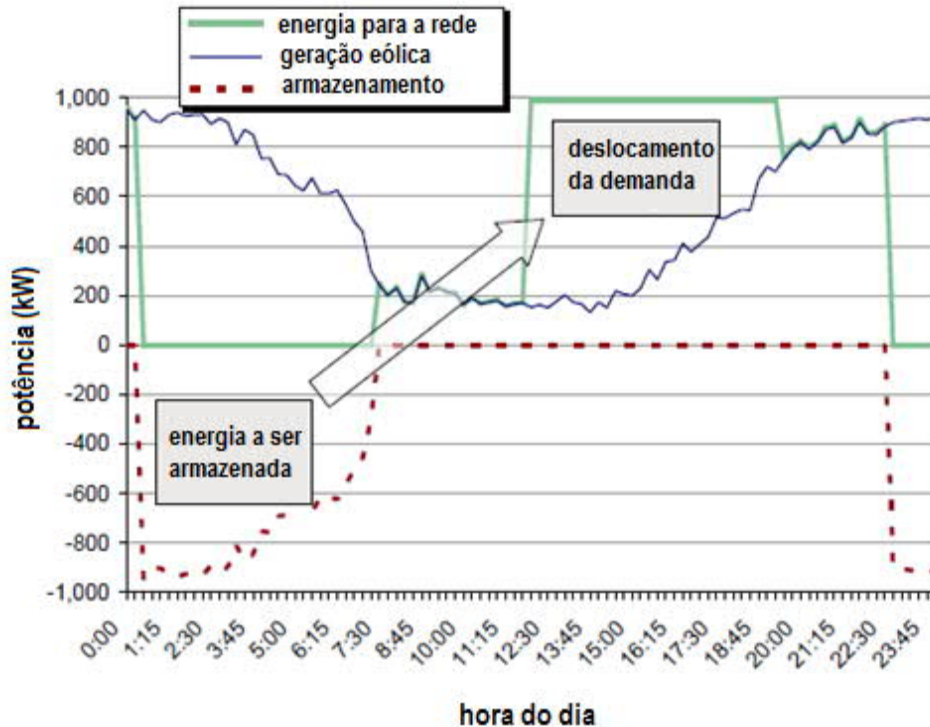


Figura 4.1 – Geração de energia eólica, deslocamento da demanda. Fonte: SANDIA, 2010

Portanto, uma das aplicações para o armazenamento em larga escala à partir de fontes renováveis conectada ao sistema, torna-se mais viável quando a geração ocorre no período em que o custo da energia é baixo, retornando ao sistema quando é mais elevado.

Ao verificar os dados expostos na tabela 3.13, podemos verificar um potencial bastante relevante para o CAES e para sistemas de armazenamento com o uso de baterias de lítio, pelo fato de aderirem ao mesmo tempo a maior parte dos requisitos necessários.

CAES (diabático) é uma tecnologia que proporciona uma capacidade de potência compatível com o armazenamento da geração eólica (5~300MW), possui ainda um tempo moderado de descarga (período 5 à 10 horas), possui baixo índice de auto-descarga (0,003~0,03% ao dia), além de ser uma tecnologia madura e consolidada. Para aplicação junto às usinas existentes, o armazenamento do ar-comprimado deve ser realizado por vasos de pressão não naturais, o que eleva o custo implantação. A tecnologia caracteriza-se também pela baixa eficiência (40-60%) e

pela baixa densidade de energia, o que implica em uma área da usina eólica dedicada para implantação do sistema de armazenamento,

Outra alternativa tecnicamente viável é a utilização do armazenamento através de baterias de lítio. Possui uma capacidade de armazenamento (0,1~50MW) bastante razoável além de apresentar menor tempo de resposta. O armazenamento pode ser mantido por dias, com baixíssima taxa de auto perda. Possui uma elevada densidade de energia (200~500Wh/l) e eficiência entre 85~95%. É uma das tecnologias que mais se destaca no armazenamento de energia elétrica, por sua versatilidade, sendo aplicada desde celulares, carros elétricos, até em aplicações residenciais e industriais, possuindo um grande potencial para suporte às renováveis.

Em ambas as alternativas, CAES e baterias de lítio são necessárias infraestruturas para que a implantação do sistema de armazenamento funcione adequadamente, tanto do ponto de vista funcional e técnico, tanto quanto para segurança das pessoas e meio-ambiente.

#### **4.1.2. Baixa Escala**

O suporte ao usuário final em relação à integração com as renováveis (principalmente painéis solares instalados sobre os telhados de residências), é também chamado de gerenciamento de energia (do inglês: *energy management*).

O principal objetivo é a redução da demanda de energia solicitada da rede. Para tanto, o tipo de tecnologia de armazenamento deve possuir capacidade de armazenamento da ordem de centenas de kW, e possuir moderados tempos de resposta. Assim como para as aplicações em larga escala, a flexibilidade de implantação é um parâmetro extremamente importante a ser avaliado. Como o sistema serão aplicados em residências, as densidades de área, energia e potência devem ser bastante otimizadas, visto que o sistema deve se adaptar às limitações físicas impostas pela construção (espaço limitado).

Ao novamente avaliar a tabela 3.13, agora com foco em baixa escala, verificamos os tipos de tecnologia com maior potencial de atendimento dos critérios necessários para tal aplicação. Dentre tais critérios, tradicionalmente as baterias são as que melhor se adaptam. Mesmo na família das baterias, nem todas possuem os requisitos mais adequados para uma aplicação residencial. Nesse cenário a tecnologia de lítio-ion é a que mais se destaca e possui maior relevância comercial. Isso se deve à alta densidade de energia (200~500Wh/l), alta eficiência, baixa taxa de

auto-descarga, além de ser uma tecnologia comercialmente bastante explorada para diversas aplicações, o que aumentada a demanda da indústria e impulsiona o desenvolvimento e aperfeiçoamento. Um exemplo bastante importante são as Powerwall, fabricados pela companhia Tesla (TESLA, 2018), que utilizam a tecnologia de lítio-ion para aplicações de armazenamento de energia residencial, sendo que cada “módulo” possui uma potência de até 5kW, continuamente, e garantia do fabricante de até 10 anos.

Assim como em aplicações de larga escala, o armazenamento por hidrogênio também é destaque para aplicações menores. Carolina Pinto (2014) em seu trabalho estuda justamente a aplicação de células de combustível movidas à hidrogênio para aplicação residencial, onde painéis solares produzem energia durante o dia (enquanto há sol) fornecendo energia para atender à demanda da residência, o excedente é utilizado para produção e armazenamento de hidrogênio. No período noturno ou em dias nublados a célula de combustível é acionada para a produção de energia de forma a atender à demanda de consumo. Isso só é possível pelas características da tecnologia de armazenamento por hidrogênio, mencionadas anteriormente.

Porém uma barreira para a utilização do armazenamento por hidrogênio é seu armazenamento. Pelo fato de possuir baixa densidade energética por volume, é necessário que seja comprimido, sendo ainda um gás inflamável. Isso faz com que seja montada uma certa infra-estrutura, que envolve alojamento adequado para o armazenamento dos cilindros de H<sub>2</sub>, para as células de combustível, e eletrolisador. Isso, de certa forma, limita a aplicação para construções existentes, ao passo que as baterias, de forma geral, requisitam menos componentes e dispositivos para compor o sistema, o que ajuda na praticidade de implantação.

#### 4.2. ASPECTOS ECONÔMICOS

Também é importante avaliar a viabilidade econômica de implantação dos sistemas de armazenamento, de forma que justifique o investimento. Para tanto podemos recorrer novamente à tabela 3.13, onde temos os valores típicos de implantação e de geração por megawatt de acordo com cada tecnologia. Vale ressaltar que os custos são médios, e portanto certamente haverá variação, de acordo com a característica específica de cada empreendimento. De qualquer forma é possível estabelecer um parâmetro financeiro entre as tecnologias.

Do ponto de vista da aplicação em larga escala, observa-se que o investimento inicial para implantação do sistema CAES é bastante inferior, se comparado ao armazenamento por baterias de lítio.

De maneira análoga, o comportamento em baixa escala é bastante similar. O custo inicial de implantação de um sistema por baterias de lítio é menor do que no armazenamento por H<sub>2</sub>, porém tal diferença dos custos não é tão grande quanto a do CAES para o armazenamento em baterias de lítio em larga escala. Observa-se porém que o custo do megawatt armazenado por baterias de lítio é bem maior do que por hidrogênio.

Dessa forma, além do custo de implantação em si, que como já citado pode variar de acordo com as características de cada empreendimento, é necessário também levar em conta o custo do armazenamento do megawatt, além dos custos relativos à operação e manutenção ao longo da vida útil do próprio sistema.

## 5. ESTUDO DE CASO 1: APLICAÇÃO EM LARGA ESCALA NO NORDESTE BRASILEIRO

### 5.1. MODELO: ESCONDIDO, CALIFÓRNIA – EUA.

Como abordado no capítulo 2, o potencial para armazenamento de energia elétrica é bastante expressivo, porém ainda muito pouco explorado se comparado com o que ocorre em outros países que já possuem projetos implantados bastantes significativos, mesmo que alguns ainda estejam em fase de demonstração. Diante disso é necessário que o Brasil comece, de fato, a implantar projetos mais relevantes na rede de modo que ganhemos experiência e possamos desenvolver nossas próprias soluções e aplicações para os problemas e situações particulares à nossa realidade voltadas principalmente na integração com as renováveis intermitentes.

Como modelo, vamos nos espelhar no projeto de armazenamento de energia elétrica implementado pela empresa FLUENCE (joint venture entre SIEMENS e AES Energy Storage) em 2017.

Localizado na cidade de Escondido no estado da Califórnia, EUA, é a maior planta de armazenamento de energia elétrica por baterias de lítio do mundo. A planta é composta por 400.000 baterias, dispostas em 24 containers. Possui capacidade de armazenamento de 30MW/120MWh, o suficiente para abastecer aproximadamente 20.000 residências por um período de 4 horas. Segundo o catálogo do fabricante, cada container pode ter uma capacidade de armazenamento de energia de até 6MWh (SAMSUNG 2018).



Figura 5.1 – Instalação dos sistema de armazenamento 30MW/120MWh, Escondido, Califórnia – EUA - Fonte: FLUENCE, 2018

O projeto teve seu início em 2016, quando a concessionária local (FLUENCE, 2018) buscou alternativas para aumentar a confiabilidade do sistema, permitindo maior integração com as VREs. Como premissa, a alternativa técnica deveria atender o suprimento de energia, em horário de pico, principalmente à noite, onde a geração por solar fotovoltaica já não supri a demanda, mantendo porém as políticas do estado de controle de emissões de gases de efeito estufa, sendo assim, soluções “tradicionais” como a instalação de usinas térmicas para suprir a geração em horário de pico, quando não há sol suficiente para a geração solar atender à demanda não foram consideradas como solução. Ao final de mais de 1000 propostas, chegou-se à conclusão de que o armazenamento de energia seria a melhor solução para a situação em questão. (FLUENCE CASE STUDY, 2018).

O estado da Califórnia possui políticas bastante inovadoras e ousadas para as questões de geração de energia renovável. O estado possui um enorme potencial solar (bons índices de radiação solar por m<sup>2</sup>). Com o intuito de explorar esse potencial de maneira efetiva, em 2007 foi criado o programa de incentivo à instalação de um milhão de painéis solares fotovoltaicos (*Million Solar Roofs*) em todo o estado até o ano de 2018. A partir desse marco regulatório observou-se que a matriz elétrica do estado passou a possuir uma parcela significativa de fontes solares, principalmente a partir de 2011, atingindo uma marca bastante expressiva já em 2017, o que antes era praticamente inexistente.

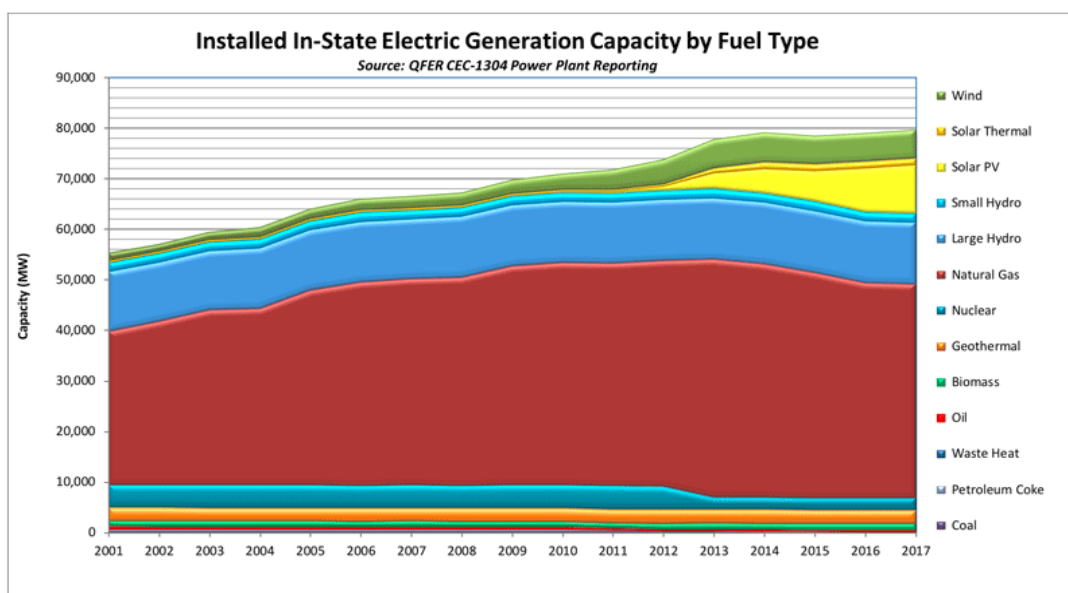


Figura 5.2 – Matriz elétrica do Estado da Califórnia entre 2001 e 2017 – Fonte: CALIFORNIA ENERGY COMMISSION

Agora o estado já almeja produzir 100% de energia elétrica consumida através de fontes renováveis até 2045. A legislação aprovada em Setembro de 2018 prevê avançar gradualmente até a meta final, com objetivo de 50% de energias limpas até 2025, 60% até 2030, e finalmente 100% em 2045. Esses 100%, por sua vez, devem incluir pelo menos 60% de energias renováveis - solar, eólica, geotérmica, e geração hidrelétrica de pequena escala -, e os outros 40% podem vir de fontes limpas, mas não estritamente renováveis, o que inclui nuclear, grandes hidrelétricas e gás natural que capturem e armazenem o dióxido de carbono (EFE, 2018).

O Brasil, assim como o estado da Califórnia possui grande potencial solar e eólico e também tem inserido mais fontes intermitentes em sua matriz elétrica. Precisamos nos espelhar em casos como esse e traçar um paralelo à nossa realidade. É o que será abordado no tópico 5.2 à seguir.

## 5.2. APLICAÇÃO NO BRASIL – SITUAÇÃO PROBLEMA.

A grande maioria dos empreendimentos com geração de energia eólica ou solar encontram-se no Nordeste brasileiro. Isso se deve ao fato de que o potencial solar e eólico estão concentrados nessa região, como pode ser evidenciado nos mapas de radiação solar e potencial eólico nas figuras 5.3 e 5.4 respectivamente.

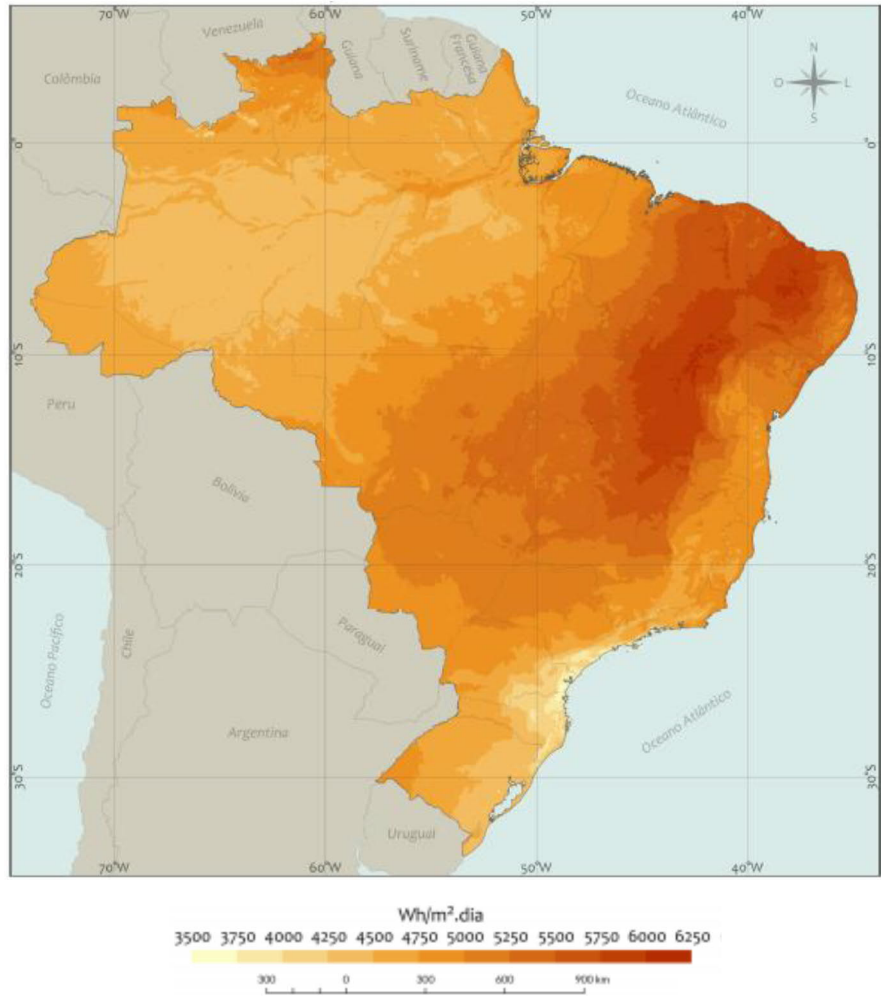


Figura 5.3 – Mapa de Irradiação Solar no território brasileiro – Fonte: INPE, 2017

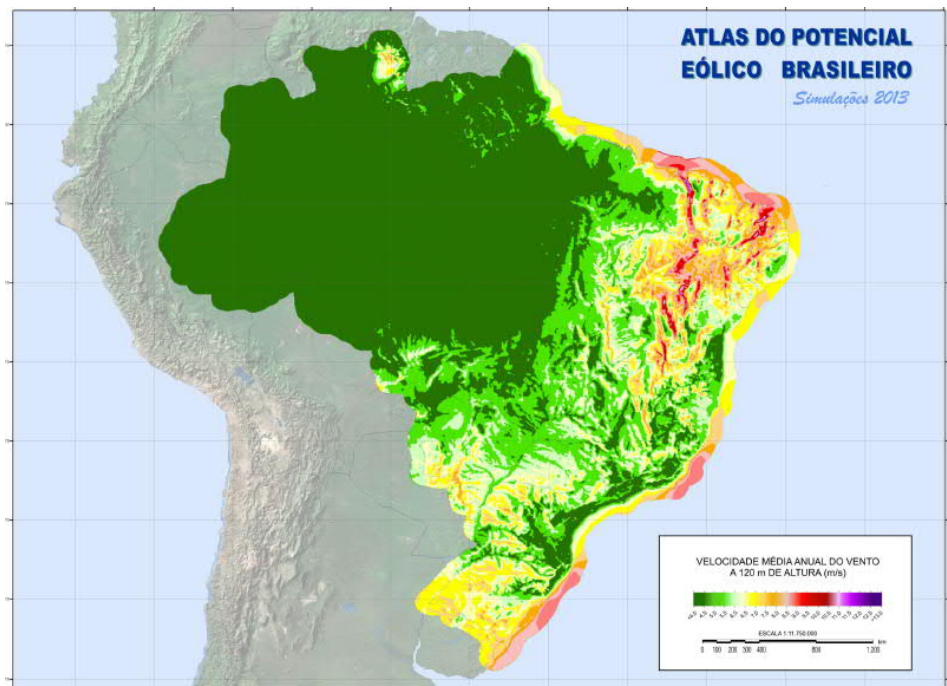


Figura 5.4 – Mapa do Potencial Eólico no território brasileiro – Fonte: CEPEL, 2017

Visando minimizar os problemas causados pela intermitência, seja por falta de radiação solar ou por inconstância dos ventos, os sistemas de armazenamento de energia podem passar a ter papel fundamental no cenário brasileiro.

De modo geral as usinas termelétricas brasileiras têm caráter de funcionarem como reserva, pela flexibilidade de geração, sendo acionadas em caso de crise energética, geralmente para compensar a falta de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas ou o aumento de consumo e, assim, preservar a capacidade de geração de energia dessas hidrelétricas nos meses seguintes (ANDRADE, 2014).

O armazenamento de energia pode minimizar a necessidade da utilização de tais usinas, pelo armazenamento de energia gerado por fontes intermitentes. Diante disso vamos analisar uma situação hipotética de implantação de um sistema de armazenamento de energia no Nordeste brasileiro com a função de substituir uma usina termelétrica com a função de suportar a capacidade de fornecimento de energia de fontes intermitentes, numa de capacidade de potência equivalente.

### 5.2.1. Definição Técnica.

Para o sistema proposto, selecionaremos uma solução compacta desenvolvida pela ABB (EssPro Grid-Compact). Trata-se de um módulo que se apresenta como uma solução “plug and play”, pois além das próprias baterias, também é equipado com todo o sistema de controle, proteção e transformador, combinada em uma única plataforma (container) com capacidade de até 2,1MW e 2,4MWh.



Figura 5.5 – Ilustração de container de armazenamento de energia 2,1MW – Fonte: ABB, 2017

Assim como ocorre na planta da Califórnia, o objetivo é que a instalação forneça energia por até 4 horas, sem necessidade de carregamento. Como a energia de cada módulo é de no máximo 2,4MWh e o objetivo é manter o fornecimento o mais próximo

possível de 20MW a cada hora. Seguindo as informações de catálogo do fabricante são necessários 40 containers, fornecendo a energia de 24MW/96MWh.

$2,4\text{MW} \times 10$  (módulos) = 24MWh (por 1 hora);

Em 4 (horas) = 96MWh;

Portanto para atender 96MWh, durante 4 horas são necessários 40 containers.

De qualquer modo iremos considerar uma descarga de 80% por dia, o que implica num sistema com maior capacidade instalada, sendo:

$24\text{MWh}/0,8 = 30\text{MWh}$  (por 1 hora – capacidade instalada DOD de 80%)

Em 4 (horas) = 120MWh;

Portanto para atender 120MWh, durante 4 horas são necessários 50 containers.

A tabela 5.1 apresenta a especificação técnica do módulo com características elétricas e dimensionais.

Tabela 5.1 – Características elétricas e dimensionais - EssPro Grid-Compact – ABB. Fonte: ABB, 2017

<b>EssPro Grid-Compact - ABB</b>	
Potência	1000kW à 2100kW
Energia	500kWh à 2400kWh
Tensão AC	< 35kV
Frequência	50 ou 60Hz
Eficiência	> 98% (conversor)
Tecnologia	Bateria de Lítio
Dimensões (CxLxA)	13.500 x 2.400 x 2700mm
Massa (tonelada)	35 à 45

Devido às dimensões de cada módulo, a área aproximada para acomodação do sistema é de aproximadamente 3800m<sup>2</sup>. Está sendo considerado que o sistema aqui proposto possui capacidade de manter as características de catálogo por até 4000 ciclos de descarga. Considerando que o sistema seria acionado todos os dias, 7 dias por semana, o sistema teria portanto uma vida útil de aproximadamente 11 anos.

### 5.2.2. Viabilidade Financeira

Para verificarmos a viabilidade financeira, analisaremos os custos envolvidos para a implantação, operação e manutenção de uma usina Termelétrica com capacidade instalada de 24MW, com turbinas à gás natural de ciclo combinado. Os custos serão comparados aos do sistemas de armazenamento proposto.

Os custos apresentados nas tabelas 5.2 e 5.3, foram compilados de relatórios e estudos utilizados como bibliografia para a execução desse trabalho, além de informações obtidas dos próprios fabricantes.

Tabela 5.2 – Custos estimados para Implantação, Operação e Manutenção de uma usina termelétrica à gás natural de ciclo combinado. Fonte: TOLMASQUIN, 2016.

TGCC			
Custo Implantação	US\$/kW	\$ 1.100,00	\$ 26.400.000,00
O&M custo fixo	US\$/kW.ano	\$ 18,00	\$ 1.183,56
O&M custo variável	US\$/kWh	\$ 0,006	\$ 576,00
Custo combustível	US\$/kWh	\$ 0,0575	\$ 5.520,00
			\$ 7.279.561,64
			R\$ 28.535.881,64
CUSTO MW			R\$ 297,25

Na tabela 5.2, temos os custos relativos à implantação de uma usina térmica, com o custo de implantação foi referenciado à potência nominal instalada de 24MW. Os custos de fixos de O&M considerados são relativos à um dia de geração por um período de 4 horas (96MWh). Da mesma maneira foram calculados os custos variáveis de O&M e os custos de combustível. A cotação do dólar considerada para conversão para o real foi de R\$ 3,92, obtendo-se um valor total por MW gerado de R\$ 297,25.

Tabela 5.3 – Custos estimados para Implantação, de um sistema de armazenamento de energia à bateria de lítio.

BATERIA LITIO			
Custo Implantação	US\$/kW	\$ 1.200,00	\$ 115.200.000,00
O&M custo fixo	US\$/kW.ano	\$ -	\$ -
O&M custo variável	US\$/kWh	\$ -	\$ -
Custo combustível	US\$/kWh	\$ -	\$ -

	\$ 115.200.000,00
	R\$ 451.584.000,00
<b>CUSTO MW</b>	R\$ 4.704,00

Na tabela 5.3, temos os custos relativos à implantação de um sistema de armazenamento de energia por baterias de lítio, com capacidade de 30MW/120MWh (com profundidade de descarga de 80% ao dia). Os custos de O&M não foram contabilizados pela dificuldade de se obter tais informações. Sendo o sistema de armazenamento um acumulador de energia, independentemente da fonte de geração a qual está conectado, não foi considerado o custo do armazenamento de energia por unidade de potência.

Observa-se que o custo do MW gerado por uma usina térmica à gás natural é mais de 15 vezes menor do que o custo do armazenamento da mesma quantidade de energia num sistema à baterias. Isso se deve principalmente pela questão tecnológica e produtiva das baterias, que ainda tende a receber significativos aprimoramentos dentro dos próximos anos e certamente isso acarretará em preços mais competitivos. De qualquer modo, também deve ser levado em consideração a questão ambiental. Quando um sistemas de armazenamento de energia é conectados à uma fonte de energia renovável, praticamente não há emissão de poluentes, quando se busca atender a demanda quando a geração por fontes renováveis é insuficiente, ao passo que se uma térmica é acionada para a mesma finalidade, a queima do combustível fóssil trará esse ponto negativo.

## **6. ESTUDO DE CASO 2: APLICAÇÃO EM BAIXA ESCALA - RESIDENCIAL**

### **6.1. A TARIFA BRANCA.**

A tarifa branca é a nova opção que o consumidor passou a ter acesso à partir de Janeiro de 2018 onde poderá optar por uma tarifação variável de acordo com o dia e horário de consumo. Até o final de 2018, apenas os consumidores que têm consumo superior à 500kWh/mês. À partir 2019 terão acesso à tarifa consumidores com consumo superior à 250kWh/mês, e de 2020 em diante todos os consumidores terão acesso, independentemente do consumo mensal. A tarifa branca é uma oportunidade de redução do custo da energia para os consumidores que puderem consumir energia nos períodos de menor demanda (manhã, início da tarde e madrugada, por exemplo). Antes de optar pela tarifa branca o consumidor precisa conhecer o perfil de consumo de energia que pratica, de modo que a opção possa de fato ser financeiramente vantajosa. Antes da criação da tarifa branca, havia apenas uma tarifa, a convencional, que tem um valor único (em R\$/kWh) cobrado pela energia consumida que é igual em todos os dias, em todas as horas. A nova modalidade cria condições que incentivam alguns consumidores a deslocarem o consumo dos períodos de ponta para aqueles em que a rede de distribuição de energia elétrica tem capacidade ociosa. Este benefício reduz a necessidade de expandir a rede elétrica (ANEEL, 2018).

Na tarifa branca o custo do valor da energia varia de acordo com o horário em que é consumida. São definidos três horários, ponta, fora de ponta e intermediário. O horário de ponta pode variar em função da definição da concessionária local, sendo geralmente definido entre às 18h e 21h. O horário intermediário é definido como duas horas diárias, sendo uma antes e outra depois do horário de ponta. Todos os demais horários em que ocorrer o consumo é considerado como fora de ponta, sendo portanto o de menor custo para o consumidor. Vale ressaltar que durante finais de semana e feriados nacionais, todo o consumo é considerado como fora de ponta conforme determinação ANEEL.

A proposta, em baixa escala, é a de verificar o custo-benefício dessa nova modalidade em relação ao armazenamento de energia suportando à geração intermitente através dos painéis fotovoltaicos, instalados em residências. Para isso teremos as seguintes premissas:

- Consumo médio mensal: 250kWh (8,33kWh/dia);
- Custo do kW/h em Guarulhos, concessionária EDP (tarifas sem impostos):

Tabela 5.4 – Valor das tarifas de energia elétrica da concessionária EDP. Fonte: ANEEL, 2017 - adaptado

Tarifa	TUSD	TE	Valor Tarifa
	(R\$/kWh)	(R\$/kWh)	(R\$/kWh)
Convencional	0,34480	0,46150	0,80630
Branca (FP)	0,27091	0,36261	0,63352
Branca (I)	0,39406	0,52743	0,92149
Branca (P)	0,64034	0,85707	1,49741

- Custo aproximado de um sistema fotovoltaico de 1,8kWp: R\$ 15.000,00  
(Sistema para suprir toda a demanda de 250kWh/mês / HSP de 5h por dia, entre 12:00 e 17:00h)
- Custo do sistema de armazenamento de 13,5kWh (Tesla Power Wall): R\$ 28.000,00  
(Considerando 5h de armazenamento diário, profundidade de descarga de 80% ao dia)
- 75% do consumo diário entre 18:00h e 22:00h, restante consumo constante ao longo do dia.  
(Consumo ao longo dos dias da semana).

Análise 1: Tarifa convencional – sem sistema fotovoltaico, sem armazenamento de energia por baterias.

Tabela 5.5 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa convencional.

Consumo	Tarifa	% Consumo	R\$/kW/h	1 DIA		30 DIAS	
				kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh
<b>Concessionária</b>	Convencional	100%	R\$ 0,80630	8,33	R\$ 6,72	250	R\$ 201,58

SALDO	DÉBITO	8,33	R\$ 6,72	250,00	R\$ 201,58
	CRÉDITO	0,00	R\$ -	0	R\$ -

Na tabela 5.5 podemos verificar o custo mensal de energia na situação proposta (demanda, característica do consumo, custo do quilowatt-hora, etc), utilizando a tarifa convencional, que servirá de base para comparação com os demais cenários.

Análise 2: Tarifa convencional – sistema fotovoltaico, sem armazenamento de energia por baterias.

Tabela 5.6 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa convencional, com sistema fotovoltaico.

Consumo	Tarifa	% Consumo	R\$/kWh	1 DIA		30 DIAS	
				kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh
<b>Concessionária</b>	Convencional	100%	R\$ 0,80630	8,33	R\$ 6,72	250	R\$ 201,58

Geração	Tarifa	% Geração	HSP (h)	kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh

SALDO	DÉBITO	0,00	R\$ -	0,00	R\$ -
	CRÉDITO	0,67	R\$ 0,54	20	R\$ 16,13

Tabela 5.7 – Payback do investimento do sistema fotovoltaico – tarifa convencional.

INVESTIMENTO	R\$ 15.000,00
ECONOMIA MENSAL	R\$ 217,70
PAYBACK SIMPLES (ANOS)	5,7
VIDA ÚTIL (ANOS)	20
ECONOMIA TOTAL	R\$ 37.248,24

No cenário da utilização da geração fotovoltaica, com capacidade de atender toda a demanda, temos uma economia bastante significativa, se comparada à situação anterior. Nesse caso a energia gerada é entregue à concessionária durante o período em que há geração solar. No período de pico de consumo a energia é consumida da rede. O excedente de energia gerado fica mantido como crédito para o usuário, por um período de até 60 meses.

Análise 3: Tarifa branca – sem sistema fotovoltaico, sem armazenamento de energia por baterias.

Tabela 5.8 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa branca.

Consumo	Tarifa	% Consumo	R\$/kWh	1 DIA		30 DIAS	
				kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh
<b>Concessionária</b>	Branca (FP)	25%	R\$ 0,63352	2,08	R\$ 1,32	62,5	R\$ 39,60
	Branca (I)	19%	R\$ 0,92149	1,56	R\$ 1,44	46,875	R\$ 43,19
	Branca (P)	56%	R\$ 1,49741	4,69	R\$ 7,02	140,625	R\$ 210,57
				8,33	R\$ 9,78	250	R\$ 293,36

SALDO	DÉBITO	8,33	-R\$ 9,78	250,00	R\$ 293,36
	CRÉDITO	0,00	R\$ -	0	R\$ -

Ao realizar a análise utilizando-se da tarifa branca, temos a variação do custo da energia de acordo com a tarifa aplicada, que varia com o período que ocorre o consumo. No caso específico da situação aqui estudada, pelo fato do pico de consumo (75%) ocorrer justamente no horário de pico, a adesão da tarifa branca não seria uma alternativa economicamente viável, levando a um acréscimo de 68% no custo mensal da energia.

Análise 4: Tarifa branca – com sistema fotovoltaico, sem armazenamento de energia por baterias.

Tabela 5.9 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa branca, com sistema fotovoltaico.

Consumo Concessionária	Tarifa	% Consumo	R\$/kW/h	1 DIA		30 DIAS	
				kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh
	Branca (FP)	25%	R\$ 0,63352	2,08	R\$ 1,32	62,5	R\$ 39,60
	Branca (I)	19%	R\$ 0,92149	1,56	R\$ 1,44	46,875	R\$ 43,19
	Branca (P)	56%	R\$ 1,49741	4,69	R\$ 7,02	140,625	R\$ 210,57
				8,33	R\$ 9,78	250	R\$ 293,36

Geração Fotovoltaica	Tarifa	% Geração	HSP (h)	kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh
	Branca (I)	19%	0	0	R\$ -	0	R\$ -
	Branca (P)	56%	0	0	R\$ -	0	R\$ -
				9,00	R\$ 5,70	270	R\$ 171,05

SALDO	DÉBITO	0,00	R\$ 4,08	0,00	R\$ 122,31
	CRÉDITO	-8,33	R\$ -	20	R\$ -

Tabela 5.10 – Payback do investimento do sistema fotovoltaico – tarifa branca.

INVESTIMENTO	R\$ 15.000,00
ECONOMIA MENSAL	R\$ 171,05
PAYBACK SIMPLES (ANOS)	7,3
VIDA ÚTIL (ANOS)	20
ECONOMIA TOTAL	R\$ 26.052,19

Ao implantar um sistema de geração fotovoltaica para atender toda a demanda de consumo, ainda é viável economicamente, porém o ganho é menor se comparado ao mesmo sistema implementado na tarifa convencional. Isso se deve ao fato da geração ocorrer em horário fora de ponta, onde o valor do crédito a ser gerado pela concessionária também é menor.

Análise 5: Tarifa branca – sem sistema fotovoltaico, com armazenamento de energia por baterias.

Tabela 5.11 – Custo estimado do consumo de 250kWh/mês em tarifa branca, com sistema de armazenamento de energia.

Consumo Concessionária	Tarifa	% Consumo	R\$/kW/h	1 DIA		30 DIAS	
				kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh
	Branca (FP)	100%	R\$ 0,63352	8,33	R\$ 5,28	250	R\$ 158,38
	Branca (I)	0%	R\$ 0,92149	0,00	R\$ -	0	R\$ -
	Branca (P)	0%	R\$ 1,49741	0,00	R\$ -	0	R\$ -
				8,33	R\$ 5,28	250	R\$ 158,38

Armazenamento Baterias	Tarifa	% Armaz.	R\$/kW/h	kWh	R\$/kWh	kWh	R\$/kWh
	Branca (I)	0%	R\$ -	0,00	R\$ -	0	R\$ -
	Branca (P)	0%	R\$ -	0,00	R\$ -	0	R\$ -
				8,33	R\$ 5,28	250	R\$ 158,38

SALDO	DÉBITO	8,33	-R\$ 5,28	250,00	R\$ 158,38
	CRÉDITO	0,00	R\$ -	0	R\$ -

Tabela 5.12 – Payback do investimento do sistema de armazenamento – tarifa branca

INVESTIMENTO	R\$ 28.000,00
ECONOMIA MENSAL	R\$ 134,98
PAYBACK SIMPLES (ANOS)	17,3
VIDA ÚTIL (ANOS)	15
ECONOMIA TOTAL	-R\$ 3.703,01

No caso da implantação de um sistema de armazenamento de energia com o objetivo de armazenar energia quando o custo é menor para utilizar nos horários de pico, observamos que o custo ainda torna a aplicação economicamente inviável. Porém os custos de sistemas de armazenamento tem caído de forma bastante expressiva nos últimos anos, o que num futuro próximo se tornará vantajosa, além de prestar um serviço de auxílio à rede de distribuição.

## 7. CONCLUSÃO

Com a crescente demanda por energia, e com a busca da diminuição da dependência de outras fontes de energia não renovável, armazenar é fundamental para o uso consciente de energia. Existem várias tecnologias disponíveis, sendo algumas bastante maduras, outras com expressiva escala comercial, enquanto outras ainda em pesquisa e desenvolvimento para uma consolidação comercial futura.

Assim como as tecnologias, existem diversas aplicações em que o armazenamento de energia pode auxiliar o sistema elétrico. Sendo uma, dentre tais aplicações, o suporte às fontes renováveis, que tem crescido de forma bastante significativa na participação da matriz elétrica brasileira nos últimos anos. Em tal aplicação o principal objetivo é a diminuição das intermitências e deslocamento da demanda, prestando assim um serviço ao sistema como um todo, mas também ao próprio usuário final, que pode cada vez menos depender da concessionária local para seu abastecimento de energia elétrica, tornando-se assim cada vez mais autossuficiente.

Existem ainda as barreiras, sendo a primeira delas econômica, relacionada à viabilidade, pois de modo geral os equipamentos ainda são relativamente caros, enquanto a segunda é relativa às barreiras regulatórias que devem ser rompidas com incentivos governamentais. Tais incentivos devem ocorrer na redução da taxa de impostos para sistemas de armazenamento, flexibilizações regulatórias, além de incentivos às universidades e iniciativa privada para intensificação em projetos pesquisa e desenvolvimento, buscando maiores avanços tecnológicos com maior acessibilidade econômica tanto em larga, quanto em baixa escalas.

Deve haver por parte dos órgãos reguladores brasileiros mais iniciativas de projetos pilotos de maneira mais expressiva, à exemplo da chamada 21. Mesmo que ainda não totalmente viável economicamente, tecnicamente o armazenamento de energia traz inúmeros benefícios técnicos além de sociais e ambientais, tanto em larga quanto em baixa escala. Em ambas as situações podemos ter uma redução significativa do uso de energia através de combustível fóssil, além de utilizar a energia por fontes renováveis de forma mais constante, eficiente e portanto, racional, evitando até mesmo a construção de novas usinas de geração de energia. A barreira econômica se apresenta cada vez menor com o passar do tempo e quando de fato não se apresentar mais como uma barreira, precisamos estar preparados para lidar

para a inserção em massa de sistemas de armazenamento de energia elétrica no SIN, e para possíveis implicações particulares que pode causar em nosso sistema elétrico.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABB. **ENERGY STORAGE SOLUTIONS - EssPro™ Grid Battery energy storage systems - The power to control energy**. Catálogo de produto, 2017.
- [2] ANDRADE, Leandro Sena. **Armazenamento de Energia em Ar Comprimido**. 2014. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia, São Paulo, 2014.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Empreendimentos em Operação**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/dados/geracao>. Acesso em 18/11/2018.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. Brasília: ANEEL, 2012.
- [5] **Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/tarifa-branca-e-nova-opcao-para-os-consumidores-a-partir-de-2018/656877?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/tarifa-branca-e-nova-opcao-para-os-consumidores-a-partir-de-2018/656877?inheritRedirect=false). Acesso em 19/12/2018.
- [6] **Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_count=2&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content&\\_101\\_assetEntryId=14788022&\\_101\\_type=content&\\_101\\_groupId=654800&\\_101\\_urlTitle=tarifa-branca-perguntas&inheritRedirect=true](http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=2&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=14788022&_101_type=content&_101_groupId=654800&_101_urlTitle=tarifa-branca-perguntas&inheritRedirect=true). Acesso em 19/12/2018.
- [7] **ANELL**. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/agencia-aprova-23-propostas-da-chamada-de-p-d-sobre-armazenamento-de-energia/656877](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/agencia-aprova-23-propostas-da-chamada-de-p-d-sobre-armazenamento-de-energia/656877). Acesso em 19/12/2018.
- [8] ANELL. **Chamada Nº 021/2016. Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”**. Brasília, DF, 2016.
- [9] BARBOUR, Edward. **Energy Storage Sense: Supercapacitors**. Disponível em <http://energystoragesense.com/supercapacitors/>. Acesso em 15/10/2018.
- [10] **CALIFORNIA ENERGY COMISSION**. Disponível em [https://www.energy.ca.gov/almanac/electricity\\_data/electric\\_generation\\_capacity.html](https://www.energy.ca.gov/almanac/electricity_data/electric_generation_capacity.html). Acesso em 19/12/2018.
- [11] CANALES, Fausto A.; BELUCO, Alexandre; MENDES Carlos. **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria, v. 19, n. 2, pp. 1230-1249, 1º Sem. 2015.

- [12] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013** / Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL – Rio de Janeiro: CEPEL, 2017.
- [13] CICIO, Dario, ABB. **EssPro™ - Battery energy storage. The power to control energy.** 2017
- [14] COSTA E SILVA, Y.; BORTONI, E. **Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica em redes inteligentes: Características, oportunidades e barreiras.** REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIA. vol. 22, nº1, pp. 48-71, 1º Sem. 2016.
- [15] **EFE.** Disponível em <<https://www.efe.com/efe/brasil/tecnologia/california-usara-energia-100-limpa-em-2045/50000245-3745589>>. Acesso em 19/12/18.
- [16] **ELECTRICITY STORAGE. Technology Brief.** IEA-ETSAP and IRENA 2012.
- [17] **EMAE ELEVATÓRIAS.** Disponível em <<http://www.emae.com.br/conteudo.asp?id=Elevat%C3%B3rias>>. Acesso em 27/10/18.
- [18] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas).** Disponível em <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>>. Acesso em 18/11/2018.
- [19] ENERISE CORPORATION: **Supercapacitor Designs and Materials.** Disponível em <<http://www.enerize.com/superCap.php>>. Acesso em 15/10/2018
- [20] **EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications,** EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2003. 1001834.
- [21] EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY. **Metal-Air Battery: Electrochemical Energy Storage.** Disponível em <[http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE\\_TD\\_M-Air.pdf](http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_M-Air.pdf)>. Acesso em 30/11/2018.
- [22] **FLUENCE.** Disponível em <<http://blog.fluenceenergy.com/sdge-and-aes-energy-storage-unveil-worlds-largest-battery-storage-installation>>. Acesso em 19/12/18.
- [23] **FLUENCE CASE STUDY. Flexible Peaking Capacity. Energy Storage Selected to Meet Peak Demand for Los Angeles Area.** 2018.
- [24] FRANCO, Anna Karoline Silveira. **Estudo de caso dos impactos da inserção de fontes renováveis intermitentes na rede de transmissão e distribuição elétrica.** 2018. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia, São Paulo, 2018.
- [25] GALLO, A. B.; SIMÕES-MOREIRA, J.R.; COSTA, H.K.M.; SANTOS, M.M.; MOUTINHO DOS SANTOS, E. **Renewable and Sustainable Energy Reviews -**

**Energy storage in the energy transition context: A technology review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 65, pp 800-822, 2016

[26] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report: Annual Market Update 2017.** GWEC, 2017.

[27] HYDROSTOR. **ADVANCED COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE.** Disponível em <<https://www.hydrostor.ca/>>. Acesso em 30/10/2018.

[28] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030.** IRENA, 2017.

[29] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewables and Electricity Storage: A Technology Roadmap for REmap 2030.** IRENA, 2015.

[30] INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2017. São José dos Campos, Brasil.

[31] INTERNATIONAL ENERGY ADMINISTRATION. **Solar Power and Chemical Energy Systems.** IEA, 2011.

[32] KUMAR, Nishant. **Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System.** IEEE 2015.

[33] Ministério de Minas e Energia. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico.** Setembro/2018. Brasília: MME, 2018.

[34] **ONS – Sistemas Isolados.** Disponível em <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>>. Acesso em 15/10/2018.

[35] PINTO, Carolina Ferreria. **Estudo sobre o uso de célula a combustível movida a hidrogênio solar em residências.** 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

[36] **POWERPACK UTILITY AND BUSINESS ENERGY STORAGE.** Disponível em <<https://www.tesla.com/powerpack>>. Acesso em 02/11/2018.

[37] REN21. **Renewables 2018, Global Status Report.** REN21, 2018.

[38] SAMSUNG SDI. **ESS Batteries by Samsung SDI - Top Safety & Reliability Solutions.** Catálogo de produto, 2018.

[39] SANDIA NATIONAL LABORATORIE. **Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide.** EYER, Jim; COREY, Garth, EUA, SANDIA, 2010.

[40] SILVA, Marco Antonio Oliveira da. **Estudos eletroquímicos de eletrólise a membrana polimérica para produção de hidrogênio.** 2011. Dissertação (Mestrado

em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

[41] SIMÕES-MOREIRA, J. R. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

[42] **TESLA GIGAFACTORY**. Disponível em <<https://www.tesla.com/gigafactory>>. Acesso em 09/09/2018.

[43] TOLMASQUIN, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord). – EPE: Rio de Janeiro, 2016

[44] ZHANG, Xin; WANG, Xin-Gai; XIE, Zhaojun; ZHOU Zhen. **Recent progress in rechargeable alkali metal-air batteries**. Green Energy & Environment. Pp 4-17, 2016.