

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME HARGER PAUL

**ESTUDO DE MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA PARA APLICAÇÕES POR FONTES RENOVÁVEIS**

JOINVILLE, SC
2015

GUILHERME HARGER PAUL

**ESTUDO DE MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA PARA APLICAÇÕES POR FONTES RENOVÁVEIS**

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Joselito A. Heerd

**JOINVILLE, SC
2015**

GUILHERME HARGER PAUL

ESTUDO DE MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA APLICAÇÕES POR FONTES RENOVÁVEIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Orientador: _____

Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerd
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: _____

Prof. Dr. Diego Santos Greff
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Membro: _____

Prof. Dr. Marcello Mezaroba
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, SC, 09/12/2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela saúde e pela força para superar os momentos de dificuldades

Ao meu orientador, Prof. Dr. Joselito A. Heerdt, pela oportunidade este trabalho, por todas suas correções e sugestões, e por toda sua contribuição para o meu desenvolvimento ao longo do curso, tanto acadêmico quanto profissional.

Aos meus pais, Antônio e Vera, pelo apoio, dedicação, incentivo durante toda minha vida

A minha amada e fiel companheira, Sirlene Cristine Schoemeckel, por toda sua paciência e apoio, principalmente nos momentos em que eu mais precisava

A meu irmão, Gustavo, por todos os conselhos dados.

Aos membros e professores do Núcleo de Processamento de Energia Elétrica e colegas de graduação, que através de seus conhecimentos tanto me ajudaram ao longo de toda minha graduação. Em especial aos mestrandos Felipe Zimann e Felipe Stein, aos doutorandos Gustavo Lambert, Rubens Hock Jr. e Marcos Bressan, e aos colegas Alisson Mengatto, Murilo Rosa, Sergio Nava Jr. e Wendel Rossi.

À empresa de ferramentas pneumáticas REITZ® pelo fornecimento do motor pneumático.

E à FITEJ, FAPESC e principalmente à UDESC por toda a infraestrutura concedida no laboratório

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo fazer um estudo geral sobre alguns métodos possíveis para armazenamento de energia. Serão analisadas suas características, bem como suas aplicações, vantagens e desvantagens, custo e eficiência para cada solução. Também foi desenvolvido o estudo de implementação de um sistema de armazenamento de energia em ar comprimido em pequena escala.

Palavras-chave: Armazenamento de energia, bateria, flywheel, ar comprimido, supercapacitor, eficiência energética.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1. - Geração solar Garagem WEG em 31/03/2015	14
Figura 1.2 - Geração solar Garagem Weg em 29/03/2015.	14
Figura 2.1 - Sistema de armazenamento de energia em ar comprimido.16	
Figura 2.2 - Esquemático de uma planta CAES.....	17
Figura 2.3 - Sistema de armazenamento de energia por bombeamento.18	
Figura 2.4 - Capacidade de armazenamento de energia no mundo.	19
Figura 2.5 - Curvas de energia em função do volume e altura.	20
Figura 2.6 - Ilustração de sistema de armazenamento de célula à combustível.	21
Figura 2.7 - Exemplo de operação da planta eólica com integração de sistema de armazenamento em hidrogênio, em Utsira, Noruega.....	23
Figura 2.8 - Componentes principais de um sistema armazenamento de energia com volante de inércia.	24
Figura 2.9 - Ilustração da variação da frequência da rede com e sem uso de <i>flywheel</i> para estabilização da frequência.....	25
Figura 2.10 - Supercapacitores discretos e em módulos.	27
Figura 2.11 - Esquema simplificado de uma célula de bateria eletroquímica.....	29
Figura 2.12 - Ilustração de esquema de sistema RFB de armazenamento de energia utilizando vanádio como eletrólito.....	31
Figura 3.1 - Distribuição das técnicas de armazenamento de energia em função do campo de aplicação.	36
Figura 3.2 - Distribuição das técnicas de armazenamento de energia em função da eficiência energética pelo tempo de vida útil em ciclos.....	37
Figura 3.3 - Distribuição de técnicas de armazenamento em função dos custos de investimento por potência e pelo custo de energia.	38
Figura 3.4 - Distribuição de técnicas de armazenamento em função dos custos de investimento por ciclo de carga e descarga.	39
Figura 3.5 - Distribuição de técnicas de armazenamento em função da energia específica e da densidade de energia.	40
Figura 4.1 - Consumo específico médio dos compressores.....	44
Figura 4.2 - Curvas típicas de performance de um motor pneumático..	45
Figura 4.3 - Esquemático simplificado do sistema de armazenamento de energia a ar comprimido proposto.....	46
Figura 4.4 - Curva de desempenho da ferramenta obtida a partir dos dados fornecidos no catálogo.	47
Figura 4.5 - Sistema de geração de energia pneumática.....	48

Figura 4.6 - Compressor utilizado no sistema de armazenamento de energia em ar comprimido.	49
Figura 4.7 - Curvas de potência em função da velocidade.....	51
Figura 4.8 - Curva de potência em função da carga aplicada nos terminais do gerador.	51
Figura 4.9 - Curva de potência absorvida pelo compressor ao longo da operação.....	52
Figura 4.10 - Curva de potência consumida pelo compressor ao longo da operação para elevar de 3 bar até o valor máximo de 8,6 bar.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos tipos de células à combustível.....	22
Tabela 2 - Características de baterias eletroquímicas.....	29
Tabela 3 - Analogias entre sistemas elétricos e pneumáticos.....	41
Tabela 4 - Características do compressor de ar CSL 10BR/100.	46
Tabela 5 - Características do motor pneumático.	47
Tabela 6 - Dados do gerador.	48
Tabela 7- Tabela de energia gerada pelo sistema em função da pressão de operação e seu respectivo rendimento.	55
Tabela 8 - Energia gerada consumindo todo ar no reservatório.	55

LISTA DE SIGLAS

GD	Geração distribuída
PHS	<i>Pumped Hydro Storage</i>
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
SS-CAES	<i>Small-Scale Compressed Air Energy Storage</i>
AA-CAES	<i>Advanced Adiabatic – Compressed Air Energy Storage</i>
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
NiCd	Níquel-Cádmio
NaS	Sódio-Enxofre
Rpm	Rotações por minute
VRB	<i>Vanadium Redox Battery</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ENERGIA ARMAZENADA EM AR COMPRIMIDO	15
2.2	BOMBEAMENTO	17
2.3	CÉLULAS À COMBUSTÍVEL	19
2.4	VOLANTE DE INÉRCIA	23
2.5	SUPERCAPACITORES	25
2.6	SUPERCONDUTORES MAGNÉTICOS	26
2.7	BATERIAS.....	27
2.7.1	Baterias de íons de lítio	28
2.7.2	Baterias de Chumbo-ácido.....	28
2.7.3	Baterias de Níquel-Cádmio.....	30
2.7.4	Baterias de Níquel-Hidreto metálico	30
2.7.5	Baterias de Sódio-Enxofre.....	30
2.7.6	Baterias de Fluxo	30
3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	32
3.1	COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO CAMPO DE APLICAÇÃO.....	34
3.2	COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA POR CICLO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .	35
3.3	COMPARAÇÃO DO CUSTO DE INVESTIMENTO	36
3.4	COMPARAÇÃO DE INVESTIMENTO POR CICLO DE CARGA E DESCARGA	37
3.5	COMPARAÇÃO BASEADA EM ENERGIA ESPECÍFICA E DENSIDADE DE ENERGIA	38
3.6	CONCLUSÕES SOBRE AS TÉCNICAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	39
4	ACUMULAÇÃO DE ENERGIA EM AR COMPRIMIDO.....	41
4.1	TEORIA DO AR COMPRIMIDO	41
4.1.1	Termodinâmica.....	41
4.1.2	Compressores	43

4.2	MOTORES PNEUMÁTICOS	44
4.3	DESENVOLVIMENTO	45
4.4	CÁLCULO DA ENERGIA POTENCIAL PNEUMÁTICA ARMAZENADA	49
4.5	ENSAIO DE MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA CARGA	50
4.6	CÁLCULOS DE RENDIMENTO DAS PARTES DO SISTEMA	50
4.6.1	Rendimento do compressor	50
4.6.2	Rendimento do motor pneumático	52
4.6.3	Rendimento do gerador CC	53
4.6.4	Rendimento teórico do sistema	54
4.6.5	Rendimentos experimental do sistema	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57

1 INTRODUÇÃO

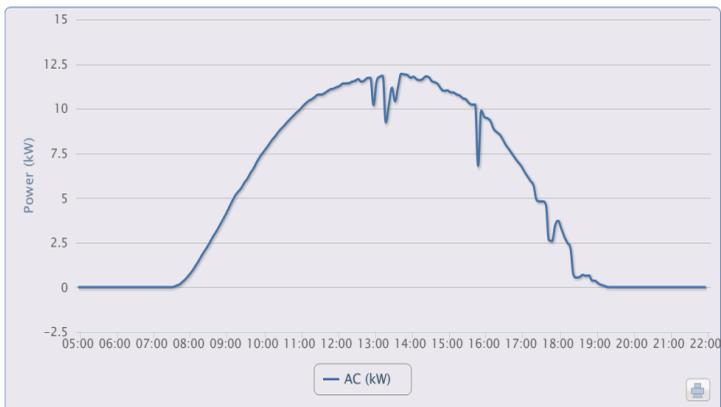
A demanda por energia elétrica vem crescendo substancialmente nos últimos anos e os métodos convencionais de produção já não conseguem atender a demanda de energia pela sociedade sem gerar problemas ao meio ambiente. Frente a isso, é cada vez mais frequente a discussão dos conceitos de produção de energia a partir de fontes renováveis e de geração distribuída (GD), sobretudo a partir de energia eólica e solar. A GD é tida como a solução para o problema energético mundial e o futuro dos sistemas elétricos. Contudo, este tipo de energia possui limitações e normalmente não está disponível em qualquer período do dia ou do ano, e sua matéria prima não pode ser represada ou estocada, como água de uma hidrelétrica ou o combustível de uma termelétrica. A Figura 1.1 e a Figura 1.2 apresentam a geração solar em um dia tipicamente ensolarado e um dia tipicamente nublado, respectivamente. É possível observar a necessidade de um haver um sistema de armazenamento de energia que possa compensar os intervalos em que não há a produção de energia, ou para compensar as oscilações da potência disponível ao longo do dia em uma planta de geração de energia não convencional.

Estudos recentes apontam que o sistema elétrico pode se tornar instável se a energia proveniente de fontes alternativas representar mais de 20% de toda a potência gerada, se não houver o armazenamento adequado (ALOTTO *et al.*, 2012), válido para países cujo sistema de energia é independente. Ou seja, como alguns casos da Europa, em que proporção de energia renováveis superam os 20% da sua matriz energética, contudo o sistema elétrico é interligado entre vários países.

Deste modo, tem-se buscado métodos eficientes que possam armazenar a energia produzida por fontes renováveis para depois processá-la e ser utilizada, por exemplo, no horário de pico, entre as 18 e 21 horas (CPFL ENERGIA, 2015), onde a demanda de energia é maior e consequentemente, seu custo também.

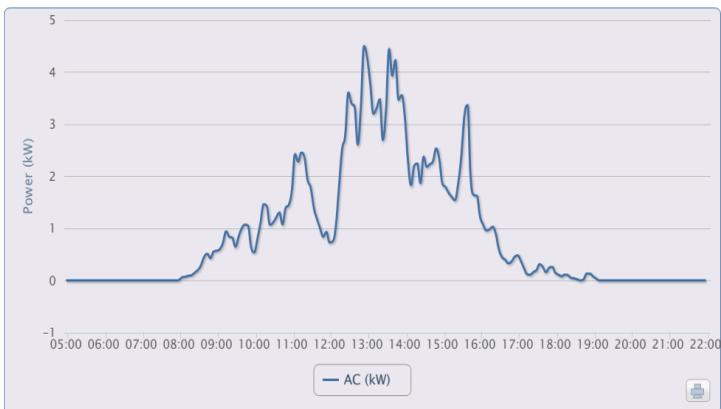
Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo das formas de armazenamento de energia mais promissoras atualmente, onde serão analisadas várias de suas características, como a densidade de energia, densidade de potência, custos, a eficiência e as suas limitações, e a melhor aplicação para cada tecnologia. Na sequência, como contribuição para as pesquisas nesta área, foi proposta a implementação de um pequeno sistema de armazenamento de energia em ar comprimido. Este sistema foi

basicamente composto por um compressor, um reservatório de ar comprimido, um motor pneumático e um gerador de ímãs permanentes.
Figura 1.1. - Geração solar Garagem WEG em 31/03/2015



Fonte: (CARLO GAVAZZI; WEG, 2015)

Figura 1.2 - Geração solar Garagem Weg em 29/03/2015.



Fonte: (CARLO GAVAZZI; WEG, 2015)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados brevemente os métodos de armazenamento energia estudados para este trabalho. Eles representam a maioria das pesquisas realizadas nesta área.

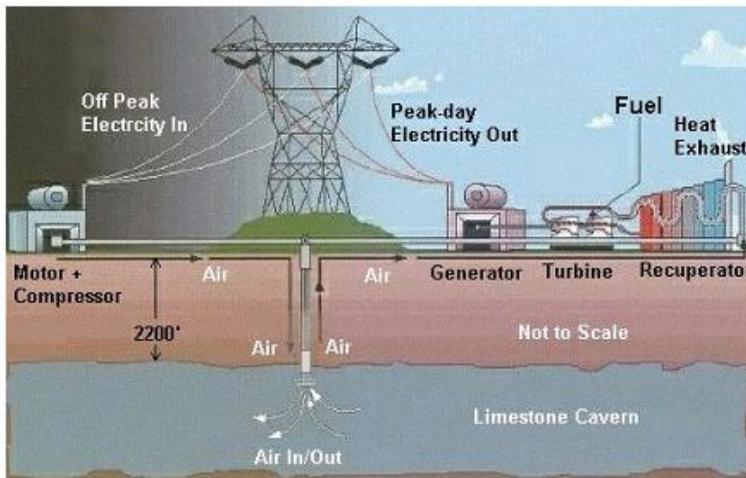
2.1 ENERGIA ARMAZENADA EM AR COMPRIMIDO

O armazenamento de energia em ar comprimido, do inglês *Compressed Air Energy Storage* (CAES), pode tanto ser utilizado para pequena escala quanto para grande escala. Em larga escala, é utilizada energia produzida fora de pico, de geradores convencionais, ou a partir de fontes renováveis, principalmente eólica e solar, para comprimir o ar em cavernas subterrâneas a altas pressões (40-70 bars) ou em tanques de altíssimas pressões. Utilizando o princípio das turbinas a gás, o ar é liberado, aquecido e depois expandido em turbinas de alta pressão. Este ar é então misturado com combustível e queimado, expandindo assim as turbinas de baixa pressão. Um fator determinante para implementação de um CAES, que está diretamente envolvido no custo total da planta, é identificar a localização geográfica adequada.

O primeiro CAES utilizado em grande escala implantado no ano de 1978, em Huntorf, na Alemanha. Foram utilizadas cavernas de sal para armazenar o ar, o qual é comprimido durante 8 horas e opera por 2 horas com uma potência de 290MW. A princípio este sistema, que ainda funciona nos dias atuais, foi construído apenas para suprir a demanda nos horários de pico, comprimindo o ar durante os horários fora da ponta utilizando geradores a carvão. O segundo sistema foi desenvolvido em MacIntosh, nos Estados Unidos, em 1991, com 110MW de potência. Através de um sistema que recupera parte do calor produzido durante processo de compressão, o consumo de combustível é reduzido em 22-25% e a eficiência do sistema aumenta aproximadamente de 42% para cerca de 54% em relação à planta de Huntorf. (LUO *et al.*, 2015)

Em pequena escala, o ar é armazenado em cilindros de altíssima pressão (acima de 300 bars). Um compressor elétrico que também funciona como motor pneumático, é utilizado para a entrega de energia para a rede durante as horas de pico. Este sistema tem uma eficiência de 50% e sua vida útil de carga e descarga é dada basicamente pelo desgaste mecânico do cilindro.

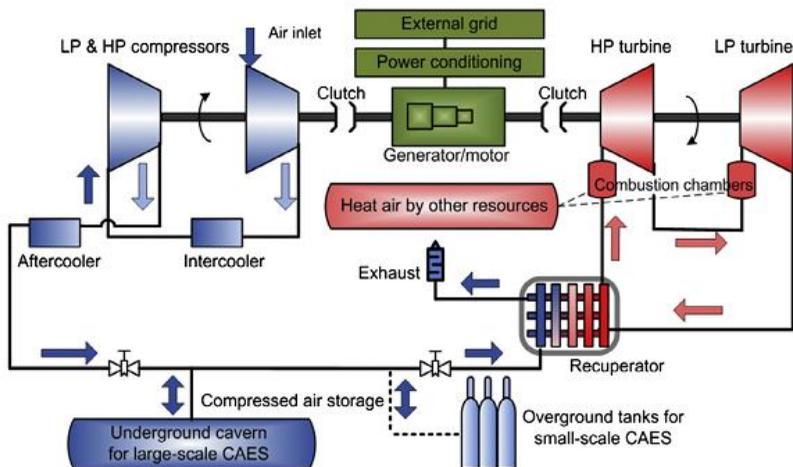
Figura 2.1 - Sistema de armazenamento de energia em ar comprimido.



Fonte: (IBRAHIM; ILINCA ; PERRON, 2008)

Um outro tipo de sistema de armazenamento em ar comprimido, o qual vem sendo motivo de pesquisas recentes, armazena o calor produzido durante a compressão do ar, que depois é aproveitado para expandir o ar durante o processo de geração, não sendo necessário então utilizar combustíveis e tornando o método uma forma de armazenamento de energia totalmente limpa. Esta nova técnica é chamada de, em tradução livre, Armazenamento de Energia em Ar Comprimido Avançado Adiabático (AA-CAES, sigla em inglês) ainda está em fase de desenvolvimento, sendo assim, os custos desta tecnologia ainda são muito elevados (TAYLOR ; HALNES, 2010). A primeira planta de demonstração do mundo, batizada de ADELE, está localizada também na Alemanha, com uma capacidade de armazenamento de 360MWh, com uma potência de 90MW, tendo uma eficiência por ciclo de aproximadamente 70%.

Figura 2.2 - Esquemático de uma planta CAES.

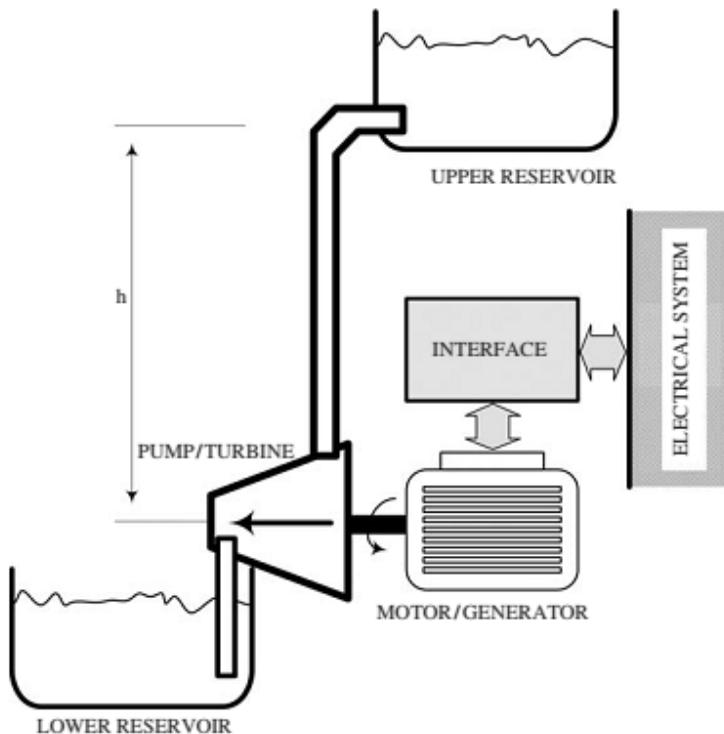


Fonte: (LUO *et al.*, 2015)

2.2 BOMBEAMENTO

Partindo do princípio de funcionamento das hidrelétricas, no método de bombeamento (*Pumped Hydroelectric Storage – PHS*), ilustrado na Figura 2.3, a água é bombeada de um reservatório de cota inferior para um reservatório de cota superior, através da energia provida de fontes renováveis ou da energia gerada fora de pico. Utilizando a energia potencial gravitacional da água, a energia é devolvida para rede nos horários de pico. Com uma capacidade instalada de 127-129 GW em 2012, as PHS contribuem com aproximadamente 3% de toda energia gerada no mundo, representando 99% da capacidade de energia armazenada, conforme ilustra a Figura 2.4 (IEC, 2011).

Figura 2.3 - Sistema de armazenamento de energia por bombeamento.



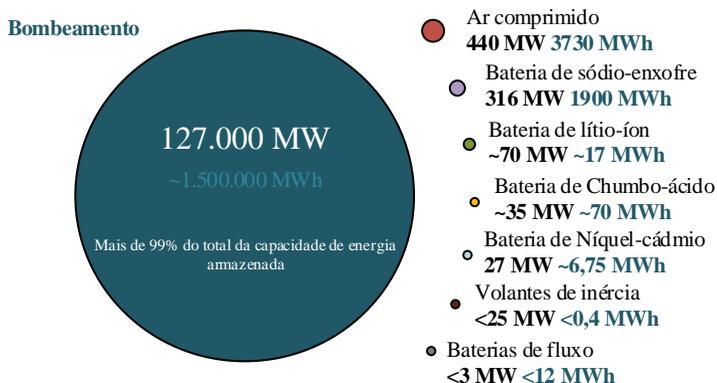
Fonte: (GRBOVIC, 2013)

A capacidade de energia armazenada depende basicamente da altura da queda d'água e do volume de armazenamento, Equações (1) e (2), onde m é a massa da água, g é a gravidade, h é a altura, substituindo a massa pelo volume (V) e pela densidade volumétrica da água (ρ). Por exemplo, em uma queda de 100 metros, 1 metro cúbico de água pode armazenar uma energia potencial de 0,272kWh, sem levar em consideração as perdas deste sistema.

$$E = mgh \quad (1)$$

$$E = V\rho gh \quad (2)$$

Figura 2.4 - Capacidade de armazenamento de energia no mundo.



Fonte: (IEC, 2011)

Contando com as perdas por evaporação na superfície da água, entre 70-85% da energia utilizada para bombear a água para o reservatório mais elevado pode ser reutilizada. Assim como as hidrelétricas, estes sistemas são vantajosos por apresentarem uma longa vida útil, operando por 50 anos ou mais (ALLEN, 1977). Esta técnica atualmente apresenta o melhor custo benefício para armazenar grandes quantidades de energia, porém exige um alto investimento e os fatores geográficos são decisivos para implementação desta tecnologia, visto que é necessário um grande desnível entre os dois reservatórios para que a prática se torne viável (HADJIPASCHALIS; POULLIKKAS ; EFTHIMIOU, 2009).

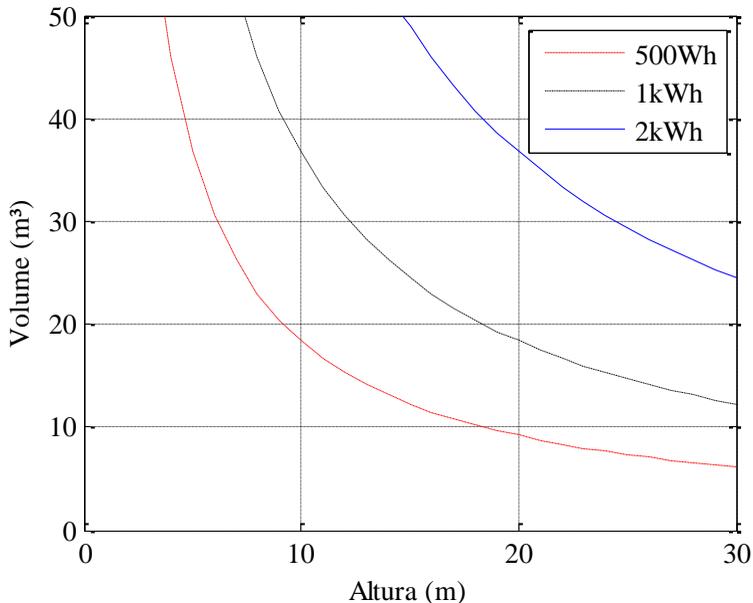
A Figura 2.5 apresenta algumas curvas de energia construídas utilizando a Equação (2), em função da capacidade do volume armazenada de água e a altura em que se encontra.

2.3 CÉLULAS À COMBUSTÍVEL

As células à combustível funcionam de modo muito semelhante as baterias, ambas são compostas fundamentalmente por dois eletrodos separados por um eletrólito. No entanto, uma bateria eletroquímica contém todas as substâncias envolvidas em uma reação de óxido-redução, e, por conseguinte uma capacidade limitada. Uma célula combustível é alimentada por reagentes externos, operando enquanto houver combustível, o hidrogênio. A energia gasta para produzir hidrogênio através da eletrólise aquosa pode ser recuperada através da tecnologia de

células à combustível. A energia gerada fora de pico de consumo ou a partir de fontes alternativas é utilizada para produzir o hidrogênio, e então, são utilizadas células à combustível e oxigênio do ar para gerar eletricidade nas horas de pico. É necessário um tanque para armazenar os recursos adequados nos períodos em que houver demanda.

Figura 2.5 - Curvas de energia em função do volume e altura.

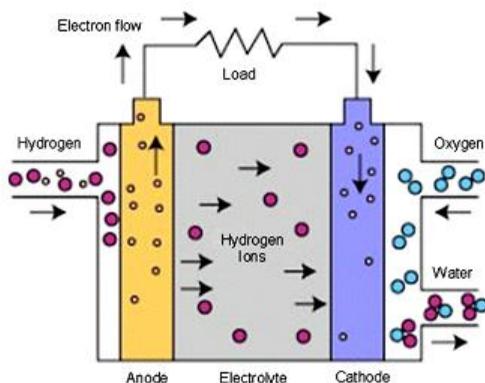


Fonte: Próprio autor.

O processo é ilustrado na Figura 2.6, onde os dois eletrodos (catodo e anodo) estão imersos separadamente por um eletrólito, por onde haverá a transferência de íons.

Existem vários tipos de células à combustível, que se diferenciam basicamente pelo eletrólito usado, temperatura de operação, o design e seu campo de aplicação. Alguns exemplos, em inglês, são: *Alkaline Fuel Cell (AFC)*, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*, *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*, *Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)*, *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)*, *Solid Oxid Fuel Cell (SOFC)*. (SILVA, 2008). As características de cada tipo de célula são apresentadas na Tabela 1.

Figura 2.6 - Ilustração de sistema de armazenamento de célula à combustível.



Fonte: (SILVA, 2008)

A geração de energia utilizando células combustível é, em geral, mais eficiente, produz menos poluição ambiental e sonora do que a partir de combustíveis fósseis e podem ser utilizados para aplicações de poucos quilowatts até centenas de megawatts, como equipamentos portáteis, casas, veículos elétricos e centrais de geração de energia. Para aplicações em larga escala, ainda são necessários avanços nas questões relacionadas a durabilidade e redução de custos para implementação desta tecnologia (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2006).

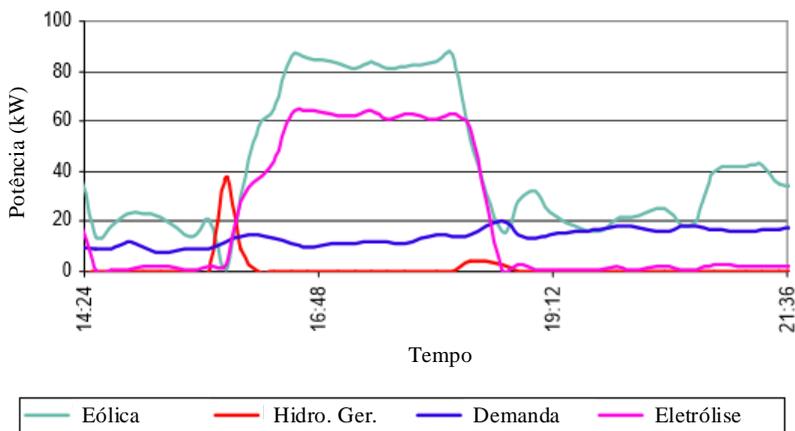
A primeira planta de larga escala utilizando células à combustível para integração de energia renovável, está em operação desde 2004/2005, em Utsira, Noruega, produzindo hidrogênio a partir da energia excedente gerada por uma planta eólica, sendo capaz de despachar energia com qualidade e alta confiabilidade, demonstrando que este conjunto é uma solução para disponibilidade energia eólica em áreas remotas. A Figura 2.7 ilustra um exemplo de operação do sistema de Utsira. É possível perceber que durante os períodos em que a demanda por energia é baixa, a energia produzida pelas turbinas eólicas é utilizada para produzir hidrogênio através da eletrólise. Quando a energia das turbinas não é suficiente para suprir a demanda, é produzida energia através de tecnologia de células a combustível (NAKKEN *et al.*, 2006).

Tabela 1 - Características dos tipos de células à combustível.

<i>Tecnologia de célula à combustível</i>	<i>Temperatura de operação (°C)</i>	<i>Saída do sistema (kW)</i>	<i>Eficiência elétrica (%)</i>	<i>Aplicações</i>
<i>AFC</i>	90 - 100	10 - 100	60 - 70	Militar, espacial
<i>PAFC</i>	150 - 200	50 - 1000	36 - 42	Geração distribuída
<i>PEMFC</i>	50 - 100	< 250	50 - 60	Energia de <i>back-up</i> , aplicações portáteis, pequena geração distribuída
<i>MCFC</i>	600 - 700	1000 (módulo típico: 250)	60	Geração distribuída
<i>SOFC</i>	650 - 1000	5 - 3000	60	Energia auxiliar, geração distribuída

Fonte: (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2006)

Figura 2.7 - Exemplo de operação da planta eólica com integração de sistema de armazenamento em hidrogênio, em Utsira, Noruega.



Fonte: (NAKKEN *et al.*, 2006)

2.4 VOLANTE DE INÉRCIA

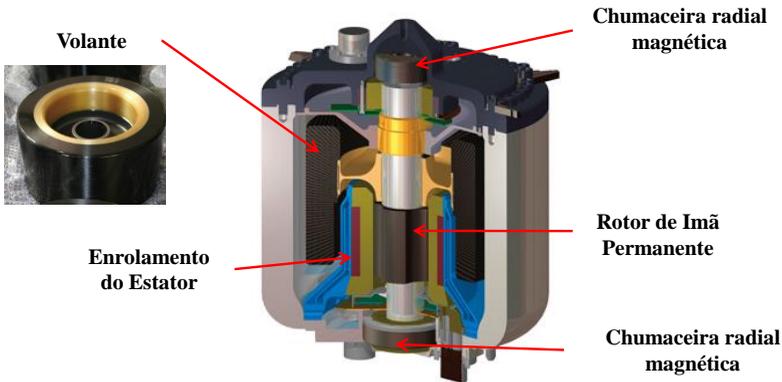
Os *flywheels*, como são conhecidos os volantes de inércia em inglês, consistem basicamente em uma grande massa girante sobre um eixo, acumulando assim energia mecânica na forma de energia cinética. Utilizando energia da rede, ou energia proveniente de fontes renováveis, a massa é colocada em rotação, geralmente sendo utilizado um motor síncrono. Uma vez em rotação, tem um efeito de bateria mecânica que possui uma certa quantidade de energia. A energia armazenada pode ser entregue a rede desacelerando a massa e retornando a energia cinética ao motor síncrono, sendo usado como um gerador. A quantidade de energia armazenada, por sua vez, depende diretamente do momento de inércia e do quadrado da velocidade angular do volante, como mostrado na Equação (3). No caso de um volante cilíndrico, o momento de inércia (I) depende do raio, massa e do comprimento, como mostrado na Equação (4).

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3)$$

$$I = \frac{r^2mh}{2} \quad (4)$$

Para aumentar a eficiência do armazenamento de energia em volantes de inércia, sistemas mais avançados utilizam rolamentos magnéticos e câmara de vácuo, reduzindo o atrito da massa girante a quase zero e aumentando a eficiência para em torno de 90% na potência nominal. Além disso, é utilizado material de fibra de carbono para construir o volante, podendo assim chegar a rotações de 50.000 rotações por minuto, atingindo assim uma densidade de energia de 100 Wh/kg. Sistemas mais simples que não utilizam materiais tão avançados operam em rotações não tão elevadas, em torno de 6.000 rotações por minuto, e conseguem uma densidade de energia de 5 Wh/kg.

Figura 2.8 - Componentes principais de um sistema armazenamento de energia com volante de inércia.



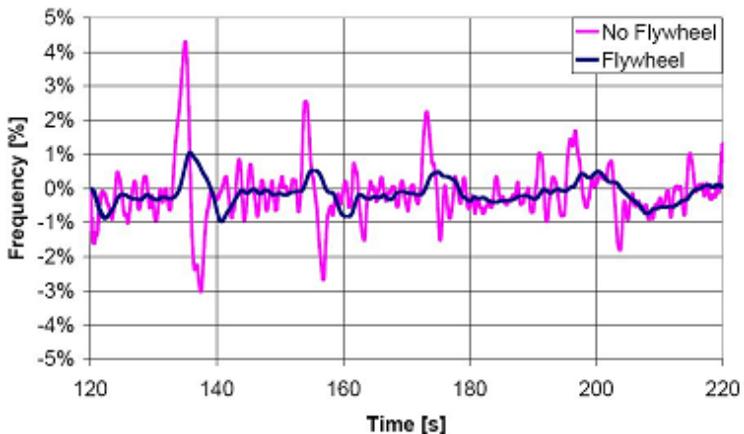
Fonte: (TAHIM ; NORA)

As principais vantagens dos *flywheels* são as altas taxas de carga e descarga. Sua capacidade de duração de vários ciclos, sem depender da taxa de carga ou descarga, é uma outra de suas vantagens. As principais desvantagens dos volantes de inércia são o alto custo e as altas taxas de auto-descarga (porção de energia que foi inicialmente armazenada e da qual foi dissipada ao longo de um período sem utilização), que para sistemas completos com volante de inércia são de no mínimo 20% da

capacidade armazenada por hora. Estas taxas elevadas tem o efeito de deterioração da eficiência energética para armazenamento de energia de longo prazo. Desta forma, *flywheels* são utilizados para melhorar a qualidade de energia, operando para reduzir as oscilações na rede que ocorrem devido a variação da demanda de energia ao longo do dia. (HADJIPASCHALIS; POULLIKKAS ; EFTHIMIOU, 2009).

Recentemente, a porção de energia na rede elétrica proveniente de fontes renováveis é cada vez mais elevada. Estas fontes provocam deformações na onda de tensão, por isso, e devido à característica de curto tempo de resposta desta tecnologia, faz com que esta seja particularmente interessante para aplicações destinadas a auxiliar a estabilização da frequência da rede, como ilustra a Figura 2.9. (SILVA, 2008)

Figura 2.9 - Ilustração da variação da frequência da rede com e sem uso de *flywheel* para estabilização da frequência.



Fonte: (SILVA, 2008)

2.5 SUPERCAPACITORES

Supercapacitores possuem características semelhantes a capacitores e baterias eletroquímicas, exceto que não ocorre a reação química, permitindo aumentar muito a vida útil destes componentes. O armazenamento de energia em supercapacitores é feito na forma de um campo elétrico entre dois eletrodos, o mesmo princípio dos capacitores, exceto que o material isolante é substituído por um eletrólito condutor iônico, no qual o movimento dos íons é feito ao longo de um eletrodo

condutor com uma grande superfície específica. A energia armazenada é dada pela Equação (5).

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (5)$$

A energia específica obtida é superior aos capacitores (5 Wh/kg ou mesmo 15 Wh/kg), além de uma melhor constante de tempo de descarga, devido ao lento deslocamento dos íons do eletrólito (potência específica de 800-2000 W/kg). Em consequência, a tensão de funcionamento máxima é limitada a poucos volts por elemento, aproximadamente entre 2,5 e 3 V. Supercapacitores normalmente são mais duráveis que capacitores eletrolíticos convencionais, com uma vida-útil que varia de 8 a 10 anos, com uma eficiência de 95%, e 5% de auto-descarga diária, o que significa que a energia armazenada deve ser consumida rapidamente (IBRAHIM; ILINCA ; PERRON, 2008). No site de vendas de componentes eletrônicos, Digi-Key, estão disponíveis capacitores do fabricante Maxwell® de até 3400 F e 2,85 volts (Digi-Key, 2015). Outra fonte cita capacitâncias de até 6000 F (GRBOVIC, 2013).

A principal desvantagem de se utilizar supercapacitores em aplicações de armazenamento de energia é semelhante à desvantagem dos volantes de inércia, que é taxa de auto-descarga relativamente alta. A Figura 2.10 apresenta alguns supercapacitores disponíveis no mercado, discretos e em módulos.

2.6 SUPERCONDUTORES MAGNÉTICOS

No armazenamento de energia em supercondutores magnéticos (*SMES, Superconducting Magnet Energy Storage*), a energia é acumulada em um campo magnético gerada a partir de uma corrente contínua em uma bobina construída com materiais de resistência quase nula, geralmente utilizando filamentos de nióbio de titânio (niobium – titane, NbTi). Devido suas características de alta eficiência, grande quantidade de ciclos, e resposta rápida, inferior a 100 milissegundos, este sistema se torna ideal para aplicações de qualidade de energia, como regular a estabilidade da rede.

Figura 2.10 - Supercapacitores discretos e em módulos.



Fonte: (MAXWELL, 2015)

A sua grande desvantagem reside na necessidade de se haver um sistema de refrigeração, que apresenta custos elevados e torna a operação mais complicada, para que o material apresente suas características supercondutivas, é necessário estar operando em temperaturas muito baixas (-270 °C).

Projetos de grande potência requerem grande bobinas, com algumas centenas de metros de diâmetro, que geram enormes forças eletromagnéticas, e devido a isso, são construídos em instalações subterrâneas (SILVA, 2008).

A equação que define a energia armazenada no indutores é apresentada na Equação (6), onde L é a indutância e i a corrente que circula pelo sistema.

$$E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (6)$$

2.7 BATERIAS

O método mais comum de armazenar energia para depois ser utilizada como eletricidade é através do uso das baterias, que são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia potencial química e a armazenam durante a carga. Quando é necessário então utilizar a energia, o processo inverso ocorre, e a energia potencial química é convertida novamente em energia elétrica. Baterias eletroquímicas são compostas por uma ou mais células elementares conectadas. Cada célula consiste em dois eletrodos, positivo e negativo,

imersos em um eletrólito. Quando está sendo carregada, uma fonte de tensão/corrente é aplicada através dos eletrodos, então um fluxo de íons é formado entre eles, por meio do eletrólito. Se uma carga externa for aplicada entre os terminais da bateria, um fluxo de íons irá circular na direção inversa através da carga.

Existe uma grande quantidade de tipos de baterias, cujas características dependem do material utilizado nos eletrodos e o meio eletrólito. A seguir serão apresentados algumas das baterias mais utilizadas e que tem um forte potencial para serem comuns no futuro. As principais características destas baterias são resumidas na Tabela 2 e um esquema simplificado de uma célula de bateria eletroquímica pode ser visto na Figura 2.11.

2.7.1 Baterias de íons de lítio

Baterias de íons de lítio são leves, compactas, e cada célula trabalha com uma tensão de aproximadamente 4,1 V, e tem a maior energia específica dentre as concorrentes. São largamente utilizadas em aplicações portáteis, como baterias de celulares, notebooks, eletrônicos, etc. Para aplicações em larga escala ainda existem alguns problemas com segurança e temperatura de operação (SCROSATI ; GARCHE, 2010).

Recentemente, a empresa de veículos elétricos, Tesla Motors © anunciou a produção de uma bateria de lítio-íon, de módulos com capacidade de armazenamento de 10 kWh, com potência de 2 kW contínuo, 3,3 kW de pico, na qual eles garantem uma durabilidade de 10 anos. (TESLA MOTORS, INC., 2015)

2.7.2 Baterias de Chumbo-ácido

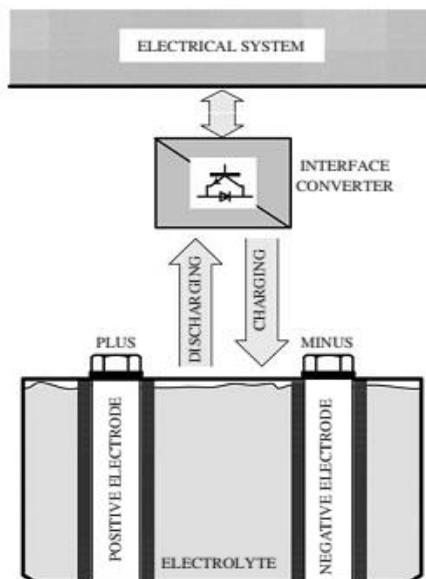
As baterias de chumbo-ácido consistem de um eletrodo negativo de chumbo (Pb), e um eletrodo positivo de dióxido de chumbo (PbO₂) mergulhados em eletrólito de ácido sulfúrico. São as baterias mais antigas e mais usadas no mundo, porém possuem um ciclo de vida útil reduzido, e uma densidade de energia baixa, além de possuírem pouco desempenho em baixas temperaturas. Estas baterias são de baixo custo e comumente utilizada em automóveis e UPS. (CHEN *et al.*, 2009)

Tabela 2 - Características de baterias eletroquímicas.

Bateria	Energia específica (Wh/kg)	Potência específica (W/kg)	Vida útil (Ciclos)	Temperatura de operação (°C)
Chumbo-ácido	20-35	25	200-2000	15-25
Lítio-íon	100-200	360	500-2000	-40 a 60
Lítio-Polímero	200	250-1000	>1200	-40 a 60
Níquel-Cádmio	40-60	140-180	500-2000	-20 a 60
Níquel-Hidreto metálico	60-80	220	<3000	-20 a 60
Sódio-Enxofre	120	120	2000	

Fonte: (GRBOVIC, 2013)

Figura 2.11 - Esquema simplificado de uma célula de bateria eletroquímica.



Fonte: (GRBOVIC, 2013)

2.7.3 Baterias de Níquel-Cádmio

Tão maduras quanto baterias de chumbo-ácido, as baterias de níquel cádmio (NiCd) também são amplamente utilizadas devido sua robustez e confiabilidade. Outras vantagens destas baterias são a alta energia e potência específica, longo ciclo de vida, capacidade de carga rápida, ampla faixa de temperatura de operação, e boa capacidade de armazenamento a longo prazo. Suas desvantagens são o custo, a baixa tensão nas células, próximas de 1,2 V, o próprio cádmio, devido aos perigos que podem ser causados ao meio ambiente (GRBOVIC, 2013) e também o efeito memória, popularmente conhecido como vício de bateria, no qual a bateria vai perdendo a sua capacidade de carga ao longo do uso.

2.7.4 Baterias de Níquel-Hidreto metálico

Como alternativa à utilização do cádmio nas baterias, como já citado, é um material agressivo ao meio ambiente, foram desenvolvidas baterias que utilizam hidrogênio absorvido em um hidreto metálico como eletrodo negativo. Com características muito semelhantes às baterias de NiCd, a principal vantagem é a não utilização de materiais tóxicos. Também sofre com um alto custo inicial, célula de baixa tensão e efeito memória (GRBOVIC, 2013).

2.7.5 Baterias de Sódio-Enxofre

Baterias de Sódio-Enxofre (NaS) apresentam boas características de energia específica, alta eficiência, longo ciclo de vida, e matéria prima de baixo custo, estas baterias apresentam um grande potencial para aplicações em sistemas de energia (KAMIBAYASHI ; TANAKA, 2001). Suas desvantagens são a alta temperatura de operação, em torno de 300 °C, e a presença do enxofre.

2.7.6 Baterias de Fluxo

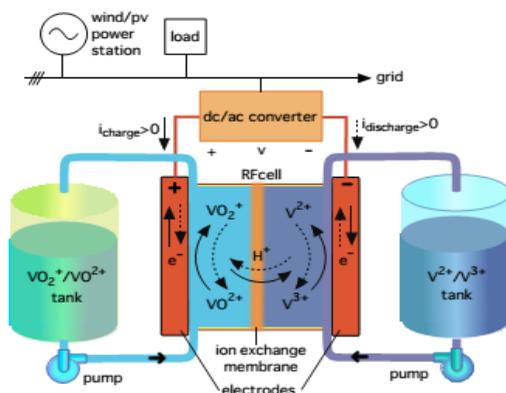
Baterias de fluxo (*Redox Flow Batteries* - RFB), também conhecidas por *flow cells*, ou *regenerative fuel cells* são um meio termo entre baterias tradicionais e células combustível. Armazenam e liberam energia através de reações eletroquímicas de oxidação e redução, daí o nome *redox*, semelhante a baterias e são capazes de fornecer energia

enquanto estiverem sendo alimentadas por eletrólitos carregados, semelhante às células combustíveis.

Os íons migram de um eletrodo para outro (do anodo para catodo) através da membrana de troca de íons, que é péssima condutora de elétrons. Assim, os elétrons são forçados a circular pelo circuito externo, permitindo a troca de energia elétrica. A célula deve operar à temperatura ambiente para manter as soluções na fase líquida. Esta condição implica que a membrana de troca de íons deve ser feita de um material polimérico. Ambas meias-células são conectadas a dois tanques externos, onde as soluções elétricas são armazenadas e circuladas por meio de duas bombas. Portanto, para projetar um sistema RFB, são necessários grandes conhecimentos em engenharia química, elétrica, eletrônica de potência e sistemas de controle. A Figura 2.12 exemplifica um sistema RFB utilizando vanádio como eletrólito.

Comparada a outros sistemas eletroquímicos, RFBs se mostram mais vantajosos quando a geração à máxima potência é necessária por mais de 4 horas. Outra vantagem, com relação às células de combustíveis, é que seus combustíveis são gases não perigosos, tais como hidrogênio e oxigênio, mas soluções eletrolíticas muito menos perigosas, o que torna o manuseio e armazenamento muito mais simples e mais barato (ALOTTO *et al.*, 2012). Outros sistemas RFB já desenvolvidos utilizam ferro-cromo e zinco-cloro (PRICE, 2000).

Figura 2.12 - Ilustração de esquema de sistema RFB de armazenamento de energia utilizando vanádio como eletrólito.



Fonte: (ALOTTO *et al.*, 2012)

3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Feito levantamento das tecnologias de armazenamento de energia mais relevantes atualmente no capítulo anterior, será feita agora uma comparação entre as técnicas, tomando por base os critérios utilizados por (IBRAHIM; ILINCA ; PERRON, 2008). Estas análises foram então utilizadas para escolha do método que foi implementado em laboratório.

Para isso, portanto, é necessário fazer uma revisão das características fundamentais (técnico e econômica) dos sistemas de armazenamento, a fim de estabelecer critérios de seleção para escolher a melhor tecnologia. As principais características dos sistemas de armazenamento em que se baseiam os critérios de seleção são apresentadas a seguir.

Capacidade de armazenamento: é a quantidade de energia quando o sistema de energia está totalmente carregado. É definido com base na energia total armazenada W_{st} (Wh), que é superior a energia utilizável, W_{ut} (Wh). Salienta-se que auto-descarga é um fator atenuante em aplicações de longo prazo.

Potência disponível: este parâmetro determina a constituição e o tamanho do motor-gerador no sistema de geração da energia armazenada. Geralmente é expresso pelo valor médio, mas também é utilizado o valor de pico para representar a potência máxima de carga ou descarga, P_{max} (W). A potência máxima pode ser diferente para carga e descarga.

Profundidade de descarga: este parâmetro é comum na literatura e é chamado de DoD (*Depth of Discharge*), representa o quanto de energia é retirado do sistema durante um ciclo, expresso como um percentual da capacidade de armazenamento.

Taxa de transmissão de potência: armazenamento de energia é um processo lento, que subsequentemente pode ser necessário liberar energia demandada. A potência de saída, ou descarga, pode ser um fator limitante chamado de taxa de transmissão de potência. Esta taxa de entrega determina o tempo necessário para extrair a energia armazenada.

Tempo de descarga: é tempo que o sistema pode fornecer energia operando na máxima potência, representado na Equação (7). Este

parâmetro depende da profundidade e das condições de operação do sistema. O tempo de descarga é um fator muito importante e pode definir a melhor aplicação para o sistema.

$$\tau(s) = W_{st} / P_{\max} \quad (7)$$

Eficiência: é razão entre a energia utilizável e a energia armazenada, representada pela Equação (8). Contudo, esta expressão pode ser vista como muita vaga, pois as perdas do sistema podem variar de acordo com a aplicação. Ou seja, para saber a eficiência real um sistema de armazenamento, ela deve ser realizada a partir de um ou mais ciclos de operação em específico, e deve ser levado em conta todo processamento da energia. Para ser realmente competitivo, o sistema de armazenamento de energia deve ter uma boa eficiência total, isto é, para uma operação ótima, a transferência de potência deve ter perdas limitadas em termos de transferência de energia e auto-descarga. Esta medição de conservação de energia é um elemento essencial para aplicações de *load leveling* diárias. O termo *load levelling* será explicado mais à frente.

$$\eta = W_{ut} / W_{st} \quad (8)$$

Durabilidade: ou quantidade de ciclos, se refere ao número de vezes que a unidade de armazenamento pode liberar a quantidade de energia de energia para o qual foi projetada após cada recarga, expressa como o número máximo de ciclos N , um ciclo correspondendo a uma carga e a uma descarga. Todo sistema de armazenamento de energia está sujeito a fadiga ou ao desgaste pelo uso, porém, normalmente este processo é afetado por vários fatores e por isso a quantidade de ciclos não é sempre bem definida. Logo, a quantificação de N é delicada e os valores indicados representam ordens de grandeza.

Custos: como em qualquer outro investimento, um sistema de armazenamento de energia é um empreendimento interessante quando os ganhos totais excedem as despesas totais. O capital investido e os custos operacionais (manutenção, perda de energia durante o ciclo, tempo) são os fatores mais importantes a se considerar durante toda vida útil do sistema. Em termos de desenvolvimento sustentável, os custos globais durante toda vida útil do sistema devem ser considerados, incluindo matéria prima, energia, e outros custos ambientais devem ser considerados.

Viabilidade e adaptação a fonte geradora: o sistema de armazenamento precisa ser adaptado ao tipo de aplicação (em áreas isoladas, conexão com a rede, etc.) e ao tipo de produção (portátil, permanente, renovável, etc.) que o sistema foi projetado para suportar, a fim de garantir uma otimização da eficiência.

Auto-descarga: é a porção de energia que foi inicialmente armazenada e que foi dissipada em um determinado tempo sem uso.

Energia específica e densidade de energia: representa a quantidade máxima de energia acumulada por unidade de massa ou volume armazenada, respectivamente, um fator muito importante para certas aplicações, especialmente para aplicações portáteis.

Restrições operacionais: Especialmente relacionadas com a segurança (explosões, resíduos, etc.) ou outras condições de operação (temperatura, pressão, etc.), elas podem influenciar na escolha da tecnologia de armazenamento de energia em função da necessidade da energia.

Confiabilidade: em sistemas de armazenamento de energia é sempre um fator importante, pois é a garantia do serviço de demanda.
(IBRAHIM; ILINCA ; PERRON, 2008)

3.1 COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO CAMPO DE APLICAÇÃO

Existem diversas opções para aplicações de sistemas de armazenamento de energia. Segundo (IBRAHIM; ILINCA ; PERRON, 2008) aplicações de armazenamento de energia permanentes de larga escala podem ser classificadas em três categorias de operação principais, que estão destacadas a seguir.

- Qualidade da energia e armazenamento de emergência (1): Nestas aplicações, a energia armazenada é utilizada somente por alguns segundos para assegurar a qualidade de energia a ser entregue, reduzindo as oscilações de tensão e frequência da rede. Estas aplicações requerem um tempo de resposta rápida e capacidade de fornecer um grande pico de potência por um curto período tempo.

- *Buffer (2)*: A energia armazenada é usada por alguns segundos ou minutos para garantir a continuidade do serviço quando ocorre a troca de uma fonte de energia para outra.
- *Gestão da rede (3)*: Alguns sistemas de armazenamento de energia são utilizados para fazer o desacoplamento da sincronização entre a geração e o consumo. Uma operação típica é armazenar a energia produzida fora de pico, quando ela tem um baixo custo, e a utilizam em horários de pico, quando a energia é mais cara. Em inglês este processo é chamado de *load levelling*.

Além das aplicações citadas acima, sistemas de armazenamento de energia podem operar integrando fontes de energia renováveis, resolvendo o problema de intermitência intrínseco a estes sistemas. Esta técnica é chamada em inglês de *time-shifting*, que em tradução literal seria deslocamento no tempo, pois o consumo de energia é defasado da geração.

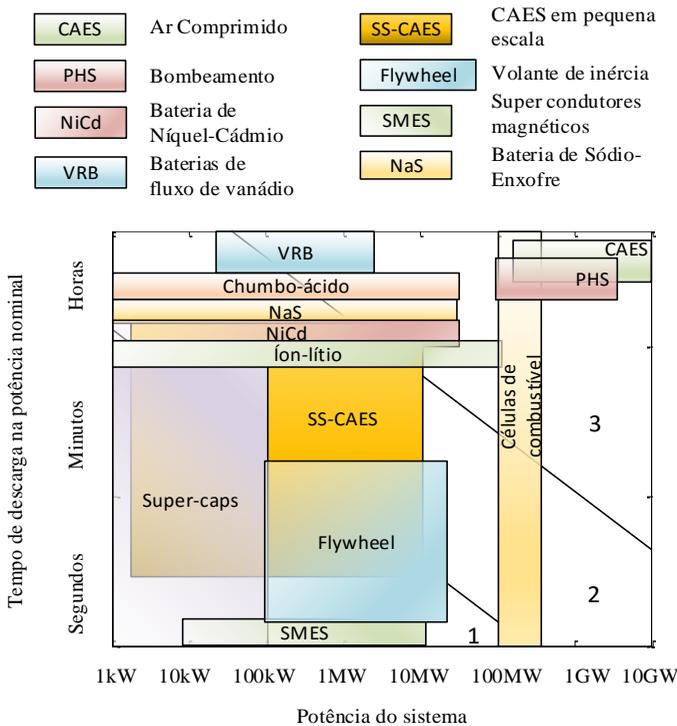
Assim, é possível distribuir as tecnologias de armazenamento¹ nas categorias de aplicação descritas acima, como é mostrado na Figura 3.1.

3.2 COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA POR CICLO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Dois parâmetros muito importantes a serem considerados na escolha de um sistema de armazenamento de energia são a eficiência energética e o número máximo de ciclos de operação, visto que estes afetam custos globais deste sistema. Uma baixa eficiência significa que uma pequena fração da energia armazenada efetivamente poderá ser utilizada, aumentando os custos da energia. Sistemas com tempo de vida útil curto necessitam ser substituídos com mais frequência, aumentando o custo a longo prazo. A Figura 3.2 ilustra graficamente a distribuição das tecnologias de armazenamento de energia em função da eficiência e da vida útil.

¹ Os gráficos a seguir foram construídos utilizando a compilação de dados feita por (LUO *et al.*, 2015).

Figura 3.1 - Distribuição das técnicas de armazenamento de energia em função do campo de aplicação.



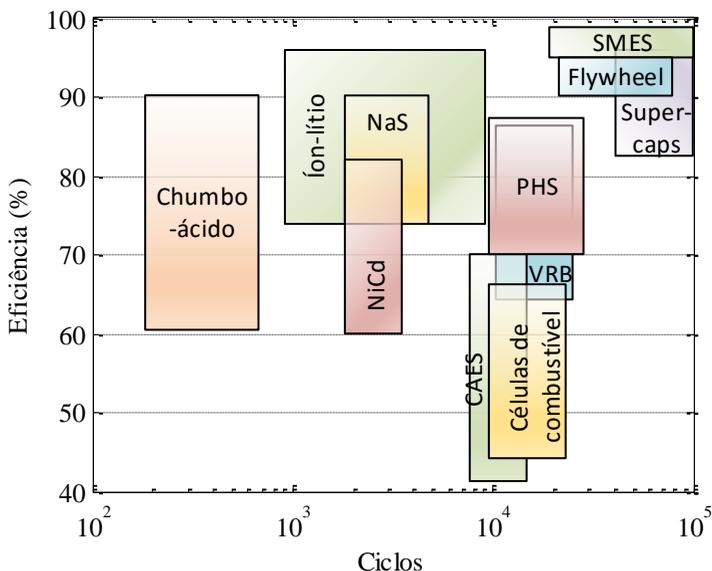
Fonte: Adaptado de (LUO *et al.*, 2015).

3.3 COMPARAÇÃO DO CUSTO DE INVESTIMENTO

Um parâmetro econômico muito importante a ser considerado na hora de escolher o sistema de armazenamento é o custo por energia do sistema, devido ao fato de que alguns sistemas só se tornam viáveis se uma quantidade mínima de energia puder ser fornecida. No entanto, outros fatores devem ser contabilizados, como a durabilidade e o custo de pesquisas, a fim de se obter uma aproximação maior do custo total do sistema. Por exemplo, o fato de baterias de chumbo-ácido serem técnicas mais baratas de se armazenar energia, elas não necessariamente são a melhor opção para a gestão de energia, uma vez que elas não são capazes

de suportar uma grande quantidade de ciclos. A Figura 3.3 apresenta uma comparação de custos de algumas tecnologias, em dólares.

Figura 3.2 - Distribuição das técnicas de armazenamento de energia em função da eficiência energética pelo tempo de vida útil em ciclos.



Fonte: Adaptado de (LUO *et al.*, 2015)

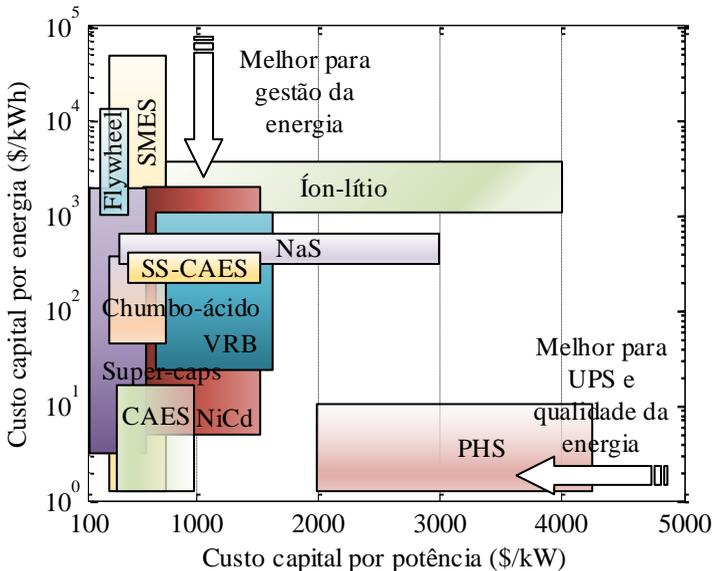
Vale ressaltar que estes custos são aproximados e podem variar de país para país, de acordo com a disponibilidade das tecnologias, e em função das suas políticas de importação e de seus custos internos de produção.

3.4 COMPARAÇÃO DE INVESTIMENTO POR CICLO DE CARGA E DESCARGA

Para aplicações onde a carga e a descarga são frequentes, um fator muito importante a ser levado em conta é o custo por ciclo do sistema. Assim, a distribuição de algumas tecnologias de armazenamento é apresentada na Figura 3.4, considerando o custo da energia pela vida útil e a eficiência, em centavos de dólar. Para uma análise mais completa

sobre o custo por ciclo devem ser consideradas também as despesas com pesquisas e custos de substituição dos equipamentos.

Figura 3.3 - Distribuição de técnicas de armazenamento em função dos custos de investimento por potência e pelo custo de energia.

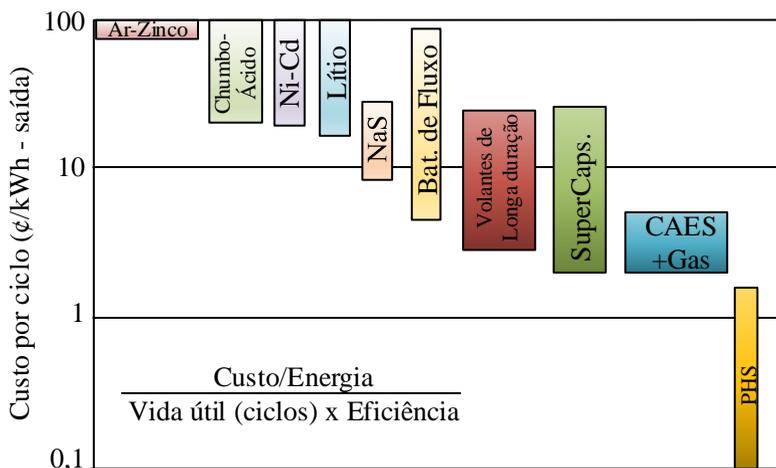


Fonte: Adaptado de (LUO *et al.*, 2015)

3.5 COMPARAÇÃO BASEADA EM ENERGIA ESPECÍFICA E DENSIDADE DE ENERGIA

A energia específica (Wh/kg) e a densidade de energia (Wh/L) podem ser fatores decisivos na escolha do sistema de armazenamento, principalmente em aplicações portáteis. Em caso de sistemas permanentes, o peso pode também influenciar o dimensionamento da estrutura, que pode afetar o custo total do sistema. A densidade de volume também é um fator que pode influenciar em locais onde o espaço é limitado, como por exemplo em áreas urbanas. Esta relação de densidade de massa e volume é apresentada na Figura 3.5.

Figura 3.4 - Distribuição de técnicas de armazenamento em função dos custos de investimento por ciclo de carga e descarga.



Fonte: (IBRAHIM; ILINCA ; PERRON, 2008)

3.6 CONCLUSÕES SOBRE AS TÉCNICAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

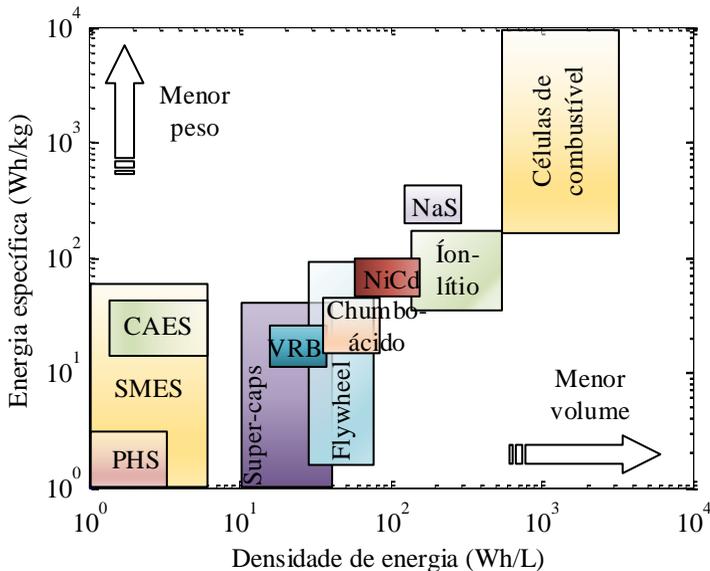
Foi visto neste capítulo que cada tecnologia de armazenamento de energia apresenta suas vantagens e desvantagens em relação as outras. Por isso, é difícil destacar qual é a melhor entre elas sem levar em conta a aplicação para o qual a mesma será utilizada.

Para aplicações de qualidade de energia, os fatores desejados são que o sistema tenha uma resposta rápida, a fim de amenizar as oscilações na rede. O sistema deve ser capaz também de suprir um pico de potência por um curto período de tempo. Para tanto, as tecnologias mais atrativas são os volantes de inércia, supercapacitores e supercondutores magnéticos.

Em grandes sistemas de integração de fontes renováveis, para realizar o *time-shifting* a partir de eólica e solar, a característica principal é a capacidade de armazenamento. Logo, sistemas como bombeamento e armazenamento em ar comprimido aparentam ser a melhor alternativa para larga escala. Contudo, apenas este fator não é determinante para definir o sistema de armazenamento a ser implementado. Fatores

geográficos, custo de importação de determinadas tecnologias e impactos ambientais também devem ser considerados. Baterias de fluxo também são fortes candidatos, contudo ainda são necessários alguns estudos e atualmente apresentam um alto custo de operação.

Figura 3.5 - Distribuição de técnicas de armazenamento em função da energia específica e da densidade de energia.



Fonte: (LUO *et al.*, 2015).

Sistemas pequenos e isolados de geração a partir de energias renováveis ainda tem como melhor opção as baterias de chumbo, devido sua autonomia. A quantidade de ciclos das baterias de chumbo ainda é um grande revés, contudo os avanços nas pesquisas com baterias de lítio e de sódio fazem que com que estas se apresentem como fortes candidatos no futuro.

Um fator muito importante também na escolha do método de armazenamento de energia, porém pouco citado nas referências, está relacionado com a degradação ambiental gerada pela tecnologia de armazenamento de energia, os rejeitos produzidos na industrialização das baterias e os recursos materiais e energéticos necessários para sua reciclagem.

4 ACUMULAÇÃO DE ENERGIA EM AR COMPRIMIDO

Como contribuição para o estudo de métodos de armazenamento de energia, foi proposto neste trabalho verificar a eficiência de um CAES em pequena escala. A seguir, será feita uma breve revisão sobre as teorias estudadas para implementação deste sistema.

4.1 TEORIA DO AR COMPRIMIDO

Neste capítulo, serão apresentadas as equações que farão parte deste trabalho. Todas equações estão disponíveis em (COPCO, 1976). Para ser mais fácil o entendimento de sistemas pneumáticos, algumas analogias podem ser feitas entre sistemas elétricos, que são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Analogias entre sistemas elétricos e pneumáticos.

Pressão	Tensão
Volume do reservatório	Capacitância
Vazão	Corrente
Atrito	Resistência

Fonte: Próprio autor.

Contudo, devido a compressibilidade do ar, algumas não linearidades aparecem em sistemas pneumáticos.

4.1.1 Termodinâmica

Realizando uma breve revisão sobre termodinâmica, cuja primeira lei diz que a energia não pode ser criada nem destruída, parte-se deste princípio para converter energia potencial pneumática em energia elétrica.

4.1.1.1 Processo isotérmico

Pela lei de Boyle dos gases, em um processo isotérmico, ou seja, não há variação de temperatura, é válida a Equação (9), onde p e V são respectivamente a pressão e o volume.

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (9)$$

A energia disponível em um sistema de ar comprimido, pode ser calculada a partir da equação geral do gases, Equação (10) e a equação do trabalho em (11)

$$pV = nRT \quad (10)$$

$$W = - \int_{P_1}^{P_2} V dp \quad (11)$$

Assim, a energia potencial pneumática de um sistema de ar comprimido pode ser calculada pela Equação (12), onde P_1 e P_2 são respectivamente as pressões final e inicial e V_1 é o volume final do sistema.

$$W = - \int_{P_1}^{P_2} \frac{nRT}{p} dp = nRT \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] = p_1 V_1 \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] \quad (12)$$

E por fim, potência é trabalho pelo tempo e a vazão (Q) é volume por unidade de tempo ($Q = V / t$), então a potência instantânea que pode ser fornecida por este sistema é apresentada na equação (13).

$$P_c = p_1 Q \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] \quad (13)$$

4.1.1.2 Processo isoentrópico

O processo isoentrópico é o outro extremo do processo isotérmico, que diz que todo calor gerado pela compressão é mantido no sistema. Outra forma de calcular a energia disponível em sistema de armazenamento em ar comprimido parte da Lei de Poisson, dada na Equação (14), onde $c_v / c_p = n$ é praticamente constante, sendo comumente adotada para o ar como sendo igual a 1,4.

$$p_1 V_1^{c_p/c_v} = p_2 V_2^{c_p/c_v} \quad (14)$$

Aplicando a Equação (14) na Equação (11), para um processo isoentrópico, a energia disponível no sistema pode ser encontrada a partir da Equação (15).

$$W = p_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[\frac{p_1^{\frac{n}{n-1}}}{p_2} - 1 \right] \quad (15)$$

Assim, a energia real disponível em um sistema de armazenamento de energia será um valor entre as Equações (12) e (15).

Com estas equações, como segundo passo, será realizado um estudo do compressor de ar disposto no Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ), a fim de verificar a energia necessária para se armazenar uma quantidade significativa de ar e o rendimento deste processo. Assim, poderá ser realizado uma estimativa da eficiência deste modelo de armazenamento de energia.

4.1.2 Compressores

Existe uma grande diversidade de compressores disponíveis no mercado, que funcionam de acordo com seu princípio de operação. Contudo os compressores mais comuns são os compressores de deslocamento positivo ou volumétricos de pistão. Em aplicações específicas, onde se trabalham com pressões menores e vazões elevadas, geralmente são utilizados compressores dinâmicos. Um resumo das características dos principais compressores será apresentado a seguir.

4.1.2.1 Compressores alternativos de pistão

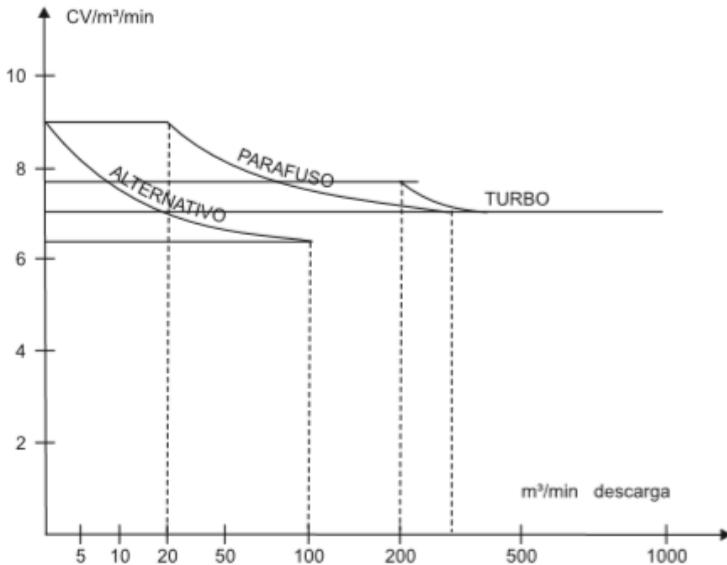
Os primeiros disponíveis no mercado, os compressores de pistão aspiram e comprimem o ar através de cilindros com ajuda de válvulas auto-acionáveis que fazem o papel de admitir e descarregar as ar. Estes compressores podem ter vários pistões, e são muito utilizados devido sua grande flexibilidade na produção de pressão e vazão.

4.1.2.2 Compressores de parafuso

A compressão do ar ocorre por meio de dois elementos rotores de parafuso, paralelos entre si, sincronizados por meio de engrenagens externas ao espaço de compressão. Devido não haver atrito entre os rotores, não existe a necessidade de lubrificação dentro da câmara de compressão. Deste modo, o ar descarregado não contém partículas de óleo. Suas vantagens são o volume reduzido, produção contínua de ar e temperatura mais baixa no fim da compressão.

A Figura 4.1 apresenta os consumos médios de alguns tipos e tamanhos de compressores.

Figura 4.1 - Consumo específico médio dos compressores.



Fonte: (ELETROBRÁS, 2005)

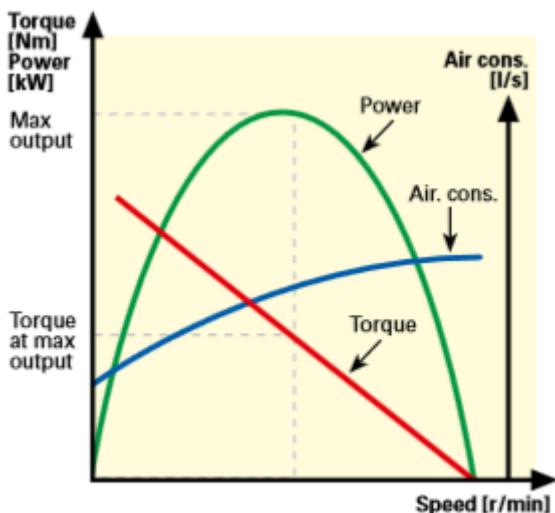
4.2 MOTORES PNEUMÁTICOS

Motores pneumáticos são comumente usados em processos industriais por serem robustos, não podem ser danificados por sobrecarga, reversões ilimitadas ou operação contínua. Também possuem uma alta densidade de potência e operam em altas rotações. Uma curva típica de

um motor pneumático é apresentada na Figura 4.2, operando com pressão do ar constante. Normalmente a potência máxima ocorre na metade da rotação livre. Entende-se por rotação livre sem nenhuma carga no eixo.

Os principais tipos de motores pneumáticos são os de palhetas, de pistão e turbina. No motor de palhetas, o ar se expande entre as lâminas das palhetas, apresentam uma boa relação entre potência e peso, e a velocidade pode chegar a 30.000 rpm. O motor de turbina o ar se expande nos cilindros e normalmente operam abaixo dos 5.000 rpm. O motor do tipo turbina transforma a energia do ar comprimido em energia cinética, possui uma relação entre peso e potência melhor que os motores de palhetas, e operam em altíssimas velocidades, o que os torna difíceis de serem controlados (COPCO, 1976).

Figura 4.2 - Curvas típicas de performance de um motor pneumático.



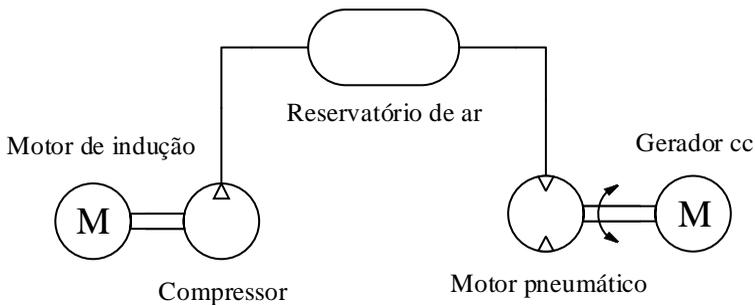
Fonte: (ATLAS COPCO, 2015)

4.3 DESENVOLVIMENTO

Assim, com o estudo teórico levantado sobre sistemas pneumáticos, será descrito a seguir como foi realizado o estudo de implementação do sistema de armazenamento em ar comprimido em pequena escala.

As principais partes do sistema são um compressor, um motor pneumático¹, e um motor de CC de ímãs permanentes, utilizado como gerador. As características de cada parte são descritas respectivamente nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6. As curvas de desempenho do motor pneumático são apresentadas na Figura 4.4. Foi utilizado também uma válvula reguladora de pressão, a fim de escolher a pressão de trabalho. O sistema é apresentado nas Figura 4.5 e Figura 4.6.

Figura 4.3 - Esquemático simplificado do sistema de armazenamento de energia a ar comprimido proposto.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 - Características do compressor de ar CSL 10BR/100.

Deslocamento de ar teórico	283L/min
Pressão de Operação	Máxima 9,7 bar
	Mínima 6,9 bar

Potência do Motor	1,5kW
Volume do reservatório	93L
Peso Líquido	72 kg
Peso Bruto	97kg

Fonte: (SCHULZ S/A, 2015)

¹ Ao invés de um motor, foi utilizado uma furadeira pneumática, que possui o mesmo princípio construtivo de um motor, apenas é adicionado um mandril no eixo.

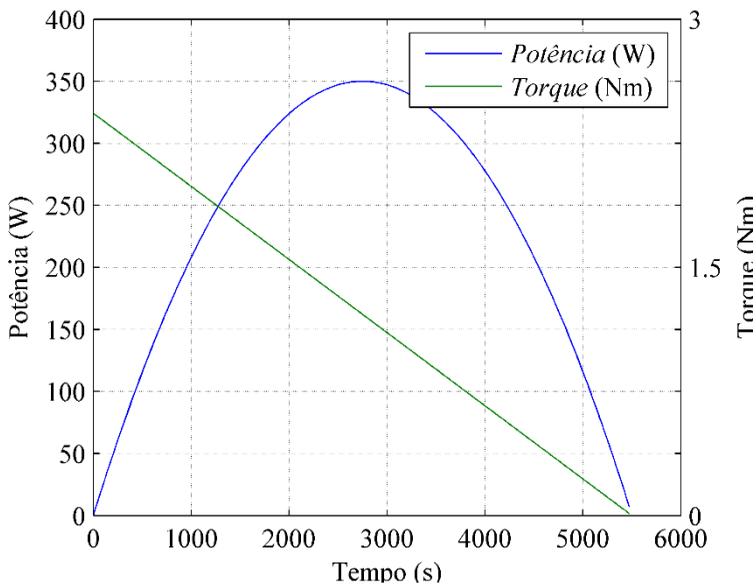
Tabela 5 - Características do motor pneumático.

Fabricante	Reitz
Modelo	FMR-55/6 PEP
Consumo de ar	0,24 m ³ /min (8,3 pcm)
Potência	350 W (0,47 hp)
Rotação livre	5500 RPM

Fonte: (REITZ INDÚSTRIA MECÂNICA LTDA, 2015)

A Figura 4.4 mostra a curva de desempenho do motor pneumático operando em 6,5 bar, que foi construída a partir dos dados fornecidos no catálogo do fabricante.

Figura 4.4 - Curva de desempenho da ferramenta obtida a partir dos dados fornecidos no catálogo.



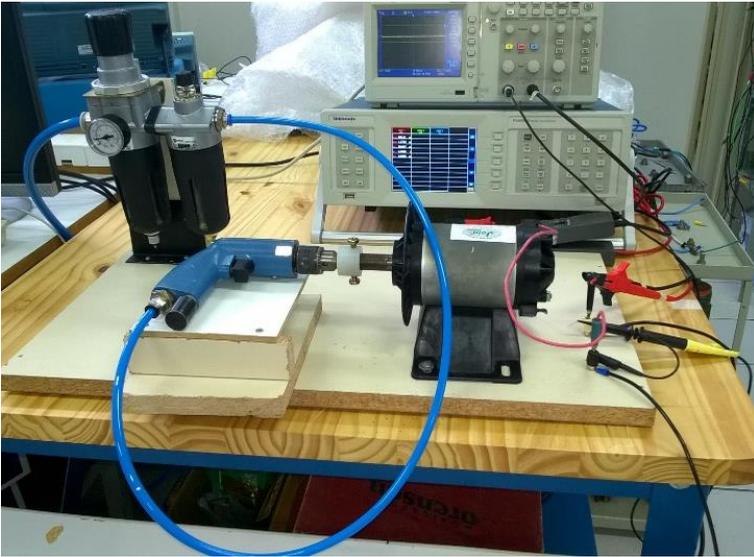
Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 - Dados do gerador.

Tensão (V)	90
Corrente (A)	6
Potência no eixo (hp)	0,8
Velocidade (rpm)	4000
Torque no eixo (N.m)	1,43

Fonte: Dados da placa do motor.

Figura 4.5 - Sistema de geração de energia pneumática.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.6 - Compressor utilizado no sistema de armazenamento de energia em ar comprimido.



Fonte: Próprio autor.

4.4 CÁLCULO DA ENERGIA POTENCIAL PNEUMÁTICA ARMAZENADA

A partir da Equação (12) e Equação (15), apresentadas no capítulo anterior, pode-se estimar a energia disponível no reservatório de ar, quando este está na sua pressão máxima. Sendo então p_1 e p_2 a pressão máxima de operação do compressor e a pressão atmosférica respectivamente, e V_1 o volume do reservatório, encontra-se que a energia potencial total armazenada em ar comprimido estará entre 0,172 MJ e 0,239MJ, ou então, 47,95 Wh e 66,27 Wh, calculados na Equação (16) e Equação (17).

$$W_{armazenada} = p_1 V_1 \left[\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right] = 1,72 \times 10^5 \text{ J} \quad (\text{isotérmico}) \quad (16)$$

$$W_{armazenada} = p_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[\frac{p_1^{\frac{n}{n-1}}}{p_2} - 1 \right] = 2,39 \times 10^5 \text{ J} \quad (\text{isoentrópico}) \quad (17)$$

4.5 ENSAIO DE MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA CARGA

Conforme pode ser visto na Figura 4.4, existe um ponto do motor pneumático no qual é capaz de fornecer a máxima potência. Assim, o motor foi acoplado ao eixo do gerador e realizados vários testes, variando a carga no gerador, a fim de encontrar a máxima transferência de potência deste sistema, ou seja, o ponto mais eficiente.

Assim, para cada valor de carga nos terminais do gerador, foi regulado uma pressão e anotado os valores de potência e velocidade. Este ensaio foi feito para pressões entre 3 e 6 bar. O resultado pode ser visto na Figura 4.7. A partir disto, construiu-se a Figura 4.8 e foi possível verificar que a máxima transferência de potência ocorria sempre para o mesmo valor de resistência, independente da pressão aplicada.

4.6 CÁLCULOS DE RENDIMENTO DAS PARTES DO SISTEMA

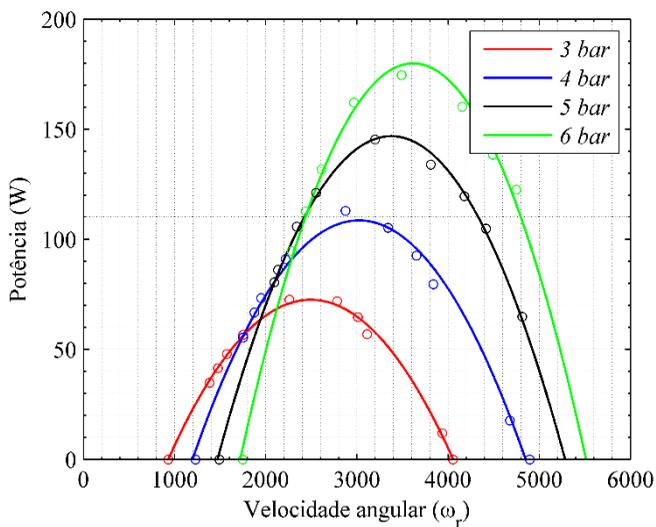
Nesta etapa é abordado o rendimento de cada parte do sistema. Alguns resultados foram obtidos por meio de ensaio e outros a partir de informações fornecidas contidas no catálogo do fabricante.

4.6.1 Rendimento do compressor

Na sequência, ensaiou-se o compressor. Utilizando um analisador de energia, calculou-se, a partir da área abaixo da curva da Figura 4.9, o consumo do compressor operando da pressão ambiente até a pressão máxima de 8,6 bar, resultando no valor de 93,13 Wh.

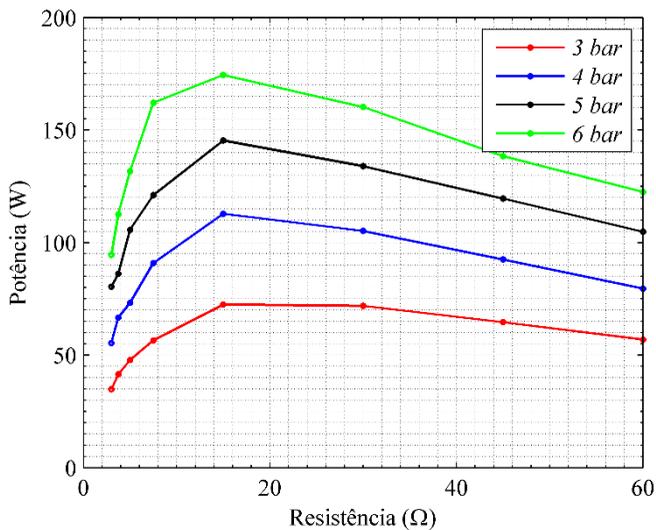
$$W_{consumida} = 93,13 \quad (18)$$

Figura 4.7 - Curvas de potência em função da velocidade.



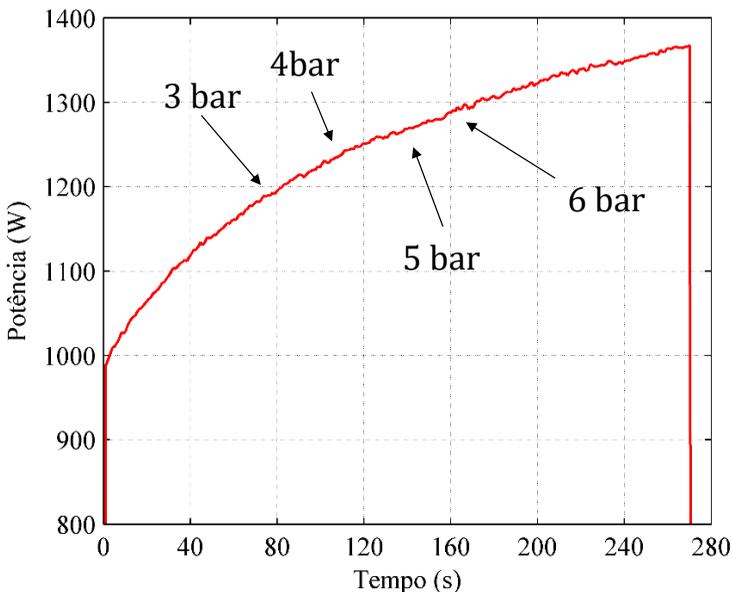
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.8 - Curva de potência em função da carga aplicada nos terminais do gerador.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.9 - Curva de potência absorvida pelo compressor ao longo da operação.



Fonte: Próprio autor.

E o rendimento do compressor, durante toda operação é dado então pela divisão da energia armazenada, encontrado na Equação (16), pelo consumo total do compressor, conforme calculado na Equação (19) e Equação (17).

$$\eta_{compressor} = \frac{W_{armazenada}}{W_{consumida}} = 52\% \quad (\text{isotérmico}) \quad (19)$$

$$\eta_{compressor} = \frac{W_{armazenada}}{W_{consumida}} = 71,15\% \quad (\text{isoentrópico}) \quad (20)$$

4.6.2 Rendimento do motor pneumático

O rendimento da furadeira foi obtido a partir dos dados fornecidos no catálogo. Como foi deduzido na Equação (13), a potência

de um sistema de fluido compressível pode ser obtido por meio do produto entre as vazão multiplicada pela pressão. Assim, a potência na entrada da furadeira é calculada na Equação (21), onde p_1 é 6,5 bar, p_2 é a pressão atmosférica e Q é o consumo de ar da furadeira especificado no catálogo.

$$P_{ar} = p_1 Q * \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 4,77kW \quad (21)$$

Logo, o rendimento, será a divisão entre o valor calculado na Equação (21) pelo potência especificada no catálogo, que está calculado na Equação (22)

$$\eta_{motor} = \frac{P_{motor}}{P_{ar}} = 7,34\% \quad (22)$$

4.6.3 Rendimento do gerador CC

O rendimento do gerador foi obtido por meio dos ensaios de rotor bloqueado e a vazio, considerando assim que o rendimento é o mesmo tanto para operação como motor, como gerador. Assim, bloqueando o rotor, foi elevada gradualmente a tensão nos terminais do gerador, até que a corrente no enrolamento atingisse a nominal. Deste modo foi possível obter a resistência de armadura, conforme apresentado na Equação (23).

$$R_{armadura} = \frac{V_r}{I_{armadura}} \quad (23)$$

$$R_{armadura} = \frac{28}{6} = 4,667\Omega$$

Assim, as perdas na armadura obtidas são apresentadas na Equação

$$Perdas_{armadura} = R_{armadura} * I_{armadura}^2 \quad (24)$$

$$Perdas_{armadura} = 4,667 * 6^2 = 168W$$

O ensaio a vazio foi realizado aplicando a tensão nominal no motor a vazio e verificando uma corrente de 0,5A. Assim, as perdas rotacionais são calculadas na Equação (25).

$$\begin{aligned} Perdas_{rotacionais} &= V_{armadura} * I_{vazio} - R_{armadura} * I_{vazio}^2 \\ Perdas_{rotacionais} &= 90 * 0,5 - 4,667 * 0,5^2 = 43,83W \end{aligned} \quad (25)$$

O rendimento do motor, operando em condições nominais, é dado pela Equação (26)

$$\begin{aligned} \eta_{geradorCC} &= \frac{V_{no\ min\ al} * I_{no\ min\ al}}{V_{no\ min\ al} * I_{no\ min\ al} + Perdas_{armadura} + Perdas_{rotacionais}} \\ \eta_{geradorCC} &= 71,82\% \end{aligned} \quad (26)$$

4.6.4 Rendimento teórico do sistema

Portanto, tendo os valores de rendimento de cada parte, é possível calcular um rendimento total do sistema, apresentado na Equação (27). Contudo, deve ser levado em conta que este rendimento é um valor aproximado, já que os rendimentos forma calculados para pontos diferentes de operação dos utilizados na prática.

$$\eta_{sistema} = \eta_{compressor} * \eta_{motor} * \eta_{gerador} = 3,75\% \quad (27)$$

4.6.5 Rendimentos experimental do sistema

Tendo o valor de carga em que ocorre a máxima transferência de potência, foram realizados ensaios a fim de encontrar a energia gerada pelo sistema. Para tanto, foram escolhidas algumas pressões de operação, e com a ajuda do analisador, encontrou-se seus respectivos valores de energia produzida, operando da pressão máxima do compressor até a pressão regulada na válvula.

De modo semelhante, foi obtido numericamente o consumo de energia da compressão operando entre a pressão regulada na válvula até a pressão máxima. A razão entre estes dois valores resulta no rendimento do sistema para aquela pressão de operação. Por exemplo, para uma pressão de 3 bar regulada na válvula, calculou-se numericamente a

energia consumida para o compressor elevando de 3 bar até a pressão máxima, como mostra a Figura 4.10, e depois medindo a energia gerada durante o consumo de ar enquanto a pressão no reservatório caía de 8,6 bar até 3 bar. Os valores para todas as pressões testadas são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7- Tabela de energia gerada pelo sistema em função da pressão de operação e seu respectivo rendimento.

PRESSÃO REGULADA (BAR)	ENERGIA PRODUZIDA (WH)	ENERGIA CONSUMIDA (WH)	RENDIMENTO EXPERIMENTAL (%)
3	2,9	69,8	4,15
4	2,3	61,4	3,74
5	1,6	48,5	3,30
6	0,8	40,0	2,00

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que o rendimento para pressões mais altas diminui devido à queda de pressão na linha de transmissão de ar.

A Tabela 8 apresenta a energia gerada com uma pressão regulada na válvula, porém, consumindo todo ar disponível no reservatório.

Tabela 8 - Energia gerada consumindo todo ar no reservatório.

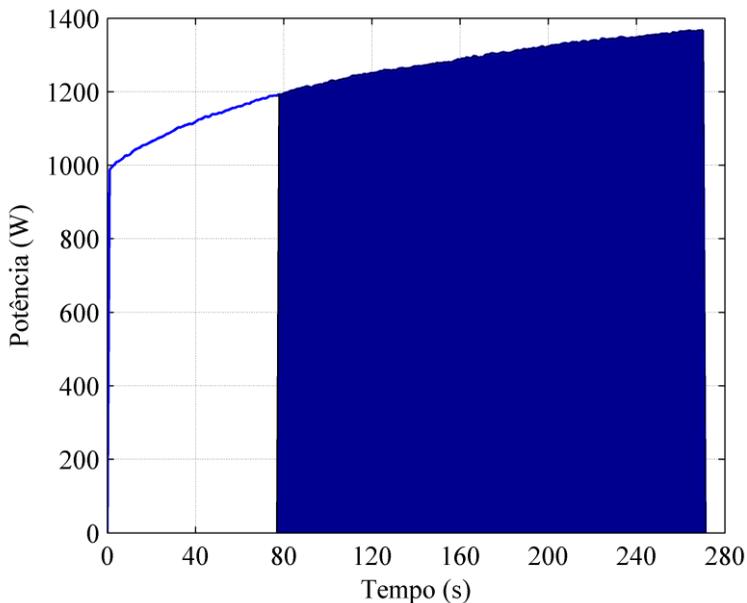
PRESSÃO REGULADA (BAR)	ENERGIA PRODUZIDA (WH)	RENDIMENTO EXPERIMENTAL (%)
3	4	4,30
4	4,2	4,51
5	4,3	4,62
6	4,5	4,83

Fonte: Próprio autor.

Pelos dados obtidos, conclui-se que este sistema operando na região de pressão constante, o sistema apresenta maiores perdas, resultando em um rendimento menor para pressões mais elevadas. Com o

sistema operando com consumo total do ar no reservatório, o sistema apresentou uma leve melhora no rendimento com o aumento da pressão. Este resultado, acredita-se, se deve pelo fato de que as perdas que ocorrem na válvula reguladora de pressão reduzem quando esta está operando abaixo da sua pressão na qual foi regulada.

Figura 4.10 - Curva de potência consumida pelo compressor ao longo da operação para elevar de 3 bar até o valor máximo de 8,6 bar.



Fonte: Próprio autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de conclusão de curso foi abordado uma visão geral em relação aos métodos de armazenamento de energia. Foi visto que além da utilização para reduzir o problema de intermitência de sistemas de geração a partir de fontes renováveis, sistemas de armazenamento de energia são utilizados para melhorar a qualidade da energia, reduzindo as oscilações de tensão e frequência e aliviar a produção de energia durante os períodos de pico de demanda. Ainda há muito o que se desenvolver nesta área, principalmente com relação à eficiência, e que ao mesmo tempo seja viável economicamente. Contudo, cada vez mais os sistemas de energia elétrica dependem de fontes alternativas, o que torna a utilização de sistemas de armazenamento de energia não mais uma opção, mas uma necessidade para o sistema elétrico.

Também foi proposto o estudo de implementação de um sistema de armazenamento de energia em ar comprimido em pequena escala. A eficiência obtida experimentalmente foi consideravelmente baixa, o que torna a aplicação deste sistema inviável, com os equipamentos que dispomos atualmente no laboratório. Contudo, pode-se destacar alguns fatores que contribuíram para este baixo rendimento, como o fato de que os equipamentos utilizados não foram projetados para este fim, ou seja as potências não eram casadas entre as partes. Contribuiu também o fato de não estarem operando em suas condições nominais. Também pode-se considerar as perdas de pressão ao longo da linha de ar comprimido até o motor.

Apesar dos resultados poucos satisfatórios, deve-se considerar como trabalhos futuros, a implementação ou simulação de um sistema semelhante utilizando equipamentos mais eficientes. O fator que mais contribuiu para a queda no rendimento do sistema foi a eficiência do motor pneumático. Se considerar a utilização de um compressor reversível, ou seja, que também possa operar como motor, e supondo que o rendimento destes dois processos sejam semelhantes, o rendimento total do sistema poderia aumentar significativamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, A. E. Potential for conventional and underground pumped-storage. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. 96, n. 3, p. 993-998, May 1977. ISSN ISSN: 0018-9510 DOI: 10.1109/T-PAS.1977.32413.

ALOTTO, P. et al. **Redox Flow Batteries for large scale energy storage**. Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International. [S.l.]: [s.n.]. Sept 2012. p. 293-298.

ATLAS COPCO. Atlas Copco Air Motors. **Atlas Copco**, 2015. Disponível em: <www.atlascopco.com>. Acesso em: 21 Setembro 2015.

CARLO GAVAZZI; WEG. Photovoltaic Plant - Garagem Solar WEG. **Garagem Solar WEG**, 2015. Disponível em: <<http://photovoltaicplant.weg.net/index.php>>. Acesso em: 1 Abril 2015.

CHEN, H. et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 3, p. 291-312, 2009.

COPCO, A. **Manual do ar comprimido**. [S.l.]: McGraw-Hill Medical, 1976. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bdt-kgEACAAJ>>.

CPFL ENERGIA. Eficiência energética: Utilização inteligente de energia elétrica e de equipamentos eficientes. **CPFL Energia**, 2015. Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/eficiencia-energetica/uso-consciente/Paginas/horario-de-pico.aspx>>. Acesso em: 30 Novembro 2015.

DIGI-KEY. **Electric Double Layer Capacitores, Supercaps**, 2015. Disponível em: <<http://www.digikey.com/product-search/en/capacitors/electric-double-layer-capacitors-supercaps/131084>>. Acesso em: 30 Novembro 2015.

ELETROBRÁS. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

GRBOVIC, P. J. **Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems: Analysis, Modeling and Design in Theory and Practice.** [S.l.]: Wiley, 2013.

HADJIPASCHALIS, I.; POULLIKKAS, A.; EFTHIMIOU, V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6, p. 1513-1522, 2009.

IBRAHIM, H.; ILINCA, A.; PERRON, J. Energy storage systems—characteristics and comparisons. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 12, n. 5, p. 1221-1250, 2008.

IEC. **Electrical Energy Storage.** International Electrotechnical Commission. Geneva, p. 78. 2011.

KAMIBAYASHI, M.; TANAKA, K. **Recent sodium sulfur battery applications.** Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES. [S.l.]: [s.n.]. 2001. p. 1169-1173 vol.2.

LUO, X. et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, v. 137, p. 511-536, 2015. ISSN ISSN: 0306-2619 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>. Disponivel em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>>

MAXWELL. Ultracapacitors. **Maxwell Technologies, Inc.**, 2015. Disponivel em: <<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors>>. Acesso em: 30 Novembro 2015.

NAKKEN, T. et al. **The Utsira wind-hydrogen operational experience.** Norsk Hydro ASA. Oslo, Noruega, p. 9. 2006. (N-0246).

PRICE, A. **Technologies for energy storage-Present and future:** flow batteries. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE. [S.l.]: [s.n.]. 2000. p. 1541-1545 vol. 3.

REITZ INDÚSTRIA MECÂNICA LTDA. Reitz Ferramentas Pneumáticas. **Reitz**, 2015. Disponível em: <<http://www.reitz.com.br/>>. Acesso em: 31 Outubro 2015.

SCHULZ S/A. Catálogo Geral de Produtos. **Schulz**, 2015. Disponível em: <<http://www.schulz.com.br/>>. Acesso em: 16 Julho 2015.

SCROSATI, B.; GARCHE, J. Lithium batteries: Status, prospects and future. **Journal of Power Sources**, v. 195, n. 9, p. 2419-2430, 2010.

SILVA, B. F. G. D. **Estudo de soluções alternativas de armazenamento de energia para diferentes horizontes temporais**. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores).

TAHIM, A.; NORA, B. D. S. **Smart Grids: Flywheel e Aplicações**. UFSC/INEP. Florianópolis. Notas de aula.

TAYLOR, J.; HALNES, A. **Analysis Of compressed air energy storage**. PCIC Europe 2010 Conference Record. [S.l.]: [s.n.]. June 2010. p. 1-5.

TESLA MOTORS, INC. PowerWall. **Tesla Motors**, 2015. Disponível em: <<http://www.teslamotors.com/powerwall>>. Acesso em: 10 Junho 2015.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Hydrogen and Fuel Cells. **Hydrogen and Fuel Cells Program**, 2006. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/doe_fuelcell_factsheet.pdf>. Acesso em: 14 Dezembro 2015.