



**ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**PAULO GABRIEL CUNHA**

**AR COMPRIMIDO PARA ARMAZENAR ELETRICIDADE**

**São Paulo - SP**

**2022**

**PAULO GABRIEL CUNHA**

**AR COMPRIMIDO PARA ARMAZENAR ELETRICIDADE**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PECE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e em Eficiência Energética.

Orientador: Prof. M.e José A. B. Grimoni

**SÃO PAULO - SP  
2022**

EU 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.

### FICHA CATALOGRÁFICA

Cunha, Paulo Gabriel.

Ar Comprimido para Armazenar Eletricidade. / Paulo Gabriel Cunha;  
orientador: Prof. M.e José A. B. Grimoni. – São Paulo, 2022.

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

1 Armazenamento de energia. 2 Ar comprimido. 3 Eficiência Energética. 4  
CAES.

## DEDICATÓRIA

À Lucélia, amor da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer ao Prof. Moreira, José R. S. e aos demais professores envolvidos na organização do curso de especialização energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.

Um agradecimento adicional ao meu orientador, Prof. Grimoni, José A. B., por ter aceito o tema e me orientado no decorrer deste trabalho.

Cunha, Paulo Gabriel. “**Ar Comprimido para Armazenar Eletricidade**”. Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética do Programa de Educação Continuada – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

## RESUMO

Enquanto as linhas de transmissão afetam onde a eletricidade é consumida, o armazenamento de energia influencia quando ela é consumida. Deste modo, a importância do armazenamento é fundamental no âmbito energético, já que a geração de eletricidade provinda das fontes eólica e solar não é capaz de produzir energia sob demanda. Assim, para solucionar esse problema da intermitência, é necessário armazenar a energia em uma espécie de *backup*. O armazenamento de energia com ar comprimido tem as credenciais para conciliar a oferta com a demanda, preenchendo os requisitos de baixo custo, alta eficiência e longa vida útil. Este trabalho pretende investigar formas de adequação do sistema de transformação de energia utilizando ar comprimido em consonância com a realidade brasileira e os materiais aqui disponíveis.

**Palavras-Chave:** 1 Armazenamento de energia. 2 Ar comprimido. 3 Eficiência Energética. 4 CAES.

## ABSTRACT

In the same way that transmission lines affect where electricity is consumed, energy storage influences when it is consumed. Currently wind and solar generation are not able to produce energy on demand. To solve this problem of intermittency, it is necessary to store the energy in a kind of backup. Compressed air energy storage has the credentials to match supply with demand, fulfilling the requirements of low cost, high efficiency and long lifespan. This work intends to investigate ways of adapting the energy transformation system using compressed air in line with the Brazilian reality and the materials available here.

**Keywords:** 1 Energy storage. 2 Compressed air. 3 Energy Efficiency. 4 CAES.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Perfil de um sistema de armazenamento de energia.....	9
Figura 2.2	Comparativo da potência de descarga, da energia armazenada e do tempo de descarga na potência nominal.....	10
Figura 2.3	Aplicação para dispositivos de armazenamento.....	11
Figura 2.4	Custo total de sistemas de armazenamento de grande escala por unidade de potência nominal.....	14
Figura 2.5	Custo de operação e manutenção.....	14
Figura 2.6	Linhas de transmissão em Alagoas e regiões onde foram encontrados os depósitos de sal-gema.....	15
Figura 2.7	Mostra a divisão entre as formas de armazenamento classificadas pela função.....	16
Figura 2.8	Abordagem amplamente utilizada para classificar energia armazenada.....	17
Figura 2.9	Sistemas isolados do Brasil.....	18
Figura 2.10	Local de aplicação das usinas térmicas (UTE) no Brasil.....	19
Figura 2.11	Perspectivas do futuro para potência instalada.....	20
Figura 2.12	Potência outorgada (kw) da fotovoltaica (amarelo) e eólica (azul) por local de aplicação.....	21
Figura 3.1	(a) mostra o primeiro modelo desenvolvido pela empresa. (b) mostra do bloco de concreto ao lado de um trabalhador.....	24
Figura 3.2	Como ficou o novo modelo.....	24
Figura 4.1	Estágios de sistemas de armazenamento de energia usando ar-comprimido.....	28
Figura 4.2	Diagrama com as diferentes tecnologias dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão.....	29
Figura 4.3	Esquemático do sistema diabático da usina de <i>Mcintosh</i> .....	31
Figura 4.4	Diagrama dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão da usina de <i>Mcintosh</i> .....	31
Figura 4.5	Esquemático de um sistema adiabático avançado de armazenamento de energia com ar comprimido.....	33
Figura 4.6	Diagrama dos processos empregados na compressão, armazenamento	

	e expansão de um sistema adiabático avançado de armazenamento de energia com ar comprimido.....	34
Figura 4.7	Esquemático de um sistema isotérmico de armazenamento de energia com ar comprimido.....	35
Figura 4.8	Diagrama dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão de um sistema isotérmico de armazenamento de energia com ar comprimido.....	36
Figura 4.9	<i>Layout</i> esquemático de uma planta LAES.....	38
Figura 4.10	Variações do ciclo <i>claudé</i> . (a) ciclo <i>kapitza</i> ; (b) ciclo <i>heylandt</i> .....	41
Figura 4.11	Qualidade única de pressão. Força atua em todas as direções.....	42
Figura 4.12	Compressão e expansão, forma da variação positiva e negativa da pressão.....	46
Figura 4.13	Mudança de temperatura durante processo adiabático com função de incremento de pressão.....	48
Figura 4.14	Mapa dos depósitos de sal gema no mundo.....	50
Figura 4.15	Volume constante (isocórico) e pressão constante (isobárico).....	51
Figura 5.1	Vista aérea da usina <i>Huntorf</i> (a), vista do compressor e turbina (b).....	52
Figura 5.2	Vista aérea da usina <i>Mcintosh</i> (a), vista do compressor e turbina (b)....	53
Figura 5.3	Vista da usina de <i>Goderich</i> .....	54
Figura 5.4	Vista aérea da usina <i>Jintan</i> (a), vista do compressor e turbina (b).....	55
Figura 5.5	Vista aérea do armazenamento <i>bijie</i> (a), vista do compressor (b).....	56
Figura 5.6	Vista do protótipo TICC – 500.....	59
Figura 5.7	Vista da instalação experimental da <i>Augwind Energy Tech</i> .....	60
Figura 5.8	(a) vista do tanque de polímero sendo inflado. (b) vista do tanque de polímero com a armadura de aço.....	61
Figura 5.9	Compressão e expansão de ar comprimido quase isotérmica usando injeção direta de <i>spray</i> de água da <i>Lightsail</i> .....	63
Figura 5.10	Demonstração de como seria a forma de armazenamento da <i>Lightsail</i> .....	63
Figura 5.11	Vista da renderização mostra os planos da <i>Hydrostor</i> para a usina Willow Rock.....	66
Figura 5.12	Vista da renderização mostra os planos da <i>Hydrostor</i> para a usina <i>Silver City</i> .....	67

Figura 5.13	Vista da renderização mostra os planos da <i>Hydrostor</i> para a usina <i>Chorro Valley</i> .....	68
Figura 5.14	Vista da turbina, compressor e caverna salina usina de <i>Bethel</i> .....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Processos de compressão, armazenamento e expansão.....39

Tabela 4.2 Pressão parcial com 1, 20 e 40 atmosferas. Como a quantidade de um componente aumenta proporcionalmente em relação a pressão.....45

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA-CAES	<i>Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage</i>
ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
AEC	<i>Alabama Electric Corporation</i>
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
ARENA	<i>Australian Renewable Energy Agency</i>
ATM	Atmosfera Padrão
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
CCEE	Câmara De Comercialização De Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CMSE	Comitê De Monitoramento Do Setor Elétrico
CNPE	Conselho Nacional De Política Energética
CO2	Dióxido De Carbono
D-CAES	<i>Diabatic Compressed Air Energy Storage</i>
ENEL	<i>Ente Nazionale Per L'energia Elettrica</i> (Empresa Italiana)
EOL	Central Geradora Eólica
EPE	Empresa De Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos Da América
FCK	Resistência Característica Do Concreto À Compressão
IBGE	Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística
I-CAES	<i>Isothermal Compressed Air Energy Storage</i>
LAES	<i>Liquid Air Energy Storage</i>
MME	Ministério De Minas E Energia
N2	Nitrogênio
NaS	Bateria De Sódio-Enxofre
NSF-CAES	<i>Non-Supplementary Fired Compressed Air Energy Storage</i>
NTL	<i>National Energy Technology Laboratory</i>
O2	Oxigênio
OMS	Organização Mundial De Saúde

ONS	Operador Nacional Do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDE	Plano Decenal De Expansão De Energia
PHS	<i>Pumped Hydro Storage</i>
PM-CAES	<i>Porous Media Compressed Air Energy Storage</i>
REA	<i>Renewable Electricity Act</i>
rpm	<i>Revolutions Per Minute</i>
SC-CAES	<i>Supercritical Compressed Air Energy Storage</i>
SIGA	Sistema De Informações De Geração Da ANEEL
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
U.S.	<i>United States</i>
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica De Energia
UHR	Usina Hidrelétrica Reversível
UTE	Usina Termelétrica De Energia
UTN	Usina Termonuclear
VBR	<i>Vanadium Redox Battery</i>
ZnBr	<i>Zinc–Bromine Battery</i>

## SIMBOLOGIA

\$	Dólar (unidade monetária)
~	Grandezas ou dimensões aproximadas
€	Euro (unidade monetária)
$\Delta U$	Varição de energia interna (E)
bar	Unidade de pressão
bar/h	Unidade de pressão pelo tempo em horas
$c_p$	capacidade calorífica específica a pressão constante
$c_v$	capacidade calorífica específica a volume constante
E	Energia Interna
GW	Gigawatts
k	<i>kappa</i> (expoente isentrópico)
K	<i>Kelvin</i> (temperatura)
kg	Quilograma
kg/ s	Quilograma por segundo
Kgf/cm <sup>2</sup>	Quilograma força por centímetro quadrado
Km	Quilômetro
KV	Quilovolts
kW	Quilowatt (medida de potência)
kWh	Quilowatt-hora (medida de energia)
L	Litro
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
MPa	Mega pascal
MW	Megawatts
MWh	Mega watt-hora
°C	Grau Celsius (temperatura)
p	Pressão
Q	Calor
T	Temperatura
v	Velocidade
V	Volume
W	Trabalho

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Breve contexto histórico .....	2
1.2	Justificativa .....	3
1.3	Objetivos Gerais .....	4
1.4	Objetivos Específicos.....	4
1.5	Metodologia do Trabalho.....	5
1.6	Estrutura do Trabalho .....	5
2	ENERGIAS RENOVÁVEIS DESPACHÁVEIS .....	6
2.1	O papel do armazenamento de energia.....	7
2.2	Características do armazenamento de energia .....	7
2.3	Aplicação de uma usina CAES na rede elétrica.....	11
2.4	Custos de desenvolvimento, instalação e operação.....	13
2.5	Classificação do armazenamento de energia .....	16
2.6	Situação atual do armazenamento de energia elétrica no brasil .....	17
3	ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	21
3.1	Usina hidrelétrica reversível (UHR).....	22
3.2	Baterias de gravidade:.....	23
3.3	Volantes de inércia:.....	25
3.4	Bateria de ar comprimido ou (CAES).....	25
3.5	Bateria de ar líquido ou (LAES).....	26
3.6	Bateria eletroquímica.....	27
4	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA USANDO AR-COMPRIMIDO .....	27
4.1	Sistema diabático:.....	30
4.2	Sistema adiabático avançado:.....	32
4.3	Sistema isotérmico:.....	35
4.4	Sistema com ar líquido (criogênico): .....	37
4.5	Processos de compressão, armazenamento e expansão .....	38
4.6	Dois ciclos básicos de um sistema CAES.....	40
4.7	Duas variações do ciclo <i>Claude</i> para sistema LAES .....	41
4.8	Pressão e temperatura .....	42
4.9	Temperatura, calor e movimento .....	44
4.10	Compressão e expansão do ar.....	46
4.11	Recipientes de armazenamento .....	48

4.12	Volume constante (isocórico) e pressão constante (isobárico) .....	50
5	VISÃO GERAL DE UM CAES .....	51
5.1	Projetos CAES em operação .....	51
5.1.1	Usina de <i>Huntorf</i> .....	51
5.1.2	Usina de <i>McIntosh</i> .....	52
5.1.3	Usina de <i>Goderich</i> .....	53
5.1.4	Usina de <i>Jintan</i> .....	55
5.1.5	Usina de <i>Bijie</i> .....	56
5.2	Projetos CAES incompletos/ abandonados .....	56
5.3	Sistemas CAES existentes como protótipos .....	59
5.3.1	Bateria de ar TICC-500.....	59
5.3.2	Bateria de ar da empresa <i>Augwind Energy Tech</i> .....	60
5.3.3	Bateria de ar da <i>Lightsail Energy</i> .....	62
5.3.4	Bateria de ar da <i>Alacaes</i> .....	64
5.3.5	Bateria de ar líquido da <i>Highview</i> .....	64
5.4	Sistemas CAES com projetos em andamento.....	64
5.4.1	Usina <i>ADELE</i> .....	65
5.4.2	Usina <i>Willow Rock</i> .....	65
5.4.3	Usina <i>Silver City</i> .....	66
5.4.4	Usina <i>Chorro Valley</i> .....	67
5.4.5	<i>Magnum CAES</i> .....	68
5.4.6	Usina de <i>Bethel</i> .....	68
6	CONCLUSÃO.....	69
7	REFERÊNCIAS .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

Quando olhamos para o futuro vemos possibilidades que não existiam antes, como casas inteligentes, carros elétricos e equipamentos conectados a uma inteligência artificial. Mais e mais, vemos a migração de novas tecnologias nos círculos pessoais com novos dispositivos eletrônicos que resolvem problemas do dia a dia.

Nos últimos anos, as perspectivas para um futuro com menos poluição, alinhados com as metas das Nações Unidas e outros acordos, trouxeram a tona problemas que antes eram ignorados, como os impactos ambientais. O crescimento da população e o aumento do consumo de energia *per capita* são uma realidade do presente. O consumo excessivo de combustíveis fósseis na matriz energética tem sido alvo de preocupação, fazendo com que o tema fosse debatido com mais extensão não somente entre os grupos específicos que dominam esse setor, mas também entre a população.

As tecnologias renováveis foram a solução considerada para resolver os problemas de dependência de combustíveis fósseis. No entanto, a maior desvantagem das energias renováveis é a sua natureza, uma vez que estes recursos não proporcionam uma oferta regular, facilmente ajustável ao consumo. Portanto, com a solução das energias renováveis surgiram novos problemas, tais como correlacionar a oferta com a demanda em um sistema que não tem constância no fluxo.

Dessa forma, para viabilizar a transição dos combustíveis fósseis para energias renováveis é imprescindível o uso de tecnologias de armazenamento e o gerenciamento de demanda. O armazenamento fornece uma solução promissora filtrando a variação das energias renováveis. [1] Atualmente, o desenvolvimento e a comercialização de tecnologias de armazenamento de energia vêm aumentando, pois são o pilar central para o sucesso da revolução energética. Contribuem significativamente para a integração das energias renováveis e garantem uma rede estável.

Existem muitos tipos de tecnologias de armazenamento de energia. Atualmente a Usina Hidrelétrica Reversível (UHR) representa mais de 97% da capacidade de armazenamento de eletricidade existente. Entre as outras formas disponíveis se destacam as baterias, ar comprimido, armazenamento de calor e hidrogênio.

Ainda assim, o progresso tecnológico e a competitividade de custos continuam sendo essenciais para a implantação em larga escala. [2] Conforme a demanda continua a crescer, instalações de armazenamento serão necessárias para aproximar a oferta da demanda, aumentando o uso das energias renováveis no sistema de distribuição Nacional.

Nesse trabalho vou abordar o uso do ar comprimido para armazenar eletricidade. Essa tecnologia é apenas uma das formas de armazenamento que tem as credenciais para filtrar as variações das energias renováveis.

### **1.1 Breve contexto histórico**

A ideia de comprimir o ar em um recipiente e liberá-lo quando necessário para realizar algum tipo de trabalho não é uma algo novo. Na revolução industrial do século 18, o desenvolvimento estava crescente e muitas invenções ocorreram devido a descoberta do motor a vapor.

Essa descoberta levou a invenção de diversas máquinas que eram capazes de enormes realizações na época. Inclusive, a locomotiva e o barco a vapor tiveram um grande papel em acelerar o desenvolvimento, encurtando as distâncias de um ponto a outro [3]. Com a modernidade, algumas máquinas se tornaram obsoletas, e novos meios e métodos foram sendo descobertos para realizar o mesmo trabalho. Com a comprovações da eficiência dessas novas invenções, aos poucos, as antigas máquinas foram sendo substituídas. Contudo, a turbina a vapor permaneceu até os dias de hoje, sendo empregada em grande escala na produção de energia elétrica.

Se olharmos retrospectivamente a história do desenvolvimento da turbina a

vapor, podemos ver a grande importância desta tecnologia que, mesmo após os avanços ocorridos no decorrer do tempo e o maior entendimento de como as coisas funcionam, ela ainda é utilizada na indústria [3]. Nos dias de hoje, a turbina a vapor é adaptada para ser usada em sistemas de armazenamento de energia usando ar-comprimido, em que o ar sob pressão entra no lugar do vapor saturado.

Hoje há um compromisso de implementação de uma série de mudanças no futuro no setor de energia, relacionados à proteção ambiental. Uma dessas projeções concretizadas foi a conclusão do processo de ratificação do Acordo de Paris, no dia 12 de setembro de 2016, ratificado pelo Brasil após a aprovação no Congresso Nacional, em que ficou estabelecido uma redução das emissões de gases do efeito estufa de 37% até 2025 e de 43% até 2030, tendo como parâmetro o ano de 2005. [4]

Porém, a promessa de reduzir as emissões de gases do efeito estufa são um desafio difícil de ser superado. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 o consumo de energia per capita deverá aumentar até 2030 [5]. E de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a população Brasileira também vai aumentar. As estimativas atuais apontam acréscimo de mais 12,3 milhões de habitantes em 2030, o que significa maior consumo energético [6].

Para honrar esses compromissos e as promessas se cristalizarem, muitos meios e métodos serão necessários. Um desses métodos é a utilização de ar-comprimido como armazenamento, objetivando o aumento do alcance das renováveis na matriz energética Brasileira e solucionando um dos principais problemas relacionados ao tema de fluxo de energia elétrica, solar e eólica.

## **1.2 Justificativa**

Atualmente a geração eólica e solar não são capazes de produzir energia sob demanda. Isso quer dizer que essas fontes não estão sempre disponíveis para

entregar energia quando ela é necessária. Para solucionar esse problema da intermitência, é necessário armazenar a energia em uma espécie de *backup*. A medida que a eólica e solar forem crescendo, maior capacidade de armazenamento será necessário para despachar a energia. [7]

A ideia básica de um sistema de armazenamento com ar comprimido ou (CAES) é transferir a energia produzida fora do pico das fontes renováveis ou das fontes de base, como hidrelétricas e térmicas, injetando essa energia no momento de maior pico, usando, assim, menos combustível das térmicas para atender a demanda. [8]

### **1.3 Objetivos Gerais**

Atualmente, o processo de armazenamento de energia provinda de fontes renováveis ainda é problemático por conta de diversos fatores, dentre eles: os custos de instalação; as limitações dos materiais utilizados e outros elementos que dificultam seu desenvolvimento. Desse modo, este trabalho pretende investigar formas de adequação do sistema de transformação de energia utilizando ar comprimido em consonância com a realidade brasileira e os materiais aqui disponíveis.

### **1.4 Objetivos Específicos**

De maneira específica, a pesquisa almeja:

- Realizar um breve apanhado histórico a respeito da questão da geração de energia com ar comprimido.
- Definir e explorar conceitos relacionados ao tema, tais como: usinas existentes, custo de operação, custo de desenvolvimento, local de aplicação desses sistemas, processos, protótipos existentes e integração a fontes renováveis.
- Realizar pesquisa com o objetivo de obter dados para verificar se há no território brasileiro espaço para implementação de uma usina CAES de grande porte.

- Relacionar os dados teóricos aos práticos, no intuito compreender se vale a pena o investimento no Brasil para aplicação de integração com as renováveis.

## **1.5 Metodologia do Trabalho**

A metodologia de pesquisa em trabalhos acadêmicos, sites de empresas, entrevistas, reportagens, livros, jornais, manuais e fichas técnicas.

Análise do material: Comparação entre referências para extrair o máximo de informações atualizadas do material estudado. Usando as referências dos trabalhos analisados, chegando em fontes confiáveis (primárias) de informação.

No levantamento dos custos para a composição do sistema, foi escolhido a referência que tinha como critério o custo total de sistemas de armazenamento por unidade de potência nominal em €/ kW.

O trabalho buscou uma solução que atenda a três requisitos, custo, eficiência e longa vida útil.

## **1.6 Estrutura do Trabalho**

A monografia está dividida em 7 capítulos, em que no primeiro contém a introdução, contexto histórico, objetivo geral, objetivos específicos, metodologia do trabalho e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo aborda energias renováveis despacháveis, o papel do armazenamento, características, aplicação para dispositivos de armazenamento, custos, classificação e a situação atual do armazenamento de energia elétrica no Brasil.

O terceiro capítulo aborda algumas soluções de armazenamento praticadas pelo mercado, mostrando diferentes aplicações para cada uma. O quarto capítulo

aborda a parte dos fundamentos e propriedade da matéria ar, sistemas CAES, processos e ciclos. O quinto capítulo mostra o que existe de sistemas CAES em operação, o que não foi implementado, o que está como protótipo e o que está em andamento como projetos para o futuro. Capítulo 6 conclusões e desenvolvimentos futuros. Capítulo 7 referências.

## **2 ENERGIAS RENOVÁVEIS DESPACHÁVEIS**

Quando falamos de energia renovável é importante ter em mente as definições do que é renovável e o que não é renovável. Um gerador é considerado “renovável” dependendo do recurso que utiliza para geração da energia elétrica. De acordo com *Renewable Electricity Act* (REA), é considerado uma fonte renovável quando o recurso energético ocorre naturalmente, podendo ser reabastecido ou renovado ao longo da vida humana [9].

As hidrelétricas com reservatórios de acumulação são exemplos perfeitos de fontes renováveis despacháveis, por permitirem um controle mais preciso do momento da geração da energia e possibilitarem o armazenamento da fonte de geração [10]. Se olharmos para as referências [11] e [12] os autores descrevem que a maioria das fontes de energia renováveis não são despacháveis por se tratarem de fontes intermitentes. Por exemplo, os painéis solares produzem eletricidade quando o sol brilha e a quantidade de energia gerada não pode ser aumentada ou diminuída sob demanda.

Os geradores despacháveis têm que ser capazes de ser ligados ou desligados, ou devem ter habilidade de ajustar sua potência de acordo com a necessidade do mercado. Quando um gerador é despachável, ele pode ser usado para combinar a carga, atender às demandas de pico ou preencher a lacuna se outro gerador estiver parado. A geração despachável é muito valiosa para o mercado, pois pode ser utilizada para atender ao perfil de demanda de energia de uma região. A característica essencial para ser uma fonte despachável está na disponibilidade e no controle da quantidade de energia. [13]

## **2.1 O papel do armazenamento de energia**

Quando falamos de energia armazenada devemos questionar qual a importância do armazenamento. O principal motivo para armazenar energia é conciliar a oferta com a demanda, que são dois elementos diferentes e, com bastante frequência, distintos no tempo e em quantidade de energia disponível.

Com efeito, o armazenamento de energia em geral ainda é um obstáculo para muitas aplicações. É importante destacar sua relevância no aumento do tempo de operação para dispositivos eletrônicos, como celulares, drones, carros elétricos entre outros.

No tocante às energias renováveis com baixa pegada de carbono, como a eólica e solar, o armazenamento assume maior relevância devido sua natureza intermitente, sendo fundamental a conciliação entre a oferta e demanda. Contudo, há dificuldades para o armazenamento energético advindos dessas fontes, diante do desenvolvimento tecnológico existente na atualidade, existindo muitos meios e métodos diferenciados para armazenar energia, alguns mais eficientes que outros, os quais serão abordados nos próximos tópicos.

## **2.2 Características do armazenamento de energia**

Existe uma grande variedade de formas de armazenar energia, sendo que cada forma tem uma característica que a torna mais apropriada em algumas situações. Com o passar do tempo, passaram a ser desenvolvidas cada vez mais tecnologias disponíveis para o armazenamento, sendo necessário analisar a compatibilidade das tecnologias existentes em relação à aplicação a ser operada, a partir das características do método de armazenamento.

De acordo com a fonte [14] existem critérios para distinguir as qualidades de cada sistema. Esses critérios servem de instrumento de escolha, em que é possível determinar o local de aplicação de cada sistema. São eles:

- Capacidade de armazenamento;
- Potência de carga e de descarga;
- Tempo de carga e descarga;
- Taxa de autodescarga;
- Tempo de resposta;
- Taxa de resposta (*ramp rate*);
- Densidade de energia;
- Densidade de potência;
- Densidade de área (*footprint*);
- Eficiência do ciclo completo;
- Tempo de vida ou durabilidade;
- Profundidade de carga;
- Nível de maturidade da tecnologia;
- Flexibilidade de implementação;
- Impactos ambientais;
- Escala.

Fora esses critérios listados acima, também temos o custo de instalação e operação que, em muitos casos, é um fator dominante no momento da escolha. Mesmo que a tecnologia se enquadre de forma eficiente para a necessidade buscada, se o preço não for acessível para seu desenvolvimento, é pouco provável que seja implementada.

Além disso, muitas vezes a tecnologia empregada precisa de constante manutenção só para se manter funcionando, o que pode ser um problema, devido ao repasse do custo de manutenção para o consumidor final.

Portanto, a combinação dos fatores elencados são fundamentais para a escolha da tecnologia de armazenamento mais adequada para determinada aplicação, combinando os fatores técnicos, econômicos, entre outros.

Para ilustrar, a figura 2.1 abaixo mostra um exemplo de comparação entre duas tecnologias de armazenamento de energia com características bem diferentes. Essas características acabam revelando um perfil, em que é possível fazer uma análise, e por fim, definir um local de aplicação.

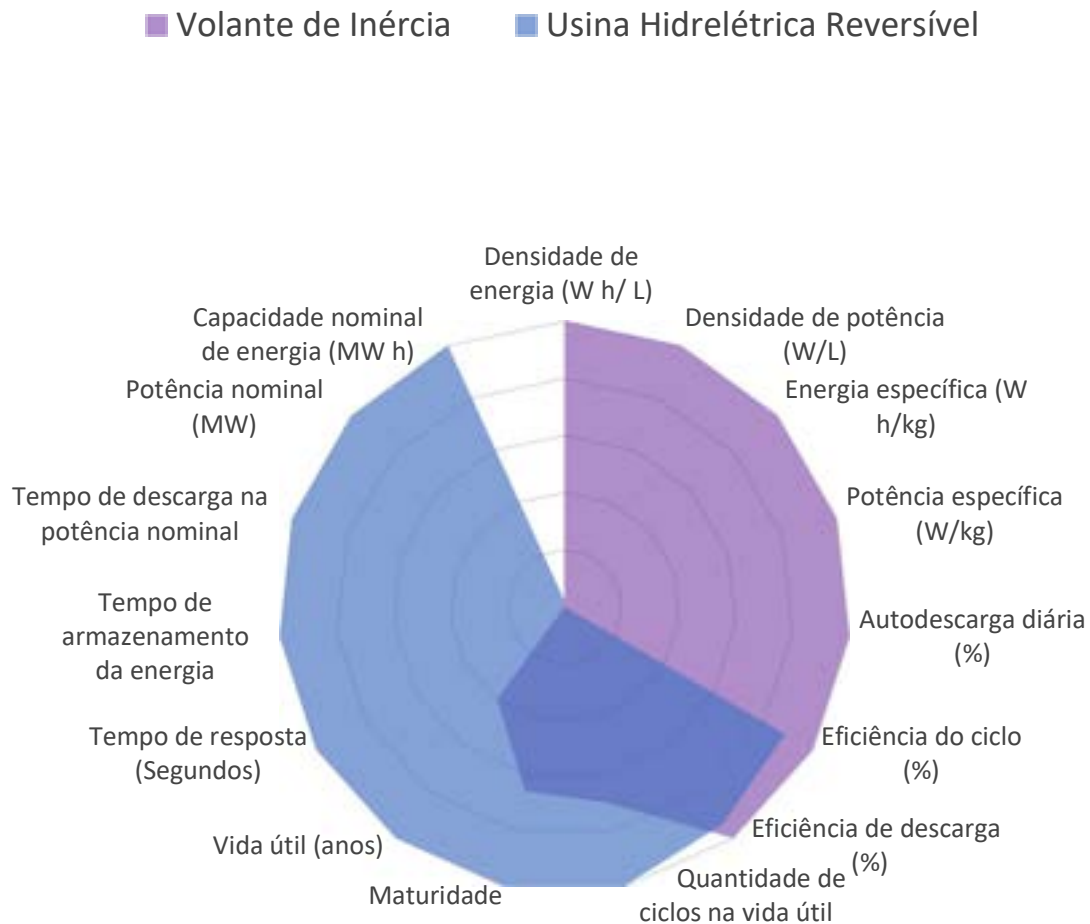


Figura 2. 1 Perfil de um sistema de armazenamento de energia.

Adaptação de: Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke (2014).

Tratando sobre o armazenamento de ar comprimido para geração de eletricidade (CAES), é necessário apontar os pontos fortes e pontos fracos desse sistema. Em alguns artigos e trabalhos acadêmicos é bastante comum encontrar a imagem de um diagrama comparando três características específicas entre as tecnologias existentes. São elas: potência de descarga; energia armazenada; tempo de descarga na potência nominal. A figura abaixo mostra como são associadas essas três grandezas em diferentes tecnologias.



### 2.3 Aplicação de uma usina CAES na rede elétrica

As disparidades entre o fornecimento e a demanda de eletricidade podem abranger escalas de tempo de milissegundos a meses. Uma única tecnologia, no entanto, é incapaz de operar em todas as escalas de tempo. Algumas tecnologias fornecem energia por um período prolongado, enquanto outras podem entregá-la rapidamente. A estabilidade da rede elétrica depende de vários fatores que trabalham em conjunto para manter o equilíbrio entre a eletricidade ofertada e a demandada. [16]

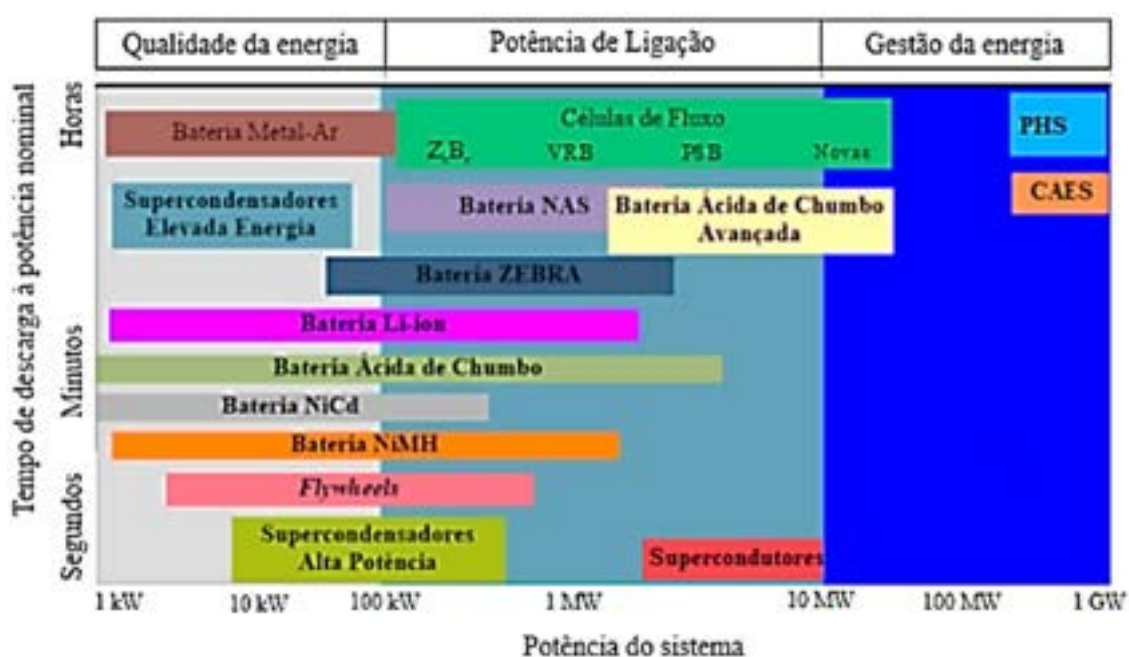


Figura 2.3: Aplicação para dispositivos de armazenamento. Fonte: Filipa V. R. G. Costa (2019)

Recentemente, as perspectivas de aplicação e o potencial do CAES no apoio à operação do sistema elétrico se tornaram amplamente reconhecidos, havendo a previsão de que o CAES virá a desempenhar um papel cada vez mais importante no gerenciamento de energia.

Podemos destacar as aplicações potenciais do CAES:

- Nos diferentes períodos tarifários associados às durações de ponta e fora de ponta, os usuários podem utilizar um sistema CAES para gerenciar a

energia, armazenando-a por um preço mais baixo e, posteriormente, liberando a energia elétrica armazenada durante os períodos de maior preço da eletricidade. [18 e 19]

- O sistema CAES pode melhorar a qualidade do fornecimento de energia das fontes renováveis, filtrando as variações de energia no tempo, trazendo estabilidade de fluxo dessas fontes. [18]
- As redes inteligentes do futuro (*Smart-grids*) apontam como tendência a maior participação do consumidor na geração, por meio das fontes renováveis. Há uma predisposição em alcance da gestão da energia tanto em direção ao fornecedor e o sistema CAES tem as credenciais para essa aplicação. [20]

Tradicionalmente, os ativos de eletricidade são categorizados com base em sua função, ou seja, geração, transmissão ou distribuição. Os sistemas de armazenamento diferem entre si devido a capacidade de equilibrar oferta e demanda entre os segmentos que compõem o setor elétrico.

Apesar de no setor elétrico existir necessidades de armazenamento em escala de tempo variada, há maior demanda para o armazenamento com descarga de várias horas, por conta da integração com as fontes renováveis. Quanto maior a capacidade de armazenamento, mais eficiente será o sistema elétrico como um todo, com melhor aproveitamento, abrangendo também mais de uma aplicação dentro da rede.

Porém, embora a duração da descarga de uma tecnologia seja importante e frequentemente seja considerada para uma aplicação particular, existem inúmeras outras características que contribuem para a seleção final decisão, tais como: potência nominal, duração do armazenamento, ciclagem, autodescarga, densidade de energia, densidade de potência, eficiência, tempo de resposta.

Podemos concluir que esses atributos podem determinar qual a tecnologia de

armazenamento preferível para uma determinada aplicação, contudo o fator fundamental que determinará a viabilidade de implementação será a análise se os benefícios oferecidos por uma tecnologia irão exceder o seu custo.

## **2.4 Custos de desenvolvimento, instalação e operação**

Os custos de desenvolvimento para esse tipo de sistema de armazenamento são tão dispersos, variando desde inspeções para verificar se uma caverna suporta a pressão de projeto até investimento em desenvolver tipos de compressores que tenham uma eficiência superior aos que existem no mercado.

Algumas empresas tiveram uma exposição maior que outras, anunciando investimento com pesquisas milionárias para entregar determinada tecnologia. Porém, nem sempre os valores publicados nos meios de comunicação refletem a realidade dos contratos dos investidores. Isso porque, normalmente os contratos são condicionados a entregas e outros critérios que, de certa forma, servem como garantias de materialização em lucro do dinheiro investido. Se um projeto “x” não entregar a primeira etapa de desenvolvimento é pouco provável que irá receber o restante do investimento.

Em pesquisa para este trabalho ficou evidente que para construção de um sistema CAES seja com a queima suplementar ou não, os países que tem o domínio dessa tecnologia pagam mais barato por ela, e os que não tem, pagam uma conta cara. Portanto, a exemplo de países que desenvolveram a tecnologia, o investimento científico é fundamental e deve ocorrer a longo prazo e de forma escalonar para o alcance de maior eficiência e viabilidade econômica do armazenamento.

No tocante ao custo da fonte [21], o custo total envolve a solução completa instalada. Com exceção do custo de construção dos reservatórios de uma usina hidrelétrica reversível (UHR), que envolve o relevo da região. A figura 2.4 mostra o custo total de sistemas de armazenamento de grande escala por unidade de potência nominal.

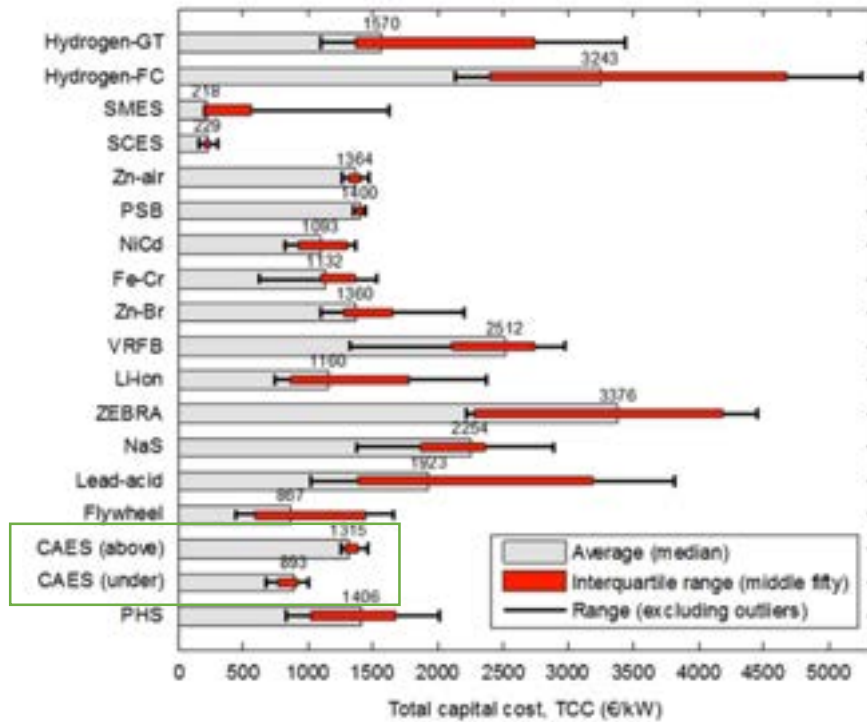


Figura 2.4: Custo total de sistemas de armazenamento de grande escala por unidade de potência nominal. Fonte: Behnam Zakeri., Sanna Syri (2014)

No custo de operação e manutenção, envolve todas as manutenções na vida útil, eletricidade, combustíveis e outros.

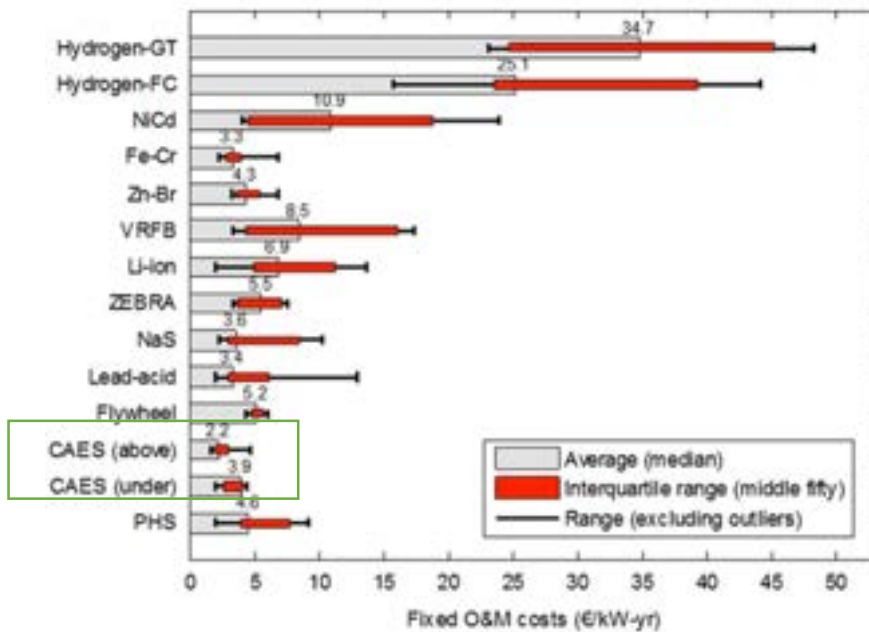


Figura 2.5: Custo de operação e manutenção. Fonte: Behnam Zakeri., Sanna Syri (2014)

O mapa abaixo mostra o Estado de Alagoas, o qual é forte candidato para servir de base para um projeto de grande porte CAES. Custos de construção de linhas de transmissão aparentemente estão mais favoráveis para Alagoas do que para o Estado do Espírito Santo, devido a existência das 35 cavernas abandonadas pela empresa Braskem, marcadas em vermelho na figura 2.6, onde a distância das linhas de transmissão até a região das cavernas é inferior a 5 km. [22]



Figura 2.6: Linhas de transmissão em Alagoas e regiões onde foram encontrados os depósitos de sal-gema. Fonte: (SIGMINE; Webmap EPE)

As novas áreas de exploração de sal-gema no Estado de Alagoas estão demarcadas em azul na figura 2.6. De acordo com a fonte [23], as linhas de transmissão em vermelho sem o traço entraram em operação no ano de 2012 com uma tensão de 500 kV, as linhas vermelhas com traço têm uma previsão para entrada em operação no futuro próximo com tensão de 500 kV, as linhas de transmissão em verde são existentes e com uma tensão de 230 kV. A distância das linhas de transmissão existentes estão a aproximadamente a 30 km das regiões com depósito de sal-gema.

Até o momento as cavernas salinas são o método de armazenamento mais barato devido a forma em que ela é escavada, pois usa água para diluir o sal-gema e transportá-lo para as regiões próximas do mar. Com isso, o custo para dessalinização da água utilizada para escavação se torna mais barato. O sal-gema é uma camada da superfície terrestre que existem em algumas regiões, encontradas em grandes profundidades. E esta camada é usada como recipiente, devido a profundidade e a característica de suportar grandes pressões.

## 2.5 Classificação do armazenamento de energia

De acordo com a referência [24], temos duas formas de classificar os sistemas de armazenamento de energia: pela função e pelo tipo de energia. A primeira forma de classificação pela função significa identificar a atribuição de determinado tipo de armazenamento dentro da rede elétrica. Por exemplo, um capacitor tem uma forma de liberar energia bem diferente da forma que uma termoelétrica libera energia. Essa diferença de características faz com que haja uma separação entre o capacitor e a termoelétrica. Enquanto o capacitor é mais indicado para certas aplicações como, no auxílio da qualidade e confiabilidade da rede elétrica, a termoelétrica cumpre outro papel, o de auxiliar no gerenciamento da energia. Podemos ver na figura 2.1 essa divisão entre as formas de armazenamento classificadas pela função.



Figura 2.7: Mostra a divisão entre as formas de armazenamento classificadas pela função.

Adaptado de: Ahmed Faheem Zobaa (2013).

A outra forma de classificação é pelo tipo de energia, como a mecânica, eletroquímica, elétrica, química e térmica. Na figura 2.8 podemos ver como é representada a classificação de tipos de energia. Essa forma de classificação é encontrada com bastante frequência em trabalhos acadêmicos e estudos, porém não é muito prática como instrumento de escolha de tecnologia de armazenamento. Na verdade, ela tem a finalidade somente de sistematizar e organizar, não revelando aspectos relevantes necessários para a escolha na aplicação prática, que exige análise de outros critérios como: a potência de descarga, energia armazenada, economia no período de vida útil, ciclo de vida, taxas de autodescarga, impacto ambiental, eficiência do ciclo, custo, duração do armazenamento, maturidade técnica e outros mais específicos [25].

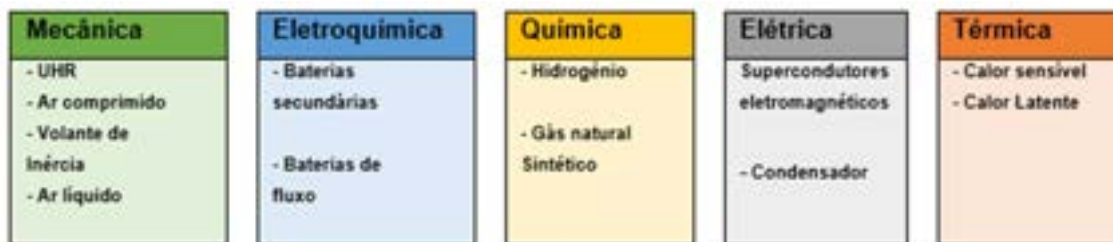


Figura 2.8: Abordagem amplamente utilizada para classificar energia armazenada. Adaptado de: Ahmed Faheem Zobaa (2013).

Até recentemente o armazenamento de ar líquido estava em processo de pesquisas e desenvolvimento, agora já está sendo classificado como armazenamento mecânico pelo *U.S. Department of Energy* e o *National Energy Technology Laboratory (NTL)*. [26]

## 2.6 Situação atual do armazenamento de energia elétrica no Brasil

No Brasil, ainda temos 270 sistemas isolados que em sua maior parte usam as térmicas para geração de eletricidade. [27] Em alguns casos, as usinas hidrelétricas são empregadas para esses sistemas isolados, mas, em geral, o método mais comum são as usinas térmicas. Como consequência, o armazenamento da energia está no formato de combustíveis fósseis e Biomassa.

De certa forma, o armazenamento de energia de uma fonte renovável, ainda é incipiente no território Nacional. O que existe, e se assemelha a um armazenamento renovável, é o emprego das térmicas para aumentar o nível de água dos reservatórios. Porém, o método empregado não é 100% de fontes renováveis, devido a presença de combustíveis fósseis na geração. Por outro lado, o acionamento das usinas térmicas é uma forma de segurança do sistema elétrico, empregado com bastante frequência em momentos de seca ou escassez hídrica.

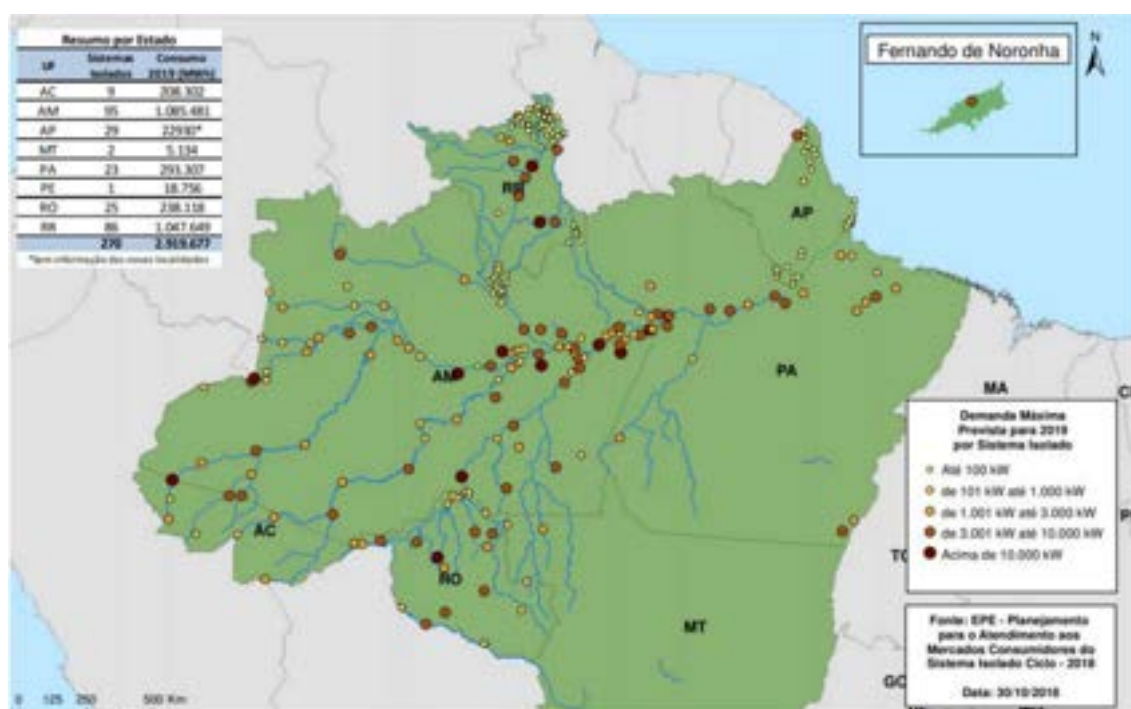


Figura 2.9: Sistemas Isolados do Brasil. Fonte: Empresa de pesquisa energética (EPE).

Existe uma diferença que delimita o meio e o método empregado para se armazenar energia. Essa diferença está cada vez mais aparente com o aumento do nível de conhecimento da população sobre os efeitos dos impactos ambientais, influenciando inúmeras áreas, entre elas, o setor energético.

A realidade do sistema elétrico Brasileiro é que as usinas térmicas (UTE) garantem ao país segurança energética para o caso de problemas nas hidrelétricas. Nem todas as termoelétricas são de combustíveis fósseis (carvão mineral, gás natural, petróleo e outros), existem as que usam a biomassa

(floresta, biocombustíveis líquidos, agroindústrias, resíduos animais e resíduos sólidos urbanos). De qualquer forma, sendo a biomassa ou o combustível fóssil ambos contribuem para o aumento das emissões de gases do efeito estufa.



Figura 2.10: Local de aplicação das usinas térmicas (UTE) no Brasil. Fonte: Banco de dados da Aneel (SIGA).

As perspectivas do futuro para a capacidade instalada estão com forte contribuição das fontes renováveis de acordo com Ministério de Minas e Energia (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Dentre as que estão em destaque até o momento são as: Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), Central Geradora Eólica (EOL), Central Geradora Fotovoltaica (UFV) e Central de Biomassa.

Essa projeção comprova a necessidade de viabilizar a transição dos combustíveis fósseis para energias renováveis é imprescindível o uso de tecnologias de armazenamento e o gerenciamento de demanda. O armazenamento fornecer uma solução promissora filtrando a variação das energias renováveis. [1] Atualmente, o desenvolvimento e a comercialização de tecnologias de armazenamento de energia vêm aumentando, pois são um pilar

central para o sucesso da revolução energética. Contribuem significativamente para a integração das energias renováveis e garantem uma rede estável. A figura 2.11 mostra as projeções e perspectivas do futuro para a potência instalada.

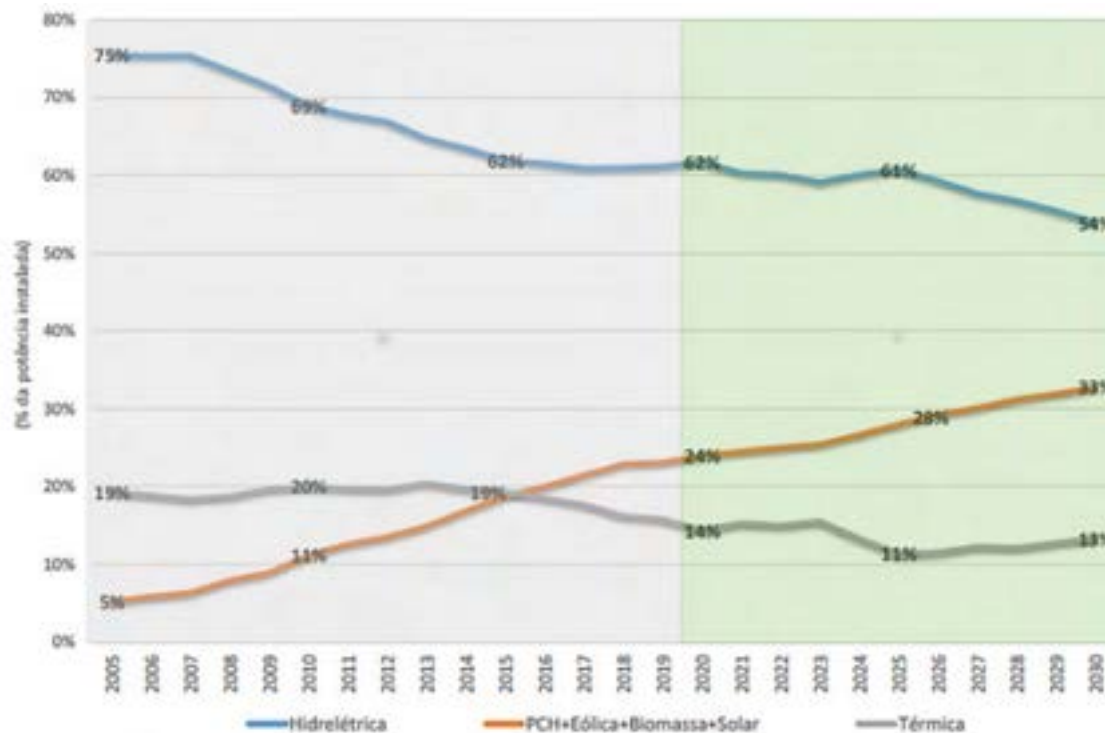


Figura 2.11: Perspectivas do futuro para potência instalada. Fonte: Empresa de pesquisa energética (EPE).

Com relação as fontes renováveis eólica e solar, a base de dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na data de referência dos dados a potência outorgada na central geradora fotovoltaica (UFV) é superior a potência outorgada central geradora eólica (EOL).

Fazendo um comparativo entre as duas fontes é possível verificar que a quantidade de instalações na fotovoltaica está maior que a eólica e mais distribuída no território Brasileiro do que a eólica conforme figura 2.12. Uma grande quantidade de centrais geradora fotovoltaica (UFV) em uma área muito grande torna inviável centralizar o armazenamento devido as redes de transmissão custarem caro e perdas do efeito Joule na transmissão.

Atualmente os sistemas CAES de pequena escala estão mais próximo da forma de operação das baterias de chumbo ácido com menor potência de descarga, menor energia armazenada e menor tempo de descarga na potência nominal.



Figura 2.12: Potência outorgada (kW) da fotovoltaica (amarelo) e eólica (azul) por local de aplicação. Fonte: SIGA ANNEL (2022)

Atualmente, UHR e CAES, ambos são tecnologias que são capazes de integração com as energias renováveis.

### 3 ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Atualmente existem diversas tecnologias de armazenamento de energia utilizadas pelo homem. Também existem as formas de armazenamento usadas pela natureza como, por exemplo, as plantas que capturam radiação solar e transformam em energia química, armazenada como açúcar dentro dos cloroplastos [28]. Neste trabalho não vou abordar os mecanismos de armazenamento da natureza, mas sim, como o homem usa a natureza ao seu favor para armazenar energia. Na física a conservação de energia é um conceito fundamental, juntamente com a conservação do momento e a conservação da

massa. A energia não é criada nem destruída, a quantidade de energia permanece constante dentro de um certo domínio de sistema. A energia potencial pode ser convertida em energia cinética e essa possibilidade de conversão de energia, de uma forma para outra, faz com que seja possível, a concretização de uma ideia com a de fazer uma bateria usando ar comprimido. Embora a física dos sistemas mecânicos seja geralmente bastante simples, as tecnologias que permitem o uso eficiente e eficaz dessas forças são particularmente avançadas. Materiais de alta tecnologia, sistemas de controle e design inovador tornam esse formato de armazenamento viável para o uso.

### **3.1 Usina hidrelétrica reversível (UHR)**

Na literatura estrangeira esse método de armazenamento leva o nome de *Pumped Hydro Storage* (PHS) aqui no Brasil recebeu o nome de Usina Hidrelétrica Reversível (UHR). De forma geral são dois reservatórios com diferença de altura um para o outro, quanto maior a diferença melhor. A água é bombeada para o reservatório superior nos momentos que há um excesso de energia disponível ou de baixa demanda, esse sistema se utilizando de um ciclo fechado ou aberto de água entre os dois reservatórios. Depois que a água atinge o potencial do reservatório superior ela está pronta para ser transformada em energia elétrica. [29] Um pouco diferente das hidrelétricas esse sistema tem uma característica peculiar de trabalhar como uma turbina tipo *francis* que pode trabalhar tanto para empurrar a água para o reservatório superior quanto para entregar energia cinética para o moto gerador com a água retornando para o reservatório inferior. Alguns desafios para esse tipo de sistema de armazenamento são em primeiro lugar a densidade energética, que é um termo usado para descrever o quanto de energia cabe dentro de um volume. Quando comparamos a densidade energética desse sistema com outros fica fácil de entender como a diferença é grande. Por exemplo, um gerador elétrico a gasolina com um litro de gasolina seria capaz de produzir mais energia do que um litro de água no sistema de usina hidrelétrica reversível (UHR). Na comparação litro por litro, a água tem uma péssima densidade energética, para valer a pena são necessárias grandes áreas para criar volume o bastante para compensar o rápido escoamento da água pela turbina. Fora esse desafio temos

também outro que é encontrar um local que tenha o tipo de terreno necessário para conter os mega reservatórios com uma diferença de altura entre eles. Outro grande desafio com sistemas de armazenamento de energia com água está relacionado com a eficiência. Em termos práticos o sistema funciona como se fosse uma grande bateria, e a quantidade de energia que entra na bateria versus a quantidade que sai é chamado de eficiência. Em outras palavras a eficiência é a diferença entre, tudo que entra, e tudo que sai em um determinado tempo. Podemos dizer que um sistema é mais eficiente quando essa diferença é menor.

### **3.2 Baterias de gravidade:**

Esse sistema utiliza os mesmos princípios da energia potencial que uma usina hidrelétrica reversível (UHR), porém no lugar da água entra um bloco de concreto de 30 toneladas a uma altura de 120 metros. A ideia é simples, usar blocos de concreto um em cima dos outros para formar uma grande montanha, essa montanha de blocos seria montada com energia das renováveis, depois, mais tarde, quando a demanda aumentar a montanha é desmontada e fornecendo energia para rede. De acordo com a fonte [30] esse método é mais barato que as UHR e é possível usar inteligência artificial para operar o sistema de forma automática. Durante o dia o sol e o vento fornecem energia para levantar os blocos, a noite os blocos são liberados e isso gira uma série de engrenagens até chegar em um gerador, que fornece energia elétrica para rede. Uma empresa que ganhou destaque foi a *Energy Vault AS*, fundada pelo *Bill Gross*, com sede na Suíça. Essa empresa já recebeu \$110 milhões em investimentos do *Softbank Vision Fund*. A *Energy Vault* construiu um protótipo para provar que a tecnologia realmente funcionava e em seguida foi construído uma unidade em escala real, provando a eficiência e economia. Cada unidade armazena 35 MWh e o custo de cada unidade é de \$ 8 milhões. Até o governo do Rio Grande do Norte, Brasil se empolgou com as possibilidades, e assinou no dia 21 de setembro de 2021 um memorando de entendimento para construção de um projeto-piloto. O plano é associar o projeto à produção de hidrogênio verde, que pode ser iniciada no estado nos próximos anos graças à abertura do mercado de energia eólica offshore no Brasil. Na figura 3.1 (a) mostra o primeiro modelo desenvolvido pela empresa, onde foi alvo de fortes críticas devido a exposição dos blocos de

concreto ao vento, o qual colocava o projeto como um todo em risco. Na construção civil quando chove ou venta forte as guias não operam. Na figura 3.1 (b) Mostra do bloco de concreto ao lado de um trabalhador.

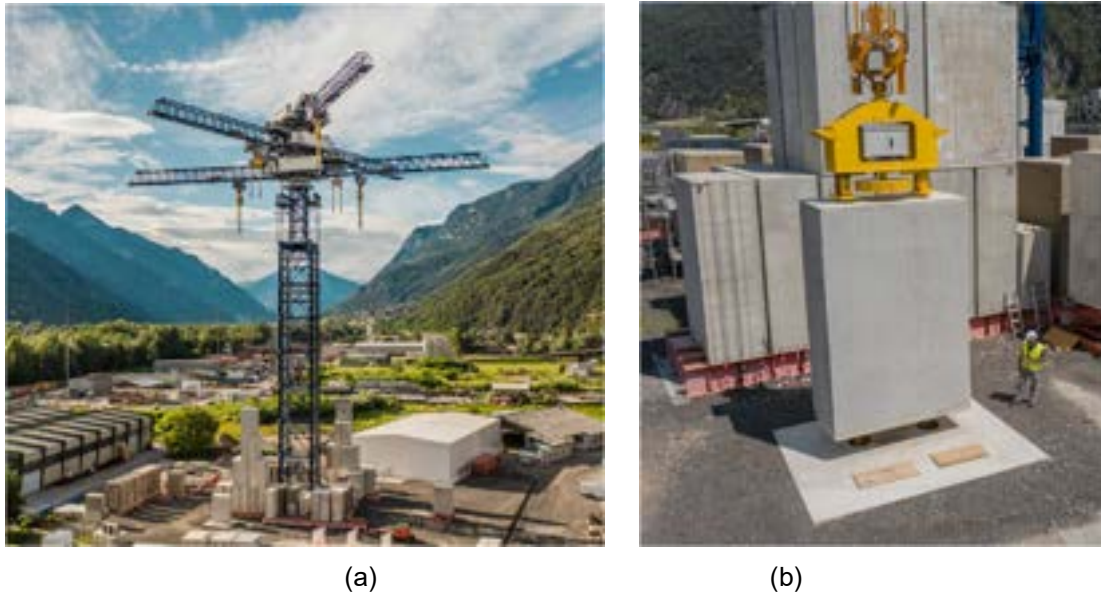


Figura 3.1: (a) mostra o primeiro modelo desenvolvido pela empresa. (b) mostra do bloco de concreto ao lado de um trabalhador. Fonte: (*Energy Vault*).

Com o novo modelo a empresa faz alterações no *design* construindo tudo dentro de uma grande caixa. Onde os blocos sobem e descem sem serem impactados pela ação dos ventos. Na figura 3.2 mostra como ficou o novo modelo.



Figura 3.2: Como ficou o novo modelo. Fonte: (*Energy Vault*).

### **3.3 Volantes de inércia:**

Os volantes de inércia armazenam energia como energia cinética rotacional por aceleração de uma massa rotativa em torno de um eixo fixo. A parte central de cada unidade é o rotor do volante. Quando colocado em rotação o rotor adquire momento angular e armazena energia mecânica. O rotor é acelerado ou desacelerado por uma máquina elétrica, geralmente uma unidade combinada de motor/gerador [32].

Uma empresa que tem ganhando destaque com esse tipo de sistema é a *Beacon Power*, de acordo com dados fornecidos pela empresa *Beacon Power* o conjunto usa apenas um motor que pode converter eficientemente energia elétrica em energia mecânica.

Quando o volante está carregando a energia elétrica é convertida em momento angular e quando a energia elétrica cessa, imediatamente o momento angular fornece energia para o motor que trabalha como um gerador de energia elétrica. A operação funciona com altas rotações girando uma borda composta de fibra de carbono de até 16.000 rpm.

O sistema opera em uma clausura, em uma câmara de vácuo selada que proporciona um ambiente quase sem atrito e também elimina a exposição ao oxigênio e à umidade. Para aumentar a vida útil das peças e reduzir o desgaste são empregados sistemas magnéticos para os mancais que precisam ser resfriados. Desta forma usa um campo magnético para levantar e apoiar totalmente o rotor reduzindo o atrito entre os componentes. O sistema de volante pode alternar instantaneamente entre os modos de carga e descarga. [33]

### **3.4 Bateria de ar comprimido ou (CAES)**

Os princípios por trás desse sistema são basicamente, um motor usa a energia fora de ponta ou barata para comprimir o ar em uma caverna salina. Mais tarde, quando a demanda por energia aumenta, o processo entra em reversão, o ar

comprimido retorna para superfície, esse ar é usado para queimar gás natural nas câmaras de combustão o gás de combustão é expandido em dois estágios na turbina, essa turbina entra em movimento e entrega energia cinética para um gerador e o gerador produz eletricidade [8].

Os pioneiros do armazenamento de energia usando ar-comprimido no mundo são a, usina de 290 MW pertencendo a E.N *Kraftwerke* em *Huntorf* na Alemanha, construída em 1978, e a Usina de 110 MW da *AEC (Alabama Electric Corporation)* em *McIntosh*, Alabama, Estados Unidos da América, construído em 1991. [8] A usina de *Huntorf* na Alemanha foi a primeira a usar ar comprimido para produção de energia comercialmente. Nesse trabalho vou abordar a fundo esse método de armazenamento.

### **3.5 Bateria de ar líquido ou (LAES)**

Essa próxima forma de armazenamento está na mudança de fase do ar. A atmosfera da terra é composta de ar. O ar é uma mistura de gases, 78% de nitrogênio e 21% de oxigênio com traços de vapor de água, dióxido de carbono, argônio e vários outros componentes. De forma geral, para um gás mudar do estado gasoso para o líquido ele precisa ser comprimido e simultaneamente precisa ser retirado o calor. Esse calor de acordo com a definição molecular de pressão de um gás ideal é gerado pelo movimento das moléculas que se chocam contra as paredes do recipiente. [34]

Esse método de armazenamento é muito parecido com a forma de armazenamento do ar comprimido, por se utilizar de uma turbina na hora da expansão e compressão na hora do armazenamento, a principal diferença é que o ar está armazenado no estado líquido ao invés do estado gasoso. O nitrogênio no estado líquido tem aproximadamente 700 vezes mais densidade (massa dividido pelo volume) do ar em estado normal. [15]

Devido a baixa eficiência do processo de liquefação do gás as tecnologias de armazenamento com ar comprimido têm uma eficiência entre 50 e 60%. [35] A

empresa *Highview Power* com sede no Reino Unido, projetou e montou a primeira instalação de armazenamento de energia do ar líquido e tem projetos em andamento com potência de 50 MW/250 MWh [15] e [36]

### 3.6 Bateria eletroquímica

As baterias eletroquímicas fazem a conversão de energia química em energia elétrica com a movimentação de *elétrons* fornecendo assim, uma corrente contínua. De forma geral essas baterias são compostas por três componentes um ânodo, um cátodo e um eletrólito para transportar os íons elétricos entre as placas positiva e negativa. Quando uma substância doa um *elétron* recebe o nome de oxidação (ânodo) e quando recebe um *elétron* é chamada de redução (cátodo). Atualmente existem dois métodos para armazenar a energia podendo ser no eletrólito (baterias de fluxo) ou nos elétrodos (baterias secundárias). [17]

## 4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA USANDO AR-COMPRI-MIDO

Quando falamos de armazenamento de energia usando ar comprimido é possível pensar em várias formas de realizá-lo. Na física a conservação de energia é um conceito fundamental, juntamente com a conservação do momento e a conservação da massa.

A energia não é criada nem destruída, a quantidade de energia permanece constante dentro de um certo domínio de sistema. A energia potencial pode ser convertida em energia cinética e essa possibilidade de conversão de energia, de uma forma para outra, faz com que seja possível, a concretização de uma ideia com a de fazer uma bateria de ar.

Neste capítulo vou abordar diferentes meios e métodos já praticados pelo mercado mostrando o que existe no quesito de armazenamento de energia usando ar-comprimido para aplicações de despacho de eletricidade. Os sistemas de armazenamento de energia usando ar-comprimido podem ser divididos em três estágios. A compressão, armazenamento e expansão.



Figura 4.1: Estágios de sistemas de armazenamento de energia usando ar-comprimido. Fonte: Paulo Fontes, Moritz Raible (2016).

**Compressão:** O principal objetivo neste processo é comprimir o ar que será armazenado, aumentando sua pressão. O processo de compressão pode ser feito usando vários estágios, o que aumenta a eficiência antes que o ar alcance o armazenamento. A compressão pode ser definida como adiabática ou isotérmica (termodinâmica) [17].

A eficiência do compressor depende da relação de pressão entre a entrada e a saída. Quando a razão de pressão varia durante o estágio de compressão, isso criará algumas dificuldades, enquanto a eficiência ideal deve ser determinada durante o estágio de compressão quando a razão de pressão é constante. Durante esta fase de compressão, haverá conversão de energia mecânica em energia interna do ar devido à alta pressão e alta temperatura. [37]

**Armazenamento:** O objetivo do processo é armazenar grandes quantidades de ar em alta pressão. O armazenamento pode ser realizado em três sistemas diferentes, isobárico (pressão constante), isocórico (volume constante) ou criogênico (ar líquido). O armazenamento também pode ser construído no subsolo ou acima do solo, dependendo das necessidades e requisitos. [38] e [17]

**Expansão:** após a compressão e armazenamento do ar, a energia é extraída pela passagem do ar comprimido pelo expansor. A energia térmica gerada durante a compressão pode ser usada na expansão para que nenhum calor seja adicionado ao sistema. Alguns sistemas trocam o calor com o ambiente na hora da compressão e injetam calor com a queima de gás natural na expansão.

O fornecimento de calor na hora da expansão é importante para que o ar não reduza seu tamanho e entregue menos trabalho, por isso que algumas usinas precisam queimar combustível durante a expansão. O gás natural é o combustível mais utilizado [8].

O expansor deve ser conectado a um gerador para extrair energia elétrica, e esta ligação pode ser feita em diferentes maneiras de acordo com as necessidades e requisitos [39]. Existe uma exceção para o sistema de expansão dentro da água, onde o que é conectado ao gerador de energia elétrica é uma turbina hidráulica.

De uma forma ou outra, não importa a tecnologia aplicada ela sempre vai estar presa dentro de um sistema fechado, onde as variáveis (temperatura, volume e pressão) resultam em diferentes condições finais. [39] A figura 4.2 mostra um diagrama com as diferentes tecnologias dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão.



Figura 4.2: Diagrama com as diferentes tecnologias dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão. Adaptado de: Carlos Roberto Rocha, Marco Aurélio Guimarães Monteiro (2014); Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa (2019).

Com relação aos nomes dados na literatura estrangeira é definido/ classificado como adiabático com base em princípios termodinâmicos e se o combustível é necessário ou não. Exemplo disso é a diferença do (AA-CAES) *Advanced*

*Adiabatic Compressed Air Energy Storage* para o (D-CAES) *Diabatic compressed air energy storage*, onde, o que separa uma definição da outra, é o aproveitamento da energia térmica do ar comprimido. [40, 17] Na (AA-CAES) o sistema armazena a energia potencial térmica do ar comprimido separadamente em um fluido ou outro, depois, libera esse calor na expansão. Já o (D-CAES) desperdiça essa energia térmica trocando calor com o ambiente, na expansão queima combustível para aquecer ar. [8, 17, 40]

#### 4.1 Sistema diabático:

Para exemplificar como um sistema diabático funciona, vou usar o exemplo da usina de *McIntosh* que está em operação desde ano 1991. Essa usina armazena o ar comprimido em uma caverna salina a uma profundidade de 450 m da superfície, com uma pressão de até 74 atmosferas, com a capacidade de armazenamento de mais de 500 mil metros cúbicos.

Com capacidade de geração de 110 MW por 26 horas de operação, ela queima o gás natural/ óleo dentro de câmaras de combustão para aquecer o ar na expansão. O calor da queima do combustível é aproveitado em um recuperador de calor, onde o ar que está saindo da caverna, na temperatura da caverna, é forçado a passar por esse recuperador. Só isso, já reduziu em 25% do uso desses combustíveis. [40, 41] De acordo com a fonte [42] as CAES diabáticas não são precisamente CAES por usarem ~50% de combustível (gás natural) para converter o ar comprimido em eletricidade. Para a usina de *McIntosh* para cada 2,7 MWh de eletricidade entregue para rede, 1,9 MWh são eletricidade e 3,2 MWh são de energia térmica.

(1), (2), (3), (4): compressores; (5): Motor/ Gerador; (6), (8): Expansores; (7), (14): Câmaras de combustão; (9), (10), (11), (12), (13): *aftercooler* e resfriadores; (15): Caverna salina; (16): Recuperador de calor.

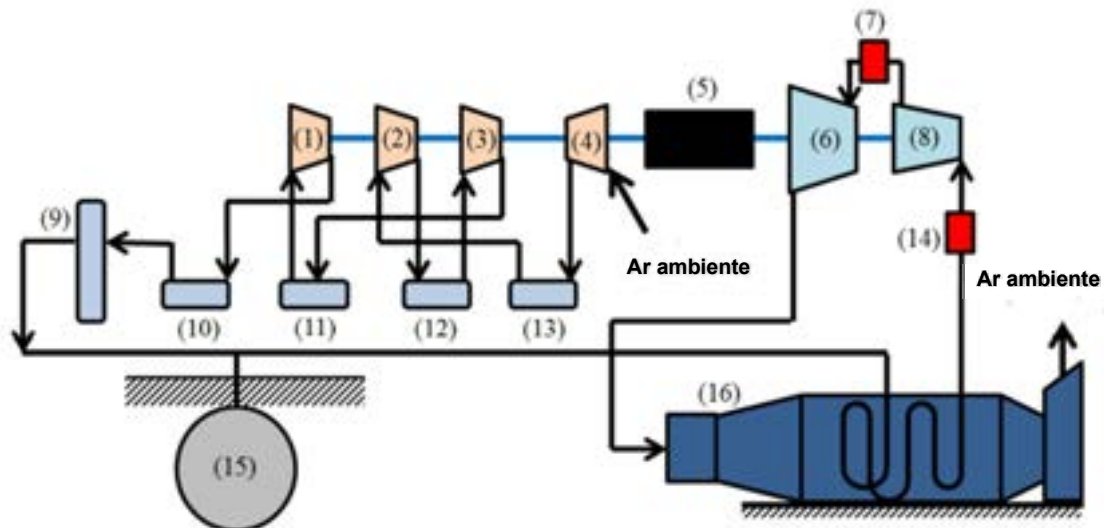


Figura 4.3: Esquemático do sistema diabático da usina de *McIntosh*. Fonte: Saniel Dong Lim (2013).



Figura 4.4: Diagrama dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão da usina de *McIntosh*. Adaptado de: Carlos Roberto Rocha, Marco Aurélio Guimarães Monteiro (2014); Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa (2019).

Em um sistema diabático o calor proveniente da compressão do ar é desperdiçado para o ambiente com trocadores de calor para aumentar a eficiência do compressor e reduzir o consumo de energia elétrica. Muitas vezes

o ar comprimido armazenado deve estar em baixas temperaturas, a fim de reduzir o estresse térmico na parede do recipiente (caverna).

Na termodinâmica temos o princípio do equilíbrio térmico, onde a matéria sempre alcança uma igualdade devido a transferência de calor entre o corpo quente para o corpo mais frio, até chegar a mesma quantidade de energia térmica. Essa transferência de energia térmica para alcançar o equilíbrio, no caso do recipiente (caverna) estar com uma temperatura menor do que o ar que está sendo introduzido sob pressão, faz com que o ar comprimido reduza a pressão devido a troca de calor com a caverna. [38]

Quando o equilíbrio térmico é alcançado, o ar quente para de transferir calor para as paredes do recipiente. A primeira lei da termodinâmica trata da relação entre calor (Q), energia (E) e trabalho (W). Conforme a equação. [4.1.]

$$E_2 - E_1 = Q - W \quad [4.1.]$$

A energia interna [E] é só uma forma de energia dentre outras formas, como a energia potencial gravitacional e a energia cinética [e]. Da mesma forma que energia potencial pode ser armazenada, por ter direção e sentido bem definidos, a energia interna também pode, se, for armazenada dentro de um sistema que contenha essa energia. [43] Quando temos uma variação de energia interna (E) é representado como ( $\Delta U$ ) conforme equação [4.2.]

$$\Delta U = Q - W \quad [4.2.]$$

#### **4.2 Sistema adiabático avançado:**

Para o sistema adiabático avançado vou usar o exemplo da empresa *Hydrostor* de acordo com a empresa, em 2019, foi instalado o primeiro sistema avançado de armazenamento de ar para produção de energia, chamado: *Advanced Compressed Air Energy Storage (A-CAES)*, localizado no Canadá, no Estado de Ontário, na cidade de *Goderich*. Totalmente livre de combustível, a usina produz zero emissões de gases de efeito estufa e contribui para uma rede elétrica mais

limpa, mais acessível e mais flexível.

No site oficial da empresa, foi divulgado a capacidade instalada de mais de 10 mega watt hora (MWh). Quando em carga, a bateria de ar consome 2,2 MW e na descarga 1,75 MW, com eficiência entre 60 - 65%. Essa usina se aproveita de uma caverna salina para armazenar o ar comprimido. Na compressão o calor é armazenado e reutilizado na expansão aumentando a eficiência do sistema como um todo. O que define e ou separa essa usina das outras é o aproveitamento da energia térmica do ar comprimido no momento da compressão. [38] A figura 4.5 mostra um esquemático de um sistema adiabático avançado de armazenamento de energia com ar comprimido.

(1) e (15): Motor e gerador; (2) e (3): Compressores; (4) e (7): Arrefecimento do ar; (9) e (12): Aquecimento do ar; (5) e (14): Misturadores; (6): Reservatório de fluido quente; (13): Reservatório de fluido frio; (8): Armazenamento de ar comprimido; (10) e (11): Expansores.

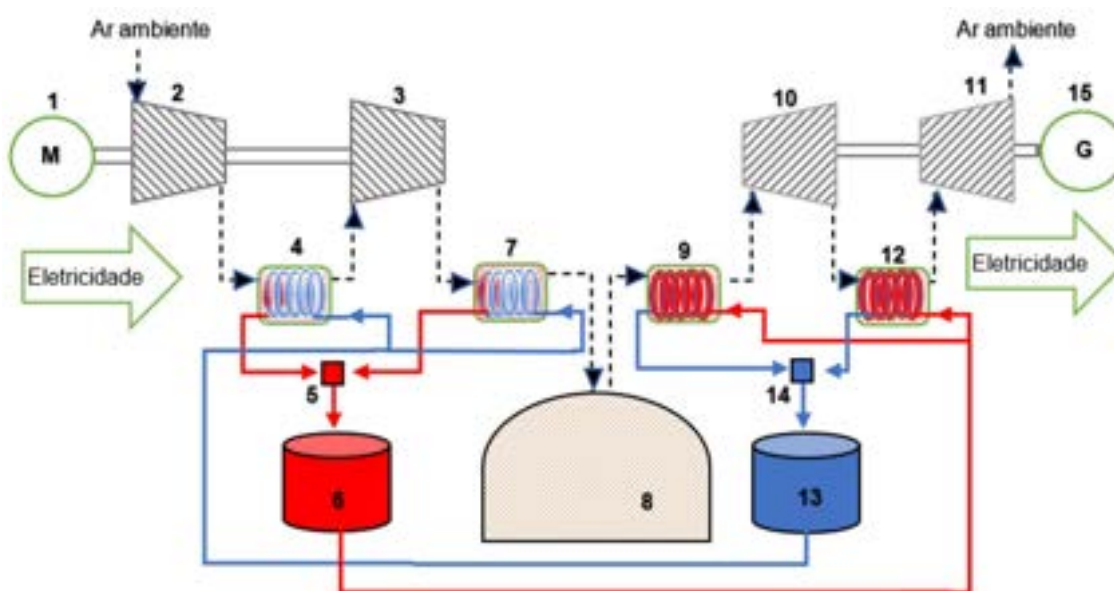


Figura 4.5: Esquemático de um sistema adiabático avançado de armazenamento de energia com ar comprimido. Adaptação de: Saniel Dong Lim (2013)



Figura 4.6: Diagrama dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão de um sistema adiabático avançado de armazenamento de energia com ar comprimido.

Adaptado de: Carlos Roberto Rocha, Marco Aurélio Guimarães Monteiro (2014); Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa (2019)

Em um processo adiabático a transferência de energia em forma de calor não existe. Isso não significa que a temperatura seja constante, mais sim, que a transferência de calor não sai, nem entra no sistema (conceito da termodinâmica que delimita a fronteira).

A primeira lei da termodinâmica trata da relação entre calor ( $Q$ ), energia interna ( $E$ ) e trabalho ( $W$ ). Conforme a equação. [4.1.] No sistema adiabático, onde o sistema não ganha nem perde calor, o ( $Q$ ) é igual a zero. Fazendo com que a variação da energia interna ( $\Delta U$ ) seja igual ao trabalho ( $W$ ) conforme equação [4.4.]

$$Q = 0 \quad [4.3.]$$

$$\Delta U = W \quad [4.4.]$$

### 4.3 Sistema isotérmico:

O sistema Isotérmico resolve muitas limitações do sistema diabático e adiabático avançado, como: vários estágios de compressores, arrefecimento do ar e aquecimento do ar na expansão. [38] O conceito de um sistema Isotérmico está representado na figura 4.7 As vantagens de um sistema isotérmico estão na compressão e na expansão, onde a temperatura é mantida constante, fazendo com que ele se sobressai em relação aos outros sistemas disponíveis chegando a uma eficiência de até 80%. [44] A compressão se dá em um processo isotérmico, devido a dois motivos: primeiro, as dimensões do tanque e, segundo, em razão da velocidade lenta da compressão. [44] Devido a dimensão do tanque, mais área de água entra em contato com a área ar, dessa maneira, a superfície da água funciona como um dissipador de calor mantendo a temperatura constante. Dessa forma, há uma compressão de ar em velocidade lenta, em que as moléculas de ar não se movimentam tão depressa, como fariam em um método convencional de compressão. Esses dois motivos são a chave para que não haja geração de calor e conseqüentemente a perda de energia no sistema.

(1): Bomba de água; (2): Turbina hidráulica e gerador; (3): Reservatório de água aberto, (4): Reservatório de água fechado; (5): Ar comprimido; (6), (7) e (8): Válvulas de controle.

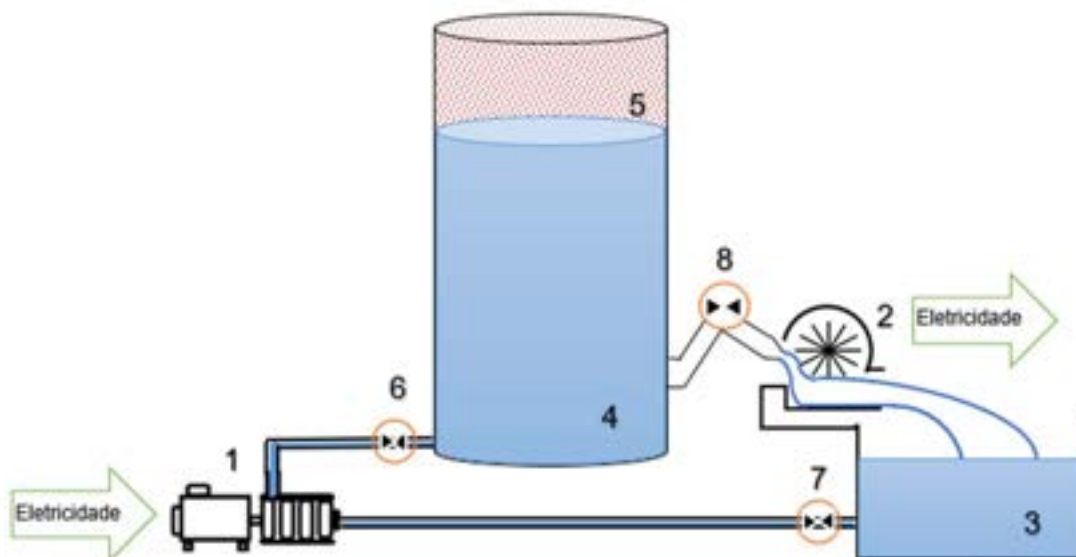


Figura 4.7: Esquemático de um sistema isotérmico de armazenamento de energia com ar comprimido. Adaptado da *Augwind Energy Tech* (2022).

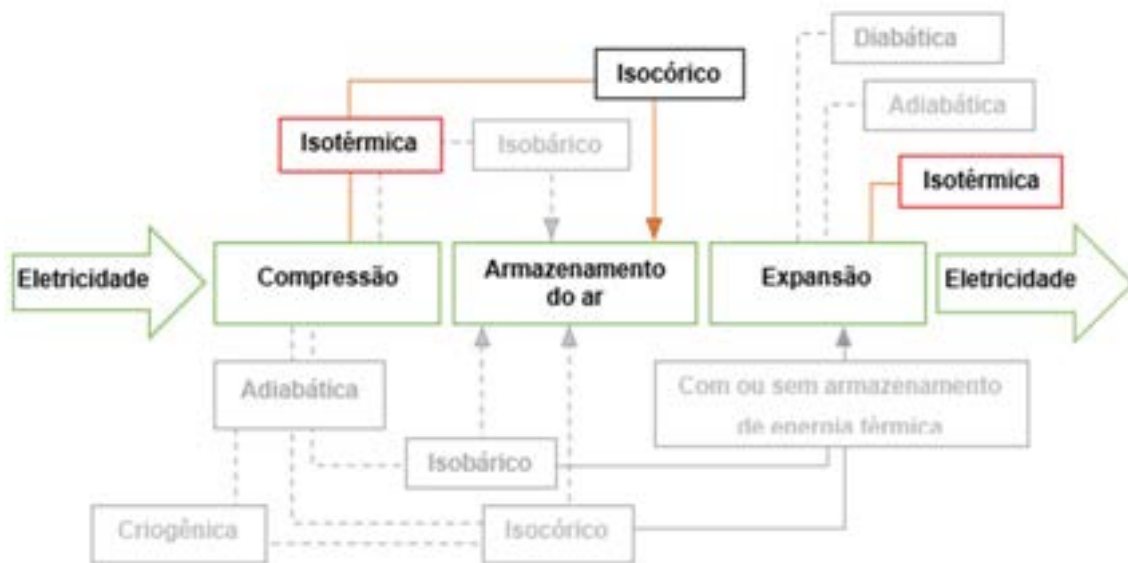


Figura 4.8: Diagrama dos processos empregados na compressão, armazenamento e expansão de um sistema isotérmico de armazenamento de energia com ar comprimido. Carlos Roberto Rocha, Marco Aurélio Guimarães Monteiro (2014); Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa (2019); *Energy Storage Air battery* (2022).

De acordo com a primeira lei da termodinâmica quando a variação da energia interna é nula, ou seja, a variação ( $E_2 - E_1$ ) representada como ( $\Delta U$ ) é igual a zero, então o trabalho ( $W$ ) é igual ao calor ( $Q$ ). Como mostra a equação [4.5.] e [4.6.].

$$\Delta U = 0 = Q - W \quad [4.5.]$$

$$Q = W \quad [4.6.]$$

Na teoria cinética do gás a temperatura está relacionada com o movimento das moléculas, quanto maior for a temperatura maior será o movimento. Na teoria do calor (latente e sensível) o movimento das moléculas do ar comprimido é absorvido pela água em forma de calor sensível, devido a água comprimida estar em sua forma liquidada e não em uma mudança de fase no momento da compressão do ar.

Mesmo que fisicamente existe uma variação de temperatura, e isso pode ser provado pela teoria cinética do gás, esses sistemas são considerados como isotérmicos devido a variação ser pequena. Embora os líquidos sejam considerados como incompressíveis na literatura, sabemos que, incompressível é uma relação teórica que leva em conta a densidade e o volume específico de forma constantes, sendo desprezado pequenas variações. [45]

A água funciona como um pistão hidráulico apertando as moléculas do ar, forçando-as a se agruparem mais próximas umas das outras e ao mesmo tempo mantendo a temperatura constante. [44]

#### **4.4 Sistema com ar líquido (criogênico):**

A grande vantagem do ar líquido em comparação com o ar em estado natural é seu volume, que diminui consideravelmente com a mudança de estado de gasoso para líquido. Menos volume significa menos espaço para armazenamento e maior densidade de energia.

Como o ar é composto por diferentes gases, eles têm pontos de ebulição diferentes. O ponto de ebulição do oxigênio está em  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o ponto de ebulição do nitrogênio está em  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  à pressão ambiente. Em 1895 *Carl von Linde* desenvolveu um método técnico para separar gases que permite a separação de gases atmosféricos como oxigênio, nitrogênio e argônio em grandes quantidades.

O processo *Linde - Hampson* é baseado no efeito *Joule Thomson* (fluxo de gás através de uma restrição experimenta uma queda de temperatura junto com a queda de pressão) de gases reais. Com este processo é possível liquefazer o ar constantemente. [36, 46 e 47]

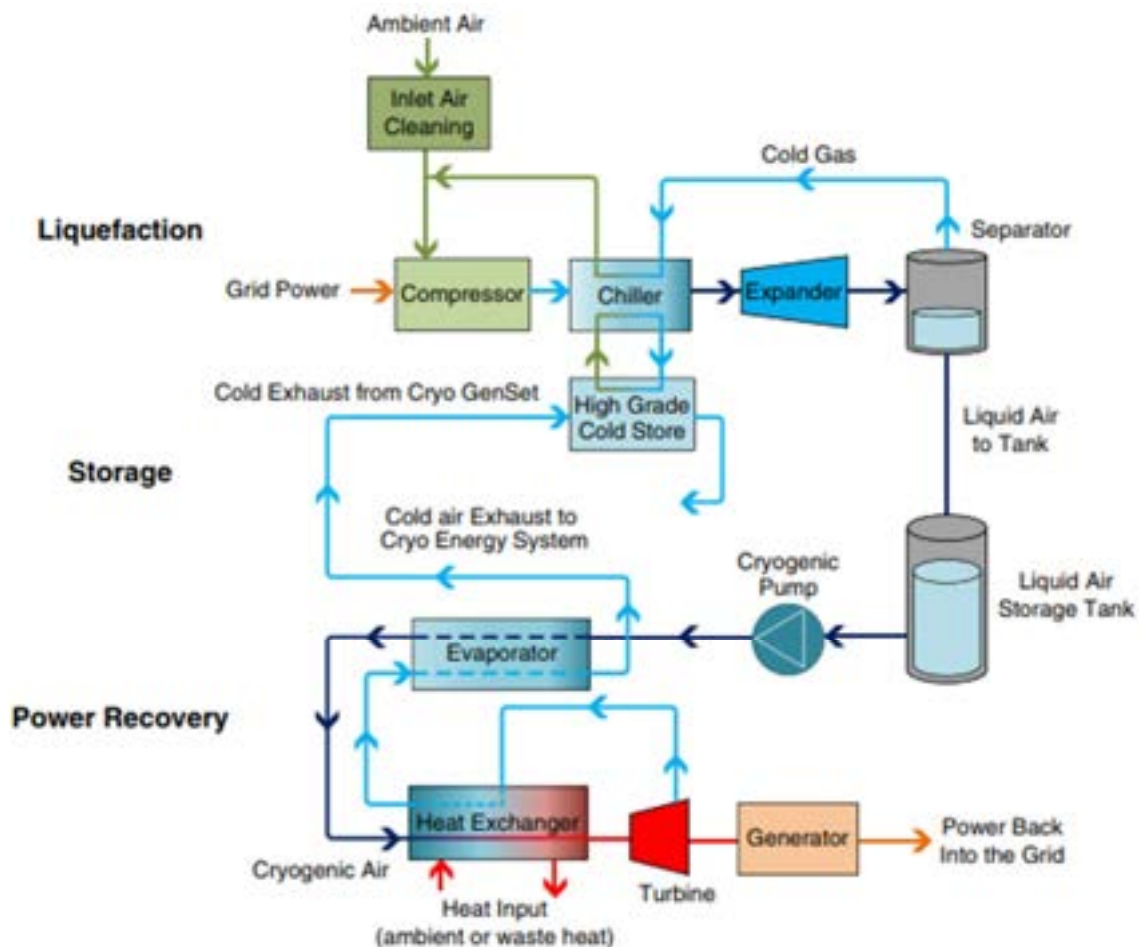


Figura 4.9: Layout esquemático de uma planta LAES. Fonte: Rafi d Al-Khoury & Jochen Bundschuh (2014).

#### 4.5 Processos de compressão, armazenamento e expansão

Embora o conceito de compressão seja simples, existe uma dinâmica complexa para construção de uma bateria de ar. Muitas tecnologias usam a compressão em mais de um estágio com dissipadores de calor. Outras tecnologias armazenam o calor gerado em um fluido na hora da compressão, e passam esse fluido aquecido em um trocador de calor para aquecer o ar na hora da expansão. [39] Outras tecnologias já descartam completamente os compressores, e vão com a solução de bombas de água de alta pressão para não ter o problema da temperatura (*Augwind Energy Tech*).

De uma forma ou outra, não importa a tecnologia aplicada ela sempre vai estar presa dentro de um sistema fechado, onde as variáveis (temperatura, volume e

pressão) resultam em diferentes condições finais. [39] Na tabela 4.1 é possível ver os processos empregados por empresas diferentes na compressão, arrefecimento do ar, armazenamento do ar, armazenamento do calor, aquecimento do ar e expansão.


























Empresa	Compressão	Arrefecimento do ar	Armazenamento do ar	Armazenamento do calor	Aquecimento do ar	Expansão
<b>Augwind Energy Tech</b>	Bomba de água (Isotérmico) 		Reservatório superfície (Isobárico) 			Turbina de água (Isotérmico) 
<b>E.N Kraftwerke</b>	Compressor (Adiabático) 	Perdas p/ ambiente (Diabático) 	Mina Subterrânea (Isocórico) 		Câmara de combustão (Diabático) 	Turbina (Adiabática) 
<b>Hydrostor</b>	Compressor (Adiabático) 	Permutador de calor (Isobárico) 	Mina Subterrânea (Isocórico) 	Fluído de armazenamento	Permutador de calor (Isobárico) 	Turbina (Adiabática) 
<b>Highview Power</b>	Compressor (Adiabático) 	Expansão 	Reservatório superfície (Isobárico e criogênico)  	Fluído de armazenamento	Injeção de ar (Diabático) 	Turbina (Adiabática) 
<b>Processo</b>	Isotérmico	Isobárico	Isocórico ou isovolumétrica	Diabático	Adiabático	Criogênico
						
<b>Descrição</b>	Temperatura constante	Pressão constante	Volume constante	Transferência de calor existe	Transferência de calor <u>não</u> existe	Temperaturas menores que -150 C°

Tabela 4.1 Processos de compressão, armazenamento e expansão. Adaptado de: Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa (2019)

#### 4.6 Dois ciclos básicos de um sistema CAES

De acordo com a fonte [49], existem dois ciclos básicas (termodinâmica) para os processos de compressão, armazenamento e expansão de um sistema de armazenamento de energia com ar comprimido. São o ciclo *Brayton* e ciclo *Ericsson*.

##### **Ciclo *Brayton***

Este ciclo envolve um processo quase adiabático com a compressão, retenção do calor e expansão. O armazenamento do calor no momento da compressão é tipicamente separado devido ao ar frio ocupar um volume menor. O calor pode ser armazenado em materiais sólidos ou fluidos à pressão normal (ambiente).

Quando a energia for demandada, o ar comprimido é liberado e aquecido pelo calor armazenado. A energia adquirida com a expansão do ar é utilizada para acionar turbinas para gerar eletricidade. Ciclo de *Brayton* ideal sem o aquecimento externo apresenta 100% de eficiência (compressão e expansão adiabática sem perdas de pressão e calor).

Na prática, no entanto, depende dos compressores e expansores a eficiência final, perdas de pressão nas tubulações e perda de calor devido à transferência de calor para o ambiente e armazenamento de calor, a eficiência pode reduzir para cerca de 70% a 80%.

##### **Ciclo *Ericsson***

O ciclo *Ericsson* é similar ao ciclo *Brayton*, porém com a diferença de incorporação de um regenerador e a utilização de calor externo. Esse ciclo envolve um processo quase isotérmico na compressão do ar, onde, o calor do ar comprimido é continuamente transferido para o ambiente. O armazenamento do calor não é necessário nesse ciclo. Com a transferência do calor para o ambiente, com trocadores de calor e resfriadores a quantidade de eletricidade necessária para comprimir o ar é reduzida.

Quando a energia for demandada, o ar comprimido é liberado e aquecido pelo

próprio ambiente. Desconsiderando todas as perdas, o processo isotérmico de expansão entregaria para o sistema a mesma energia que foi usada na compressão isotérmica, fazendo com que o processo tenha uma eficiência de 100%. No entanto, no cenário real o processo se utiliza de uma fonte extra de calor e a eficiência da conversão desse calor é limitado pela eficiência do ciclo de *Carnot*. Na prática, sempre há perdas de energia que reduz a eficiência desse processo. Exemplo disso é a usina *McIntosh* que chega a uma eficiência de 54%.

#### 4.7 Duas variações do ciclo *Claude* para sistema LAES

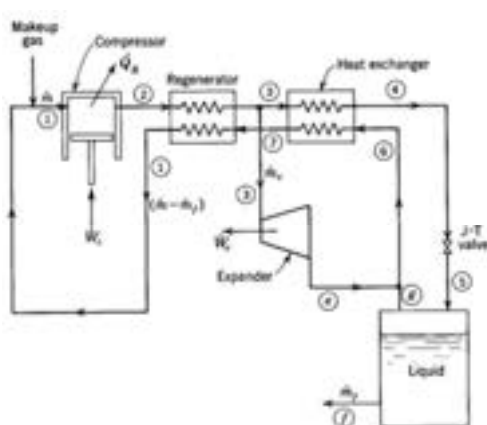
De acordo com a fonte [47], para liquefação do ar temos duas variações do ciclo *Claude*. O ciclo *Kapitza* e o ciclo *Heylandt*. O ciclo *Claude* é só parte do processo de um sistema de ar líquido que representa a compressão até a liquefação do ar, não inclui o armazenamento nem a expansão.

##### Ciclo *Kapitza*

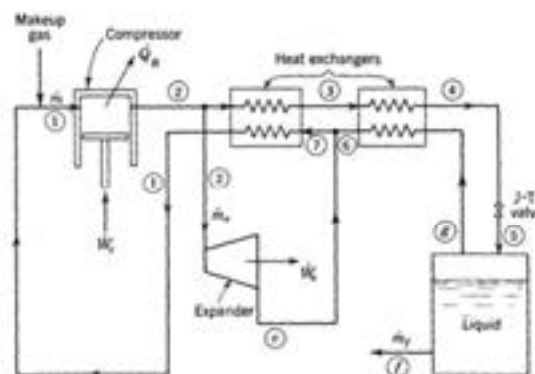
- Pressão é menor (7 ATM) para liquefazer o ar.
- Usa um regenerador para troca de calor.

##### Ciclo *Heylandt*

- Maior pressão (200 ATM) para liquefazer o ar.
- Usa um expansor que trabalha na temperatura ambiente.



(a)



(b)

Figura 4.10: Variações do ciclo *Claude*. (a) Ciclo *Kapitza*; (b) Ciclo *Heylandt*. Fonte: U.S. Particle Accelerator School Education in Beam Physics and Accelerator Technology.

## 4.8 Pressão e temperatura

Uma propriedade importante de qualquer gás é a sua pressão. Toda matéria é feita de átomos, prótons e nêutrons. Sob condições normais, a matéria existe como um sólido, um líquido ou um gás. O oxigênio e o nitrogênio, por exemplo, são os principais componentes do ar na terra, existem em forma de gás e ocorrem na natureza como moléculas diatômicas (dois átomos) [50].

Entender o que é a pressão e como ela funciona é fundamental para a compreensão de um sistema de bateria de ar. As forças de pressão têm algumas qualidades únicas em comparação com as forças gravitacionais ou mecânicas.

Imagine um pistão, uma força  $[F]$  é aplicada comprimindo-o, apertando o ar contido dentro dele. A força de pressão dentro do pistão se opõe à força aplicada de acordo com a terceira lei de Newton (ação e reação). A pressão escalar é igual à força externa dividida pela área  $[A]$  do topo do pistão. Dentro do pistão, o ar ganha uma pressão que atua em todas as direções. Desta forma, a pressão empurra o fundo e as laterais do pistão [50].

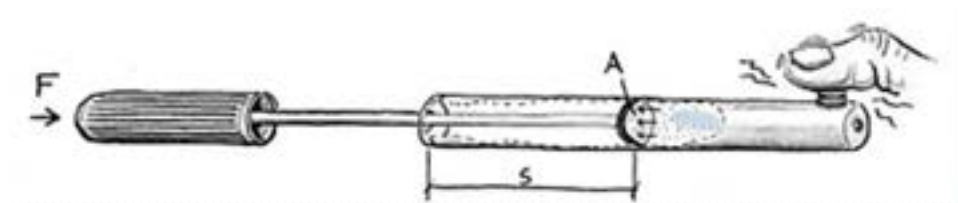


Figura 4.11: Qualidade única de pressão. Força atua em todas as direções. Fonte: Paulo Fontes, Moritz Raible (2016).

Veja que essa força de pressão é bem diferente da força mecânica, se o ar fosse substituído por um sólido, não haveria forças aplicadas nas laterais do pistão, a força seria transmitida diretamente para o fundo do pistão. Mas em um gás, como as moléculas são livres para se mover e colidir umas com as outras, uma força aplicada na direção vertical causa forças na direção horizontal. Isso porque, a pressão é uma quantidade escalar. (magnitude, sem direção) [50].

Existem duas formas de definir a pressão, a definição molecular (micro) e a definição de macro escala. Na definição molecular, reina a teoria cinética dos gases, onde são levados em conta as moléculas de um gás e suas propriedades físicas de massa, momento e energia. Já na definição macro escala, a pressão é uma variável de estado de um gás, como a temperatura e a densidade. Tanto a macro e micro escala são apenas duas visões da mesma coisa [50].

A mudança na pressão durante qualquer processo é governada pelas leis da termodinâmica. A primeira lei da termodinâmica trata da relação entre calor, energia e trabalho. Na física aprendemos que o trabalho = força x distância. Já para um gás, o trabalho é o produto da pressão e o volume durante uma variação de volume. Em geral, durante a compressão de um gás tanto o volume quanto a pressão mudam, portanto é mais adequado a definição do trabalho de um gás usando uma integral ou uma soma da variação da pressão vezes a mudança do volume no estado inicial e final [50] e [51].

$$W = - \int_{P_1}^{P_2} p \, dv \quad [4.7.]$$

Uma propriedade importante de um gás ideal é a capacidade de aumentar ou diminuir o seu tamanho conforme a temperatura. Para provar que essa propriedade existe, é bem simples. Pegue dois balões de festa iguais, encha os dois balões com o mesmo tamanho. Em seguida coloque um deles dentro do freezer por 10 minutos e o outro para fora, depois, retire o que estava no freezer e compare o tamanho dos dois. O balão do freezer terá diminuído de tamanho.

Um exemplo clássico desse princípio é o que acontece com cilindros de mergulho expostos a radiação solar, onde a pressão interna do ar aumenta conforme a transferência de calor para o cilindro, e o inverso acontece quando o mergulhador entra na água mais fria, reduzindo a temperatura do cilindro, que, por sua vez, troca calor com o ar comprimido. Entrando assim, em um novo equilíbrio e admitindo uma nova pressão interna. A equação [4.8.] expressa como a relação entre a pressão (P), volume (V) e temperatura (T) estão

interligados de forma proporcional em um intervalo de tempo.

$$\frac{P1 * V1}{T1} = \frac{P2 * V2}{T2} \quad [4.8.]$$

#### 4.9 Temperatura, calor e movimento

Em um gás ideal a temperatura (na teoria cinética do gás) é uma média da energia cinética, onde as moléculas de um gás e suas propriedades físicas de massa, momento e energia cinética são calculados. Em outras palavras, a temperatura de um gás ideal está relacionada com o movimento das moléculas, quanto maior for a temperatura maior será o movimento. [52] A transferência do calor de um gás na teoria cinética é expressa pela equação [4.9.]. Onde: energia cinética ( $e$ ); velocidade ( $v$ ); massa ( $m$ ).

$$e = \frac{mv^2}{2} \quad [4.9.]$$

Essa informação da temperatura estar relacionado ao movimento molecular do gás é fundamental para entender por que um sistema de compressor é classificado como adiabático e não diabático. A energia interna  $[E]$  é só uma forma de energia dentre as outras formas, como a energia potencial gravitacional e a energia cinética  $[e]$ . Da mesma forma que energia potencial pode ser armazenada, por ter direção e sentido bem definidos, a energia interna também pode, se, for armazenada dentro de um sistema que contenha essa energia. [43] A primeira lei da termodinâmica trata da relação entre calor  $[Q]$ , energia  $[E]$  e trabalho  $[W]$ .

$$E2 - E1 = Q - W \quad [4.10.]$$

Normalmente, modelamos o ar como um gás uniforme (sem variação ou flutuação) com propriedades que são calculadas a partir de todos os

componentes individuais. No século XIX o cientista John Dalton que propôs uma lei empírica, que diz o seguinte: “A pressão total exercida por uma mistura de gases é igual à soma das pressões de cada um dos diferentes gases que compõem a mistura, com cada gás agindo como se estivesse presente sozinho e ocupasse o total volume.” [53] É mais fácil entender a lei de Dalton com um exemplo de um recipiente a pressão de uma atmosfera (ATM). Se o recipiente for enchido somente com o gás nitrogênio a um ATM ele teria exatamente uma atmosfera. Se o mesmo recipiente, a uma pressão de um ATM fosse enchido com ar seco, a pressão parcial de todos os componentes do gás contidos dentro do ar contribuiria para a pressão total parcial, como mostra a tabela 4.2. Se no mesmo recipiente aumentássemos a pressão para 20 ATM, a pressão parcial dos componentes iriam refletir o incremento de pressão na mesma proporção. Na tabela 4.2 mostra a pressão parcial com 1, 20 e 40 atmosferas. [53] Essa informação de proporção tem mais relevância na aplicação de sistemas que usam ar líquido, onde é necessário separar os componentes do ar. Também tem relevância para avanços em tecnologias de sistemas de ar comprimido, onde a quantidade de algum componente no ar a uma dada pressão faça uma melhoria na eficiência do sistema.

<b>Gás</b>	Porcentagem do Componentes dentro do ar seco	Pressão Parcial em 1 ATM	Pressão Parcial em 20 ATM	Pressão Parcial em 40 ATM
<b>N<sub>2</sub></b>	78,08	0,7808	15,6200	31,2320
<b>O<sub>2</sub></b>	20,95	0,2095	4,1900	8,3800
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,03	0,0003	0,0060	0,0120
<b>Outros</b>	0,94	0,0094	0,1880	0,3760
<b>Total</b>		<b>1</b>	<b>20</b>	<b>40</b>

Tabela 4.2 Pressão parcial com 1, 20 e 40 atmosferas. Como a quantidade de um componente aumenta proporcionalmente em relação a pressão. Adaptação de: *U.S. Navy Diving Manual* (2016)

#### 4.10 Compressão e expansão do ar

A compressão é a variação positiva da pressão e a expansão é a variação negativa da pressão. De forma bem prática, quando comprimimos o ar aumentamos sua densidade. Em outras palavras, mais massa de ar cabe dentro desse volume. Quando a massa de ar aumenta dentro de um volume fixo, seu peso também aumenta.



Figura 4.12: Compressão e expansão, forma da variação positiva e negativa da pressão.

Adaptação de: Melissa Soares Caetano.

Durante a compressão o ar aumenta sua densidade em um intervalo de tempo curto, com isso, ele aquece. Este comportamento muitas vezes indesejável dos gases baseia-se na 1ª lei da termodinâmica (lei da conservação da energia). A equação 4.11 mostra como a soma do calor (Q) e trabalho (W) resultam na energia interna (U) de um gás.

$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q \quad [4.11.]$$

A energia interna (U) não pode ser definida como um valor absoluto, portanto, apenas as mudanças de uma quantidade são frequentemente representadas pelos processos da termodinâmica.

A equação de estado para um gás descreve a relação entre a pressão, volume e temperatura. O lado esquerdo da equação tem a dimensão da energia como trabalho, o lado direito como calor. Assim, esta equação de estado também expressa a igualdade de trabalho e calor. Se aquecemos o gás de modo que sua pressão e seu volume mudem, por outro lado, a temperatura muda com uma mudança de pressão ou volume. Onde: pressão (p); volume (V); massa (m); constante do ar (R); temperatura (T). [55]

$$pV = mRT \quad [4.12.]$$

Se nenhum calor for adicionado ou removido de um gás durante a compressão ou expansão, esse processo é chamado de adiabático (transferência de calor não existe). A mudança de temperatura que ocorre na compressão ou na expansão não é linearmente dependente da pressão, mas sim de uma função da capacidade calorífica específica a pressão constante ( $c_p$ ) e a capacidade calorífica específica a volume constante ( $c_v$ ). Essa relação demonstrada na equação 4.13, resulta em um expoente isentrópico chamado kappa ( $k$ ), representa a função do número de átomos na molécula. [55] Para um gás diabático como o ar o  $k = 1,4$ .

$$k = c_p / c_v \quad [4.13.]$$

A equação 4.14 representa o acréscimo de temperatura com cada incremento de compressão ou expansão, onde o (T) temperatura em *Kelvin*, (p) pressão, (k) expoente isentrópico.

$$T_2 = T_1 \left[ \frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{(k-1)}{k}} \quad [4.14.]$$

Desta forma, para um aumento de pressão de 0,1 bar para 1 bar, a mudança de temperatura é a mesma de 1 a 10 bar. Conforme demonstrado na figura xx abaixo

para um gás ideal diatômico (molécula formada por 2 átomos) e também se aplicaria ao ar (a temperatura inicial  $T_1$  é de 300 K). Em uma relação de compressão de 100, a temperatura aumentaria em aproximadamente 800 °C.

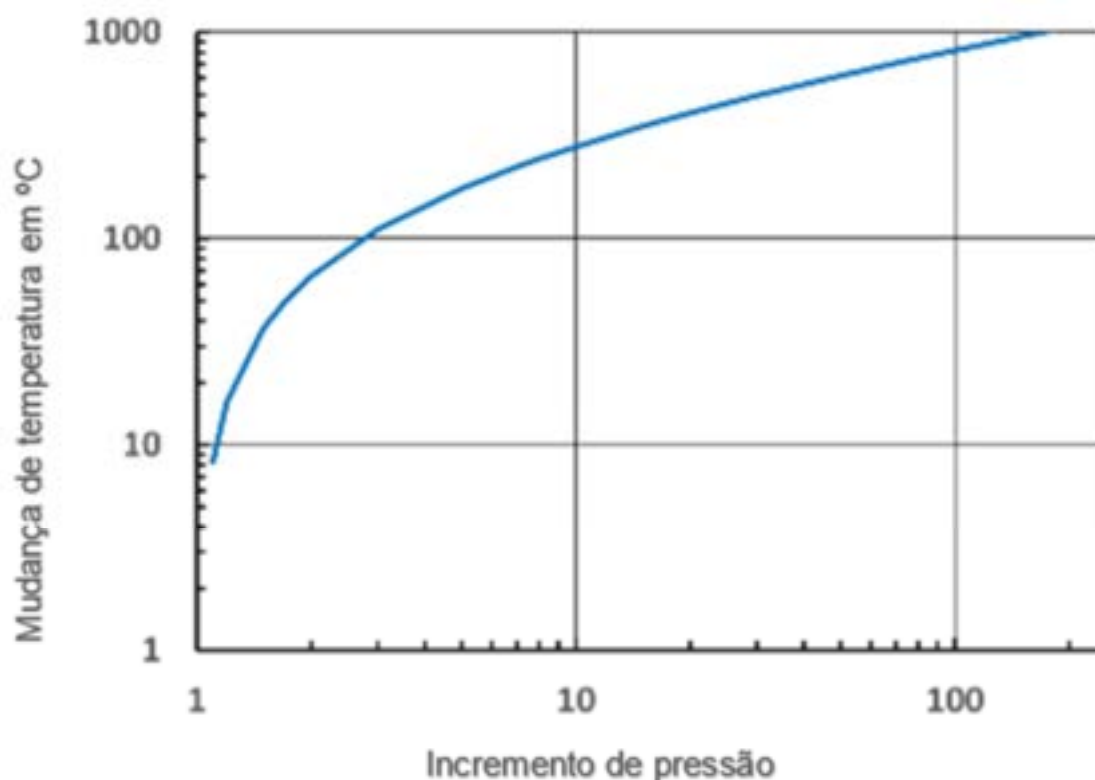


Figura 4.13: Mudança de temperatura durante processo adiabático com função de incremento de pressão. Adaptação de fonte: *Wolfgang Littmann (2022)*

Da mesma forma que a temperatura aumenta conforme o incremento de pressão em um processo adiabático, o decréscimo da pressão reduz a temperatura na mesma proporção, conforme equação [4.14.]

#### 4.11 Recipientes de armazenamento

No tocante a reservatórios de grande porte para o ar comprimido, as cavernas salinas são o método comprovado até o momento. Outras formações rochosas foram analisadas e até testadas, porém não foram implementadas.

- Usina de Huntorf (Alemanha) → Caverna Salina
- Usina de McIntosh (USA) → Caverna Salina
- Usina de Goderich (Canadá) → Caverna Salina
- Usina de Jintan (China) → Caverna Salina

Para armazenar grandes quantidades de energia disponível durante períodos de excesso de vento ou sol, reservatórios subterrâneos podem potencialmente fornecer a capacidade de armazenamento necessária para igualar a oferta com a demanda.

Existe uma competição por formações de armazenamento adequadas, pois uma formação de armazenamento pode ser adequada para vários usos, exemplo disso são as cavernas salinas que armazenam gás natural. [57]

Com relação ao território Brasileiro dois Estados (Alagoas e Espírito Santo) apresentam possibilidades de instalação de um sistema CAES de grande porte, por terem em seu território formações de evaporitos (descobertos até o momento) e proximidade do mar (menor custo de escavação da caverna).

No Norte do Estado do Espírito Santo foram leiloadas 11 áreas com estimativa de 12 bilhões de toneladas de sal-gema, o leilão foi para fase de pesquisa. [58] No Estado de Alagoas, Maceió, onde a exploração de sal-gema foi encerrada nas 35 minas pela empresa Braskem. [59] A Braskem já está com autorização de pesquisa para o sal-gema de novas áreas em uma região menos habitada em Maceió. [60]

Alguns estudos mostram onde estão localizados os depósitos de sal gema no mundo. De acordo com a fonte [61] o território Brasileiro tem quatro regiões com potencial de um sistema CAES de grande escala. Sendo estas regiões em quatro Estados diferentes são eles: Alagoas, Espírito Santo, Pará e Amazonas.

A grande vantagem das regiões que tem o sal gema próximo do mar é a redução

do custo de construção das cavernas. [62] O custo de fazer uma caverna salina está diretamente relacionado com a proximidade do mar (salmoura pode ser despejada no mar durante a escavação.)



Figura 4.14: Mapa dos depósitos de sal gema no mundo. Fonte: *Wolfgang Littmann* (2022)

A proximidade de linhas de transmissão também implica em custo de instalação de um sistema CAES. Se a região não for provida de linhas de transmissão para a aplicação de um sistema como este, os custos podem impactar negativamente a viabilidade do sistema.

#### **4.12 Volume constante (isocórico) e pressão constante (isobárico)**

Os sistemas CAES são melhor aproveitados com pressão constante. Para melhor uso de uma determinada capacidade de armazenamento, a pressão constante (isobárico) e não o volume constante (isocórico) é o melhor cenário [42]

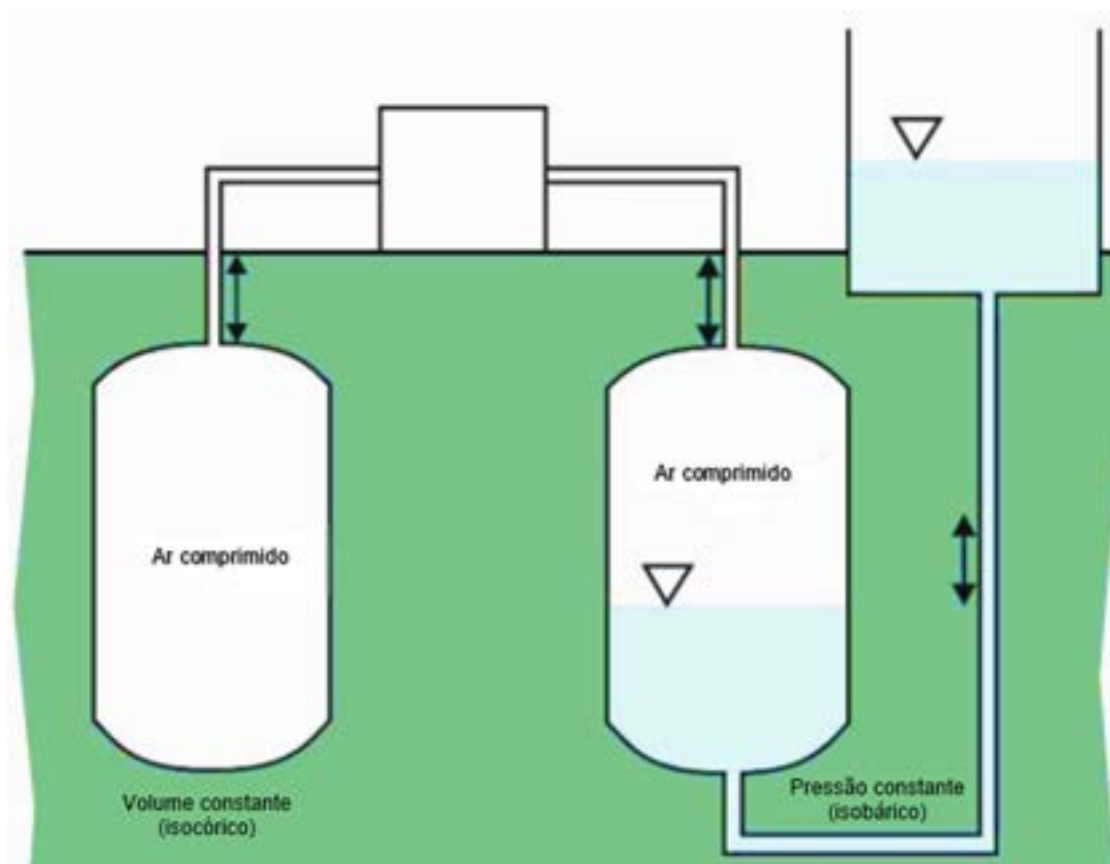


Figura 4.15: Volume constante (isocórico) e pressão constante (isobárico). Fonte: David J. Evans., Gideon Carpenter., Gareth Farr.

Em reservatórios com volume constante (isocórico) a pressão é controlada com válvulas de estrangulamento e aquecimento do ar. Em reservatórios com pressão constante (isobárico) o volume é variável. A pressão no reservatório permanece quase constante, apesar do aumento do volume do ar, que representa um sistema mais eficiente do que o volume constante. [42]

## 5 VISÃO GERAL DE UM CAES

### 5.1 Projetos CAES em operação

#### 5.1.1 Usina de *Huntorf*

A usina de *Huntorf*, localizada no Norte da Alemanha, construída em 1978, foi o primeiro sistema de ar comprimido para geração de energia elétrica comercial no mundo. Essa usina foi reformada em 2007. As especificações da potência da usina quando em carga (compressor) demoram mais de 12 horas usando 62 MW para completar a capacidade total da caverna e na descarga (turbina) entrega

no período de mais de 2 horas uma quantidade de 321 MW (dados após a reconstrução no ano de 2007). Os fluxos de ar declarados desta usina são da ordem de 455 kg/s de ar na turbina e 108 kg/s de ar no compressor. Esse sistema conta com duas cavernas de com o volume aproximado de 310.000 m<sup>3</sup> quando somadas as duas unidades. A pressão interna das cavernas salinas está entre 4,2 – 7,2 MPa quando em operação. O máximo de redução de pressão quando em operação segue uma ordem de 15 bar/h. Essa usina de *Huntorf* usa gás natural para aquecer o ar na expansão e não aproveita o calor gerado na compressão. A eficiência do ciclo completo está em 42% devido ao uso do gás natural na expansão. [8, 17, 39, 41]



Figura 5.1: Vista aérea da usina *Huntorf* (a), vista do compressor e turbina (b). Fonte: Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa (2019)

De acordo com a fonte [41] a usina de *Huntorf* foi originalmente construída para servir na aplicação de *Spinning reserve* das usinas nucleares da região. Hoje ela trabalha em conjunto com as turbinas eólicas para nivelar a carga e filtrar as intermitências desta fonte. [8]

### 5.1.2 Usina de *McIntosh*

A usina *McIntosh* situada em *McIntosh, Alabama, USA*, está em operação desde 1991 com uma potência 110 MW pode operar por até 26 horas em potência máxima. Para uma carga completa leva entre 41 e 44 horas com uma potência de 53MW. O ar comprimido é armazenado em uma caverna salina. Um recuperador é operado para reutilizar a energia térmica de exaustão. Isso reduz o consumo de combustível em 22–25% e melhora a eficiência do ciclo de 42%

para 54%, em comparação com a planta *Huntorf*. Os fluxos de ar declarados desta usina são na ordem de 157 kg/s de ar na turbina e 94 kg/s de ar no compressor. Esse sistema conta com duas cavernas de com o volume aproximado de 560.000 m<sup>3</sup>. A pressão interna das cavernas salinas está entre 4,6 – 7,4 MPa quando em operação. Essa usina de *McIntosh* usa gás natural ou óleo combustível para aquecer o ar na expansão e não aproveita o calor gerado na compressão só usa o calor que provém da combustão em um recuperador de calor para melhorar a eficiência. [8, 15, 17, 39, 41, 64].

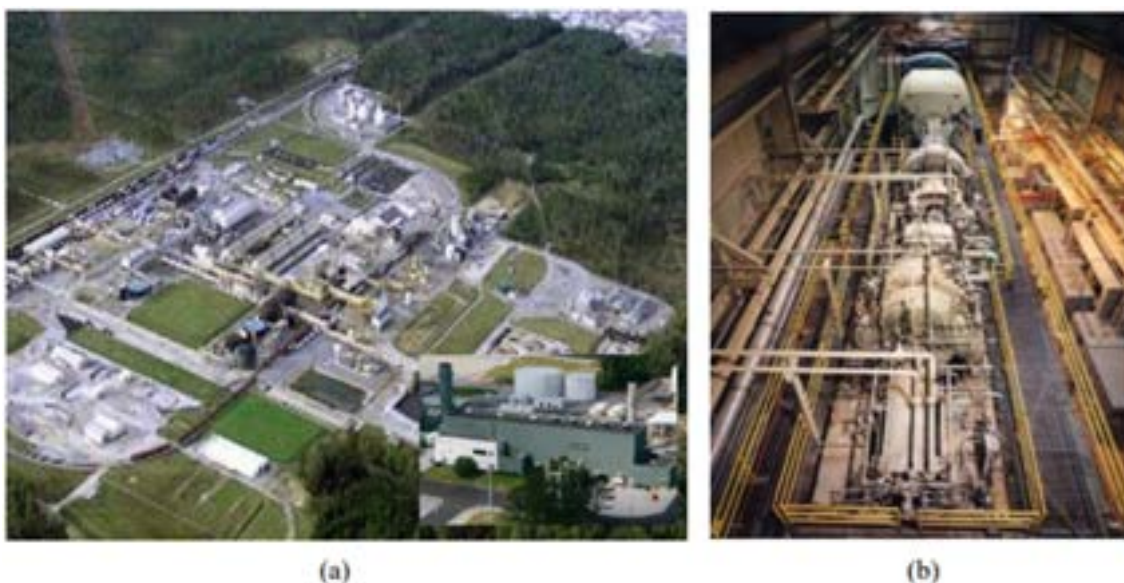


Figura 5.2: Vista aérea da usina *McIntosh* (a), vista do compressor e turbina (b). Fonte: Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa (2019)

### 5.1.3 Usina de *Goderich*

A empresa *Hydrostor* tem atualmente 3 (três) projetos em operação ou em construção em seu portfólio. Sua especialidade está no desenvolvimento de produtos aplicados a tecnologias de armazenamento de ar comprimido em cavernas. Em inglês seus projetos estão citados como “*Advanced Compressed Air Energy Storage*” (A-CAES). A principal vantagem deste tipo de sistema são: Os baixos custos com a construção (se tiver uma caverna salina) e o potencial de armazenamento. De acordo com a empresa *Hydrostor*, em 2019, foi instalado o primeiro sistema avançado de armazenamento de ar para produção de

energia, chamado: *Advanced Compressed Air Energy Storage (A-CAES)*, localizado no Canadá, no Estado de *Ontário*, na cidade de *Goderich*. Totalmente livre da queima de combustível, a usina produz zero emissões de gases de efeito estufa e contribui para uma rede elétrica mais limpa, mais acessível e mais flexível. A usina representa um avanço fundamental no armazenamento de energia de longa duração e iniciou mundialmente na comercialização bem-sucedida de tecnologia CAES sem combustível (adiabática). A usina foi contratada pela agência que controla a distribuição elétrica em horários de pico. Essa agência se compara ao que temos aqui no Brasil como o órgão ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. No site oficial da empresa, foi divulgado a capacidade de armazenar mais de 10 MWh. Quando em carga, a bateria de ar consome 2,2 MW e na descarga 1,75 MW, eficiência de entre 60 - 65%. [65]



Figura 5.3: Vista da central de *Goderich*. Fonte: *Goderich Energy Storage Facility (2019)*

O local de implantação do recipiente para conter o ar comprimido foi em uma caverna de sal. Onde a empresa conseguiu obter uma caverna não utilizada em *Goderich* e garantir um arrendamento para transição do espaço com as agências locais para uso com tecnologia CAES. Dessa forma obteve toda a utilização necessária da caverna, licenças de construção, projeto licenças de ar e licenças de ruído exigidas por várias autoridades, incluindo o governo municipal local,

Ministério dos Recursos Naturais e Ministério do Meio Ambiente do Canadá. De acordo com os estudos iniciais apresentados aos órgãos de regulação local a central de *Goderich* deverá ao longo da vida útil de projeto ter uma redução de carbono na ordem de 22.300 toneladas, em outras palavras, seria equivalente a retirada de 4.500 carros de circulação por um período de um ano. Fora os benefícios ambientais a empresa também destacou que a implementação de um projeto como esse, resultaria na criação de mais empregos para comunidade local, ao mesmo tempo em que proporciona uma diversificação econômica regional inestimável. [19, 65, 66, 67]

#### 5.1.4 Usina de *Jintan*

No início do ano 2022, entrou em operação a usina de armazenamento de energia com ar comprimido na China. O armazenamento é feito em uma caverna salina com volume de 220.000 m<sup>3</sup> a uma profundidade de 1.000 metros. A potência instalada de 60 MW com uma capacidade de armazenamento de 300 MWh, com uma eficiência de mais de 60%. Esse projeto faz parte de um projeto muito maior, sendo que os 60 MW é só a primeira fase, tendo em vista que esse projeto almeja chegar em 1.000 MW. A usina de *Jintan* é similar a usina de *Goderich* por armazenar o calor no momento da compressão do ar e liberá-lo na expansão, sendo esses sistemas classificados como adiabático avançado (AA-CAES). A usina de *Jintan* tem o propósito de melhorar a capacidade de regulação da rede elétrica e estabelecer mais segurança energética com a entrada das renováveis na região. [68, 69, 70, 71]



Figura 5.4: Vista aérea da usina *Jintan* (a), vista do compressor e turbina (b). Fonte: *Tsinghua University*.

### 5.1.5 Usina de *Bijie*

Poucas informações estão disponíveis desta usina de *Bijie* na China. O que sabemos é que foi uma evolução de outro projeto de armazenamento de ar comprimido com uma técnica de comprimir o ar até um ponto de supercrítico do ar. O que foi aprendido no projeto de *Langfang, Hede* que tinha uma potência de 1,5 MW e eficiência de 52- 55% com formato de operação de uma SC-CAES (*Supercritical Compressed Air Energy Storage*), foi aplicado na usina de *Bijie*. O armazenamento é feito em tubos de alta pressão. A potência instalada de 10 MW com uma capacidade de armazenamento de 40 MWh, com uma eficiência de mais de 60,2%. Esse projeto não queima combustível em seu ciclo, armazenando o calor no momento da compressão do ar e liberando o calor na expansão. Sendo classificada como uma AA-CAES. Muitas patentes foram emitidas para esse projeto. Atualmente serve na aplicação de regulação da rede elétrica e estabelecer mais segurança energética na região com uso das renováveis. [69, 72]



Figura 5.5: Vista aérea do armazenamento *Bijie* (a), vista do compressor (b). Fonte: *Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences*.

## 5.2 Projetos CAES incompletos/ abandonados

Muitos projetos CAES foram projetadas e/ou investigados, mas não foram construídos ou finalizados por uma variedade de razões. Seguem exemplos de tais usinas:

- Durante a era soviética, um projeto para construção de uma usina CAES de 1.050 MW usando caverna salina para o armazenamento de ar foi

proposto na área de *Donbas* na Rússia/ Ucrânia. O desenvolvimento geológico do armazenamento de ar usando cúpulas de sal foi iniciado, mas quando a União Soviética entrou em colapso (1991), a construção foi encerrada. [16]

- A empresa *Hydrostor* no início de 2019 foi anunciada como vencedora de US\$ 9 milhões em financiamento do governo da Austrália para um projeto piloto de demonstração de 5MW/10MWh. Usando uma mina de zinco abandonada para armazenar o ar comprimido, no sul da Austrália. Mas não conseguiu acessar os US\$ 6 milhões do financiamento da *ARENA (Australian Renewable Energy Agency)* e grande parte dos US\$ 3 milhões do financiamento estatal, porque não conseguiu levantar o restante dos US\$ 30 milhões necessários para o projeto [73]. No site da *ARENA* é possível acompanhar o projeto que está com status “*past*”. [74]
- Em 2003 em *Ohio* nos Estado Unidos um mega projeto chamado *Norton*, era para ser o maior do mundo, com forte investimento (\$1,2 bilhões) com uma potência instalada de 2.700 MW (9 x 300 MW) e com uma duração na potência nominal de 30 horas. O projeto se baseava em uma mina de calcário a uma profundidade de 670 metros com um volume de 9.571.094 m<sup>3</sup>. A pressão do ar na caverna operava em uma faixa entre 800 a 1.600 psi. Projetado para operar com a queima do gás natural na expansão. A previsão de entrada em operação estava para a data de 2005/6 [16]. De acordo com referência [17] a companhia responsável pelo projeto declarou atrasos devida a condições de mercado, a energia muito barata não viabilizaria a conclusão do projeto. Detalhes completos deste projeto nas referências [75, 76].
- Nos anos 80 a usina de *Sesta* da ENEL na Itália, usava uma caverna de formação porosa (rocha sedimentar) para armazenar o ar comprimido. De acordo com a fonte [18] a caverna armazenava dióxido de carbono em uma espécie de bolha, antes de ser usada para um sistema de CAES. Embora os primeiros testes de compressão serem bem-sucedido, os

testes finais foram interrompidos prematuramente após um terremoto na região, no início dos anos 90. As causas do terremoto ainda são incertas se foi um evento induzida por um processo de extração de campo geotérmico próximo da caverna ou outra causa, como a oxidação das piritas no arenito na presença do oxigênio. Após o terremoto ela deixou de existir. [39]

- Israel estudou várias instalações CAES, incluindo uma instalação CAES de 300 MW usando aquíferos de rochas ígneas fraturada. [16]
- Em 1990 o Japão fez teste para uma usina CAES de 2 MW em uma mina de carvão revestida de concreto. O projeto estava dimensionado para entregar 4 horas na potência nominal e fazer uma carga completa em 10 horas (compressor). O volume da caverna era de 1.600 m<sup>3</sup> a uma profundidade de 450 metros. A estrutura da caverna apresentou vazamentos na ordem de 0,5% por dia a uma baixa pressão de 130 psi. [16, 77]
- No ano de 2006 em *Iowa*, Estados Unidos, uma usina construída em *Porous Media Compressed Air Energy Storage* (PM-CAES) com um conceito inovador foi projetada para servir de filtro das intermitências das turbinas eólicas na região. O armazenamento estava projetado em um aquífero de rochas porosas (arenito). Com uma potência nominal de 268 MW e acoplada a uma capacidade eólica de 75 – 100 MW, seria a primeira do tipo até então. O funcionamento da usina *Iowa* estava previsto para 2015, porém estudos detalhados da formação geológica da caverna revelaram que os aquíferos de arenito poroso não eram apropriados para essa aplicação. Pelo fato da caverna não estar apta para ultrapassar os limites de pressão, a potência nominal preestabelecidos de projeto não seria alcançado, limitando a pressão do ar na caverna e reduzindo a quantidade possível de armazenamento. Desta forma, a inviabilidade do projeto foi declarada e a ideia foi abandonada. [17]

- Luxemburgo projetou uma usina CAES de 100 MW compartilhando um reservatório superior para um reservatório de água sistema de compensação com uma usina hidrelétrica bombeada localizada em uma caverna de rocha ígnea no Sítio de Viena. [16]
- Cooperativa Elétrica *Soyland*, com sede em *Decatur, IL*, contratada para a construção de uma usina CAES em uma caverna com rocha ígnea de 220 MW. Engenharia da planta, perfuração da rocha, amostra da caverna e análises foram concluídos e todos os principais equipamentos foram adquiridos quando o projeto foi rescindido devido a considerações não técnicas decorrentes de uma mudança no conselho de diretores da concessionária. A ABB foi selecionada para fabricar a compressor e turbina, e A *Gibbs & Hill, Inc.* foi selecionada como a empresa de engenharia dos projetos da usina. [16]

### 5.3 Sistemas CAES existentes como protótipos

#### 5.3.1 Bateria de ar TICC-500

Esse projeto foi parceria entre uma universidade e um instituto de pesquisa Chinês. A bateria de ar tem uma eficiência máxima de 33,3% tem uma capacidade de 500KW. De acordo com a fonte, a TICC-500 foi interligado na rede local em 2014. A ideia desse protótipo era estudar o sistema como um todo para verificar as diversas formas de usar o ar como uma bateria e interligação com a rede elétrica. [69]



Figura 5.6: Vista do protótipo TICC - 500. Fonte: *Jidai Wang* (2017)

### 5.3.2 Bateria de ar da empresa *Augwind Energy Tech*

A empresa *Augwind Energy Tech* apresentou um protótipo de um sistema isotérmico de ar comprimido. A capacidade instalada é de 250 kW. A energia para carregar a bateria vem de um sistema fotovoltaico [78]. As soluções inovadoras para o sistema de armazenamento com ar comprimido.

Os componentes básicos desse sistema são: bombas de água, tanques de compressão e turbina hidráulica. O novo sistema combina os métodos de bombeamento hidráulico para compressão do ar, o qual, comprime o ar usando a tensão superficial da água que trabalha como um pistão, mantendo a temperatura estável na compressão.

A grande inovação foi o desenvolvimento de um tanque feito de polímero inflável, cercados por concreto armado. Essa última solução foi um fator chave para redução de custos na parte do armazenamento do ar comprimido e abriu um leque de opções para a indústria por ter forte apelo econômico.

A empresa construiu uma instalação experimental no *Kibutz Yotvata* no sul de Israel. Os custos deste sistema ainda não foram revelados, mas sabemos, através de entrevistas dadas pelo Yogev (fundador) [79], que o valor é inferior a de tecnologias de armazenamento com bateria de lítio.



Figura 5.7: Vista da instalação experimental da *Augwind Energy Tech*. Fonte: *Energy Storage Air Battery*.

Usando água e ar em um sistema fechado, é possível o armazenamento de energia em altas capacidades através de tanques subterrâneos feitos de polímero inflável e concreto armado. Esses tanques tem um formato de cilindro, medindo dois metros de diâmetro e 20 metros de comprimento, chegando a um volume de aproximadamente 63 metros cúbicos.

A empresa declara que seus tanques são capazes de suportar pressões superiores a 40 atmosferas. Essa capacidade de suportar pressão, declarada pela empresa, pode ser verificada através da resistência característica do concreto à compressão (FCK) e do limite de escoamento do aço.

Se utilizarmos os dados declarados de 40 atmosferas e convertermos para quilograma força por centímetro quadrado (Kgf/cm<sup>2</sup>), temos: 41,32 Kgf/cm<sup>2</sup>. Para fins de comparação, um concreto de 25 MPa possui uma resistência a compressão de 250 Kgf/cm<sup>2</sup>.

Quando analisamos a questão de resistência de um concreto e a quantidade que esse concreto é capaz de suportar momentos antes de ser esmagado pela pressão, podemos observar que o concreto de 25 MPa é suficiente para suportar a pressão com largueza.



Figura 5.8: (a) vista do tanque de polímero sendo inflado. (b) Vista do tanque de polímero com a armadura de aço. Fonte: *Augwind*

De acordo com a empresa mencionada, a energia usada para carregar o sistema de bateria de ar pode ser tanto de uma fonte renovável ou da concessionária

local. Essa energia é utilizada para acionar bombas de água com motores de alta eficiência. Em seguida, a água flui até os tanques de compressão, comprimindo o ar do estado normal para altas pressões.

Essa compressão se dá em um processo isotérmico, devido a dois motivos: primeiro, as dimensões do tanque e, segundo, em razão da velocidade lenta da compressão. Devido a dimensão do tanque, mais área de água entra em contato com a área ar e, dessa maneira, a superfície da água funciona como um dissipador de calor mantendo a temperatura constante. Quando, então, há uma compressão de ar em velocidade lenta, em que as moléculas de ar não se movimentam tão de pressa, como fariam em um método convencional de compressão.

Esses dois motivos são a chave para que não haja geração de calor e conseqüentemente a perda de energia no sistema. Após o sistema ser carregado, o ar comprimido empurra a água para dentro de uma turbina hidráulica que gira um moto gerador, devolvendo assim a energia elétrica para a rede.

A eficiência declarada pela empresa para esse sistema foi de 80%. Em outras palavras, para esse sistema despachar energia, ele consome 20% do que entra nele. A *Augwind* tem dois modelos de negócios: em um, o cliente paga pela instalação com base em vários *benchmarks*, com um nível mínimo de economia de energia elétrica; e, na outra, a *Augwind* paga a instalação, e a empresa e o cliente dividem a economia do deste último em eletricidade. [79]

### **5.3.3 Bateria de ar da Lightsail Energy**

A *LightSail Energy* que deixou de existir, desenvolveu uma tecnologia de compressão e expansão de ar comprimido quase isotérmica (usando injeção direta de *spray* de água) que demonstrou aumentos de eficiência de ~30% na compressão e expansão, com pressões de até 220 bar.

Também desenvolveram recipientes de pressão compostos de carbono leves de baixo custo para ar e gás natural e um conceito para aproveitar o ciclo térmico para fornecer aquecimento e resfriamento de armazenamento de energia em massa de forma eficiente. De acordo com a fundadora Danielle A. Fong ao injetar diretamente o *spray* de água no ar durante a compressão, o armazenamento da energia térmica em uma combinação de água morna e ar comprimido, que é mais que o dobro da eficiência de apenas comprimir o ar. A figura 5.9 mostra como funciona o processo compressão e expansão de ar comprimido quase isotérmica usando injeção direta de *spray* de água da *LightSail*. [80]



Figura 5.9: Compressão e expansão de ar comprimido quase isotérmica usando injeção direta de *spray* de água da *LightSail*. Fonte: Danielle Fong (2022)

De acordo com o site, os resultados experimentais entregaram mais de 300 horas de energia, a diferença de temperatura final foi de cerca de 10 °C, o compressor/ expensor de pistão alternativo operando com 1000 rpm e 250 kW foi a maior potência alcançada.

## Storage

Air can be stored in simple, low cost air storage tanks, packed in a convenient shipping container form factor using industry standard pipes and matching ASME and ISO safety standards. For truly massive installations, air can be stored in underground caverns which is the standard for large scale natural gas storage.



Figura 5.10: Demonstração de como seria a forma de armazenamento da *LightSail*. Fonte: Paulo Fontes, Moritz Raible (2016)

As últimas informações são que os tanques ainda estão em desenvolvimento e o compressor está paralisado por falta de investimentos. A *Khosla Ventures* (investidor) tem a maior parte das patentes emitidas. Provavelmente o avanço mais importante dessa empresa foi a redução de custo para CAES de pequena escala com o desenvolvimento dos tanques de ar usando tecnologia composta. Embora as fibras sejam mais caras do que o aço, elas são muito mais fortes e, portanto, cerca de 2 a 3 vezes mais baratas para a força que se obtém do que o aço. Com os cilindros mais resistentes suportando mais pressão sendo possível reduzir o número de cilindros necessários. [80]

#### **5.3.4 Bateria de ar da Alacaes**

Segundo a empresa ALACAES (Suíça) a primeira usina CAES adiabática do mundo foi o projeto piloto de 2016, com capacidade de 1MWh e potência de 600kW, o armazenamento é feito em um túnel de rocha sã, com comprimento de 120 m e diâmetro de 5 metros. O armazenamento do calor foi desenvolvido para estar dentro do recipiente de pressão e o calor é capturado por material sólido. Esse protótipo não tem a queima suplementar na expansão apenas o calor produzido na compressão. Eficiência declarada de 72%. [81]

#### **5.3.5 Bateria de ar líquido da Highview**

A empresa *Highview* testou e demonstrou com sucesso sua planta piloto LAES totalmente operacional (350kW/2,5MWh) no ano de 2011-2014. A usina foi construída para provar a tecnologia, estava conectada à rede do Reino Unido e cumpriu todas as regulamentações e inspeções. Foi submetido com sucesso a um regime de teste completo, incluindo teste de desempenho. Calor da usina de biomassa de 80 MW foi usado para melhorar a eficiência do sistema. A planta piloto agora foi realocada para o novo Centro de Birmingham para Criogenia da Universidade de *Birmingham Energy Storage*, onde apoiará mais testes e pesquisas acadêmicas. [35]

### **5.4 Sistemas CAES com projetos em andamento**

Muitos projetos foram desenvolvidos e até iniciados como mostra na parte 5.1 deste trabalho, porém por diversos motivos não estão em operação nos dias de

hoje. Alguns sistemas estão em momento de pesquisa e desenvolvimento ou esperando investidores para serem implementados. Alguns projetos foram listados abaixo.

#### **5.4.1 Usina ADELE**

Na Alemanha, uma usina chamada ADELE está sendo projetada desde 2010 por diversas empresas como *RWE Power*, *General Electric* e outros parceiros. O objetivo deste projeto é otimizar a coexistência e interação suave das fontes de energia individuais, especialmente para a energia eólica. O projeto ADELE quer ser o primeiro projeto AA-CAES de grande escala do mundo com eficiência de ciclo de 70%. Está previsto uma capacidade de armazenamento de 1 GWh e uma capacidade de potência de até 300 MW. O projeto está parado devido a condições de negócios incertos. [69, 82]

#### **5.4.2 Usina Willow Rock**

O Projeto da usina de *Willow Rock* é uma instalação A-CAES em escala de utilidade que está em desenvolvimento ativo no condado de *Kern*, Califórnia, EUA. A instalação proposta fornecerá até 500 megawatts (MW) de potência instalada e capacidade de armazenamento de 4.000 MWh.

A aplicação principal dessa usina é permitir que os recursos solares e eólicos sejam convertidos diretamente em capacidade de pico confiável e sob demanda para a área de *Los Angeles* e a rede mais ampla dos EUA. O projeto foi dimensionado para gerar eletricidade por pelo menos oito horas em plena capacidade. [65] Esse projeto usa uma coluna de água para manter a pressão constante, o governo local está preocupado com a quantidade de água necessária para repor o reservatório externo. [83]



Figura 5.11: Vista da renderização mostra os planos da *Hydrostor* para a usina *Willow Rock*.  
Fonte: John Cox (2022)

### 5.4.3 Usina *Silver City*

O projeto da usina de *Silver City* é uma instalação A-CAES com capacidade instalada de 200 MW e capacidade de armazenamento de 1.600 MWh. O projeto usa uma mina desativada. É o primeiro projeto de armazenamento de energia de grande escala e longa duração na Austrália a ser selecionado como a solução preferida na primeira etapa de um processo de planejamento de transmissão regulatório por uma grande concessionária.

A aplicação desse projeto será de oferecer geração de backup crítica para garantir a confiabilidade do fornecimento de eletricidade para a comunidade de *Broken Hill* e resolverá problemas significativos de congestionamento enfrentados por projetos renováveis existentes na região.

Esse projeto está sendo desenvolvida em conjunto pela *Hydrostor* e *Energy Estate*. [65] Na data deste trabalho (01/10/2022) esse projeto não estava registrado no site da *ARENA (Australian Renewable Energy Agency)*, colocando em dúvida se existe real interesse (viabilidade econômica) nesse projeto por parte da agência. [74]



Figura 5.12: Vista da renderização mostra os planos da *Hydrostor* para a usina *Silver City*.  
Fonte: [www.silvercityenergystorage.com](http://www.silvercityenergystorage.com)

#### 5.4.4 Usina *Chorro Valley*

O projeto foi desenvolvido pela empresa *Hydrostor* para a Califórnia, Estados Unidos. De acordo com a referência [85] esse projeto visa substituir uma usina nuclear na região que tem previsão de ser desativada entre o ano de 2024/25.

O custo estimado para implementação desse sistema A-CAES é de \$800 milhões. Com uma potência nominal de 400 megawatts e capacidade de armazenamento de 3.200 MW-hora, instalação avançada de armazenamento de energia de ar comprimido seria capaz de carregar e descarregar com flexibilidade diariamente.

Vida útil do sistema é de mais de 50 anos, será capaz de fornecer 400 megawatts de eletricidade por 8 horas. Este projeto armazenará o excesso de geração de projetos solares e eólicos da Califórnia. [86]



Figura 5.13: Vista da renderização mostra os planos da *Hydrostor* para a usina *Chorro Valley*.  
Fonte: Malea Martin (2021)

#### 5.4.5 *Magnum CAES*

Esse projeto fica no estado de *Otah*, *USA*, projetado em uma área com rica geração eólica e solar. Com uma potência proposta entre 160 e 320 MW e capacidade de armazenamento de 8.700 MWh. Usa uma caverna salina para armazenar o ar comprimido. [88]

#### 5.4.6 *Usina de Bethel*

Projetada pela empresa Apex CAES, na região do Texas, *USA*., potência Instalada prevista de 317 MW até 487 MW, capacidade de armazenamento de 16.000 MWh com 48h de entrega de energia na potência nominal. Pressão interna da caverna 3.000 psi. Será a maior usina CAES existente quando entregue. O processo usa combustão na expansão com gás natural ou uma solução de 50% de hidrogênio e 50% ar. Usa uma caverna salina para armazenar o ar comprimido com um volume 635.949 m<sup>3</sup>. [88] A usina é capaz de se carregar com fontes intermitentes e entregar eletricidade ao mesmo tempo. Previsão de operação: inverno de 2025. [89] Usa uma solução completa da empresa Siemens (turbina e compressor). Custo estimado da construção é de \$2/ KWh em um período de retorno de 30 anos.[90]



Figura 5.14: Vista da turbina, compressor e caverna salina. Fonte: Apex CAES (2022)

## 6 CONCLUSÃO

O ar comprimido é reconhecido há muito tempo como a tecnologia com potencial de ser aquela de menor custo para armazenamento de energia em grande escala. Porém, identificamos três requisitos essenciais para viabilizar um sistema de armazenamento com ar comprimido, sendo eles o baixo custo, a alta eficiência e a longa vida útil, havendo desafios a serem superados para a implementação do ar comprimido quanto ao custo e à eficiência.

No Brasil, constatamos com este trabalho que existe espaço para um sistema de armazenamento com ar comprimido de grande porte no território brasileiro. Dois Estados (Espírito Santo e Alagoas) tem potencial para o desenvolvimento desta tecnologia por apresentarem regiões com sal-gema próximo do mar, o que garante menor custo de escavação.

No entanto, essas regiões esbarram no problema do custo, principalmente, em razão da ausência de linhas de transmissão e de gasodutos próximo dos depósitos de sal-gema.

Com relação a disponibilidade de linhas de transmissão nas proximidades dos

depósitos de sal-gema, no Estado do Espírito Santo por exemplo, a linha de transmissão mais próxima está a uma distância de ~72 Km. Caso um empreendimento de armazenamento seja considerado nessa região a viabilidade econômica pode ser um empecilho, já que demandaria grande extensão para linhas de transmissão que possuem alto custo de instalação, com a aquisição do terreno e de todas as implicações decorrentes disso. A problemática engloba, ainda, as dificuldades em instalação dessas linhas em longos territórios dentro de regiões, muitas vezes, de preservação ambiental, o que requer autorização dos órgãos públicos reguladores ou o contorno dessas áreas, aumentando ainda mais as distâncias e o custo.

Outro impasse na adoção de armazenamento de ar comprimido se encontra na eficiência do ciclo. Constatamos a partir de dados pesquisados das usinas de grande porte que estão em operação um baixo desempenho, pois a máxima entre as usinas existente está em ~60% (*Goderich*).

Fora estes dois desafios, também vale ressaltar que as usinas AA-CAES e SC-CAES ainda não são uma tecnologia madura como a D-CAES. Os sistemas de ar comprimido com a queima suplementar de gás natural ou mix de hidrogênio e ar atmosférico (D-CAES) de grande porte, já tem as credenciais de longa vida útil, com eficiência média entre 42 – 54%. No entanto, é preciso ressaltar que este sistema não representa um avanço da tecnologia CAES, mais sim uma adaptação de uma turbina e compressor para melhorar o ciclo da turbina a gás natural. Ainda, destaca-se que para a implementação de um sistema como este, é necessário a construção de um gasoduto (gás natural ou hidrogênio) e linhas de transmissão até os depósitos de sal-gema, elevando demasiadamente o custo.

Nesta tecnologia já existem empresas que fornecem soluções completas, como a empresa Siemens, que tem soluções prontas de 160 MW para essa aplicação, já utilizada na Usina de McIntosh.

No tocante aos sistemas de ar comprimido de grande porte sem a queima

suplementar, como a LAES, AA-CAES ou SC-CAES (Supercritical Compressed Air Energy Storage), há um avanço de tecnologia. Esses sistemas são em sua essência uma CAES e fornecem uma solução totalmente livre da queima de combustível produzindo zero emissões de gases de efeito estufa e contribuem para uma rede elétrica mais limpa.

Para o Brasil desenvolver seu próprio sistema de ar comprimido sem a queima suplementar com matéria prima nacional, o caminho mais provável é começar fazendo um protótipo e de lá aprimorar a eficiência. Os chineses demoraram quase uma década para chegar em ~60% de eficiência na usina de *Jintan*, com potência instalada de 60 MW (usando materiais Chineses). Os Canadenses também levaram quase uma década para chegar a uma eficiência ~60% na usina de *Goderich* com potência 1,75 MW. Portanto, a exemplo de países que desenvolveram a tecnologia, o investimento científico é fundamental e deve ocorrer a longo prazo e de forma escalonar para o alcance de maior eficiência e viabilidade econômica do armazenamento.

Em menor escala, há soluções que não demandam cavernas, como o sistema isotérmico de ar comprimido e o sistema de ar líquido. O sistema isotérmico da empresa *Augwind* (Israelense) indica ser uma solução proficiente para os sistemas isolados pela simplicidade de operação e pelos materiais utilizados, já que emprega materiais como o aço, cimento, polímero, turbina e bomba, disponíveis em território brasileiro. No requisito de eficiência, essa bateria de ar apresenta uma boa performance com 80% no ciclo completo. No entanto, nos requisitos de baixo custo e longa vida útil ainda existem incertezas que precisam ser esclarecidas.

Os sistemas com ar líquido (LAES), a empresa *Highview Power* apresenta uma solução real para o armazenamento de energia, contudo a eficiência do ciclo, que está entre 50 e 60%, ainda são baixas. Se o requisito de baixo custo for alcançado, esses sistemas tem potencial para todo território brasileiro com possibilidade de instalação nas proximidades das linhas de transmissão.

Acredito que para o desenvolvimento futuro no território brasileiro do sistema de armazenamento de ar comprimido exige o atendimento aos três requisitos mencionados, de baixo custo, eficiência e longa vida útil. Para tanto é necessário investir em desenvolvimento científico para o desenvolvimento de um sistema nacional sem a queima suplementar, o que baratearia a implementação no Brasil, já que não exigiria a compra de tecnologia de outros países.

Com o investimento no estudo da tecnologia no âmbito do território brasileiro, seria possível investigar a expansão do ar comprimido dentro de um corpo de água, verificando se a pressão hidrostática aumenta a eficiência do ciclo, idealizando a substituição da turbina por outro sistema; como também identificar as cavernas brasileiras, aptas para sistemas CAES.

Exige-se, além disso, esforços para diminuir os custos da eletricidade, a partir de subsídios governamentais para fontes renováveis despachadas; com construção de linhas de transmissão nas regiões do sal-gema; flexibilidade e maior autonomia em regiões com proteção ambiental para a implementação do sistema.

## 7 REFERÊNCIAS

[1] Tarek M. Masaud, Keun Lee, and P.K. Sen., “An Overview of Energy Storage Technologies in Electric Power Systems: What Is The Future?”, 2010., Disponível em: <<https://sci-hub.ru/10.1109/NAPS.2010.5619595>> ., Acesso em 14.09.2022

[2] Energy Storage Recharging The Energy Transition – “Transition to clean and reliable energy” ., [www.siemensgamesa.com](http://www.siemensgamesa.com)., Disponível em: <<https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise>> ., Acesso em: 14.09.2022.

[3] Kris de Decher., “History and Future of the Compressed Air Economy”., May 16, 2018., Disponível em: <<https://www.resilience.org/stories/2018-05-16/history-and-future-of-the-compressed-air-economy/>>., Acesso em: 18/08/2022.

[4] Noéli Nobre., “Brasil ratifica Acordo de Paris sobre Mudança do Clima”., Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/497879-brasil-ratifica-acordo-de-paris-sobre-mudanca-do-clima/>>., Acesso em: 18/09/2022.

[5] Ministério De Minas E Energia (MME) / Empresa De Pesquisa Energética (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 – PDE 2030. 2020c. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao490/topico564/Minuta\\_do\\_Plano\\_Decenal\\_de\\_Expansao\\_de\\_Energia\\_2030\\_\\_PDE\\_2030.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao490/topico564/Minuta_do_Plano_Decenal_de_Expansao_de_Energia_2030__PDE_2030.pdf)>., Acesso em: 18/09/2022.

[6] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – Tabela projeção da população brasileira., Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/>>., Acesso em: 18/09/2022.

[7] Alberta Electric System Operator., “Dispatchable Renewables and Energy Storage”. (2018, May 31),. Disponível em: <<https://www.aeso.ca/assets/Uploads/AESO-Dispatchable-Renewables-Storage-Report-May2018.pdf>>., Acesso em: 26/09/2022.

[8] Fritz Crotogino, Klaus-Uwe Mohmeyer, Dr. Roland Scharf., “Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation”., Disponível em: <[AKE2003H03c\\_Crotogino\\_ea\\_HuntorfCAES\\_CompressedAirEnergyStorage.pdf](https://www.uni-saarland.de/~fke2003/H03c_Crotogino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf) (uni-saarland.de)>., Acesso em: 18/09/2022.

[9] Province Of Alberta - Current as of January 1, 2020 - Statutes of Alberta, 2016 Chapter R-16.5 ., “Renewable Electricity Act”., Disponível em: <[https://www.qp.alberta.ca/1266.cfm?page=r16p5.cfm&leg\\_type=Acts&isbncln=](https://www.qp.alberta.ca/1266.cfm?page=r16p5.cfm&leg_type=Acts&isbncln=)

9780779814060>., (pág. 3)., Acesso em: 17/08/2022.

[10] Jorge Bermúdez Soto., “Sumário Executivo Energias Renováveis Auditoria Coordenada”.,Disponível em:<[https://portal.tcu.gov.br/data/files/8F/42/72/E2/A500371055EB6E27E18818A8/Energias\\_renovaveis\\_portugues.pdf](https://portal.tcu.gov.br/data/files/8F/42/72/E2/A500371055EB6E27E18818A8/Energias_renovaveis_portugues.pdf)>.,(pág. 51 e 52)., Acesso em: 17/08/2022.

[11] Richard Herweynen., “Dispatchable Renewables For Reliable, Affordable, Sustainable Power” (What Are Dispatchable Renewables?)., Disponível em: <<http://dispatchablerenewables.entura.com/dispatchable-renewables-for-reliable-affordable-sustainable-power/>>., Acesso em: 26/08/2022.

[12] Duncan Cooper., “Johnson’s Energy Club Competes in Renewable Energy Case Competition”.,. Data da publicação 2012., Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20120616055400/http://www.johnson.cornell.edu/Center-for-Sustainable-Global-Enterprise/News-Events/CSGE-Student-Article-Detail/ArticleId/1791/Johnson-s-Energy-Club-Competes-in-Renewable-Energy-Case-Competition.aspx>>., Acesso em: 26/08/2022.

[13] PSR Consultoria Lewe Consultoria., data da publicação 2016., “A Energia Que Queremos”., Disponível em: <[https://www.ecoa.org.br/wp-content/uploads/2017/05/998f41\\_16a988bd6cff45399bfaa6181e938ec4.pdf](https://www.ecoa.org.br/wp-content/uploads/2017/05/998f41_16a988bd6cff45399bfaa6181e938ec4.pdf)>., Acesso em: 26/08/2022.

[14] Barreto, G. A. Armazenamento de energia. In: Ett, G.; Grimoni, J. A. B.; Moreira J. R. S. Energias renováveis, Geração Distribuída e Eficiência energética. 2ª Edição., Capítulo 6. Pág. 152

[15] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke., Overview Of Current Development On Compressed Air Energy Storage technologies and the application potential in power system operation. December, 2014. Disponível em: <(PDF) Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation

(researchgate.net)>., Acesso em 23/09/2022.

[16] S. Eckroad, Handbook of Energy Storage for Transmission or Distribution Applications., 2002., Capítulo: EPRI Energy Storage Handbook: Compressed Air Energy Storage (CAES)., Disponível em: .,<  
[http://www.w2agz.com/Library/EPRI%20Sources%20&%20Reports/\(2002\)%20Handbook%20of%20Energy%20Storage%20for%20Transmission%20or%20Distribution%20Applications,%20EPRI%201007189.pdf](http://www.w2agz.com/Library/EPRI%20Sources%20&%20Reports/(2002)%20Handbook%20of%20Energy%20Storage%20for%20Transmission%20or%20Distribution%20Applications,%20EPRI%201007189.pdf) >., Acesso em 25.09.2022

[17] Filipa Vaz Ramires Gomes da Costa., “Processos de armazenamento de energia com recurso a ar comprimido”., 2019., Disponível em:  
[https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/39103/1/ulfc125466\\_tm\\_Filipa\\_Costa.pdf](https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/39103/1/ulfc125466_tm_Filipa_Costa.pdf).  
 Acesso em: 06/08/2022.

[18] U. S. Department of Energy., “EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications” Data da publicação dezembro de 2003., Disponível em: <  
<https://www.sandia.gov/ess-ssl/publications/ESHB%201001834%20reduced%20size.pdf>  
 > Acesso em: 23.09.2022

[19] Gord Reynolds., “NRStor Project Spotlight”., “NRStor is developing the world’s first commercial fuel-free compressed air energy storage (CAES) facility”.;  
 Disponível em:< <http://nrstor.com/wp-content/uploads/2019/06/CAES.pdf>>.,  
 Acesso em: 25.09.2022.

[20] Apar Chitransh, Dr. Ranjit Kumar Bindal., “A Review on Energy Storage System of Smart Grid System”., 2020., Disponível em: <  
[https://www.researchgate.net/publication/352212362\\_A\\_Review\\_on\\_Energy\\_Storage\\_System\\_of\\_Smart\\_Grid\\_System/link/60bf3432a6fdcc22eae8df92/download](https://www.researchgate.net/publication/352212362_A_Review_on_Energy_Storage_System_of_Smart_Grid_System/link/60bf3432a6fdcc22eae8df92/download)>., Acesso em: 25.09.2022.

[21] Behnam Zakeri., Sanna Syri., 2014., “Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis”., Disponível em: <

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114008284?via%3Dihub>>., Acesso em: 06.10.2022.

[22] SIGMINE., Sistema de Informações Geográficas de Mineração., Disponível em: <<https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908>>., Acesso em: 18.10.2022.

[23] Webmap EPE., Sistema de informações Geográfica do Setor Energético Brasileiro., Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>>., Acesso em: 18.10.2022.

[24] Livro: Energy Storage Technologies And Applications. Publicado no ano de 2013., Capítulo 1., “Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies” Pág. 20 e 21., Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5089982/mod\\_resource/content/1/Energy%20Storage%20-%20Technologies%20and%20Applications%20-%20Ahmed%20Faheem%20Zobaa%20%28InTech%2C%202013%29.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5089982/mod_resource/content/1/Energy%20Storage%20-%20Technologies%20and%20Applications%20-%20Ahmed%20Faheem%20Zobaa%20%28InTech%2C%202013%29.pdf)>., Acesso em: 19/08/2022.

[25] Catarina R. Matosa, Júlio F. Carneiro, Patrícia P. Silva., “Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification”. Data da publicação 2019., Disponível em: <<https://sci-hub.se/10.1016/j.est.2018.11.023>>., Acesso em: 10/09/2022.

[26] U.S. Department of Energy and National Energy Technology Laboratory., “Mechanical Energy Storage” Technology Examples., Disponível em: <[https://netl.doe.gov/sites/default/files/2021-02/Mechanical\\_Storage.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/2021-02/Mechanical_Storage.pdf)>., Acesso em: 03/08/2022.

[27] Empresa de pesquisa energética (EPE)., “Sistemas de Armazenamento em Baterias Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento”., Data: 29 de

novembro de 2019., Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>., (N. EPE-DEE-NT-098/2019-r0)>., Acesso em: 14.09.2022.

[28] National Geographic.,” Photosynthesis is the process by which plants use sunlight, water, and carbon dioxide to create oxygen and energy in the form of sugar”., Resource Library - Encyclopedic Entry., Disponível em: <<https://education.nationalgeographic.org/resource/photosynthesis>>., Acesso em: 10/09/2022.

[29] Empresa de Pesquisa Energética (EPE)., 2021.,(Nota Técnica)., “Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica”., Disponível em: < [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-561/EPE-DEE-NT-013\\_2021-r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-561/EPE-DEE-NT-013_2021-r0.pdf)>., Acesso em: 07.10.2022.

[30] Energy Vault., “Transforming Utility Scale Gravity Energy Storage”., Disponível em: <<https://www.energyvault.com/gravity>> Acesso em: 03/08/2022.

[31] Energy Vault., Photo Gallery., Disponível em: <<https://www.energyvault.com/photo-gallery>> Acesso em: 03/08/2022.

[32] Malte Krack, Marc Secanell, Pierre Mertiny., “Rotor Design for High-Speed Flywheel Energy Storage Systems”., Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/20363>>., Acesso em: 03/08/2022.

[33] Beacon Power., “Grid Balancing”., “Renewable Integration”., “Islands & Isolated Grids”., “Carbon Fiber Flywheels”., Disponível em: <<https://beaconpower.com>> .,Acesso em: 03/08/2022.

[34] Nancy Hall., “Air Properties Definitions”., Last Updated: May 13 2021., Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airprop.html>>., Acesso em: 03/08/2022.

[35] Highview Power Storage., 2017., “Liquid Air Energy Storage Pumped Hydro Capability No Geographical Constraints”., Disponível em: <<https://www.highviewpower.com/wp-content/uploads/2018/04/Highview-Brochure-November-2017-Online-A4-web.pdf>>., Acesso em: 21.10.2022.

[36] Highview Power., “Highview Power to Develop Multiple Cryogenic Energy Storage Facilities in the UK and to Build Europe’s Largest Storage System”., 21 October 2019., Disponível em: <[https://highviewpower.com/news\\_announcement/highview-power-to-develop-multiple-cryogenic-energy-storage-facilities-in-the-uk-and-to-build-europes-largest-storage-system/](https://highviewpower.com/news_announcement/highview-power-to-develop-multiple-cryogenic-energy-storage-facilities-in-the-uk-and-to-build-europes-largest-storage-system/)>., Acesso em 23/09/2022.

[37] Carlos Roberto Rocha, Marco Aurélio Guimarães Monteiro., “Eficiência Energética Em Sistemas Em Sistemas De Ar Comprimido”., Data de 2014., Disponível em: [http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_18/2014/04/22/6281/ManualArComprimido.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/ManualArComprimido.pdf)., Acesso em: 06/08/2022.

[38] Gaydaa Al Zohbi, Samar Dernayka, Fatimah Al Wuhayb., “Thermodynamic Analysis of Diabatic and Adiabatic Compressed Air Energy Storage Systems,” Publicado na Data de 2019., Disponível em: <<https://www.eajournals.org/journals/international-journal-of-energy-and-environmental-research-ijeer/vol-7-issue-3-december-2019/thermodynamic-analysis-of-diabatic-and-adiabatic-compressed-air-energy-storage-systems/>>., Acesso em: 10/09/ 2022.

[39] Paulo Fontes, Moritz Raible., “Study of Compressed Air Energy Storage (CAES) for Domestic Photovoltaic Systems”., 2015-2016., Disponível em: <[https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/16896/1/MThesis\\_MR.pdf](https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/16896/1/MThesis_MR.pdf)>., Acesso em 23/09/2022.

[40] Ahmed Faheem Zobaa., “Energy Storage Technologies and Applications”., Chapter 4., Compressed Air Energy Storage., 2013., Disponível em:

<[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5089982/mod\\_resource/content/1/Energy%20Storage%20-%20Technologies%20and%20Applications%20-%20Ahmed%20Faheem%20Zobaa%20%28InTech%2C%202013%29.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5089982/mod_resource/content/1/Energy%20Storage%20-%20Technologies%20and%20Applications%20-%20Ahmed%20Faheem%20Zobaa%20%28InTech%2C%202013%29.pdf)>., Acesso em 14.09.2022.

[41] Sanieel Dong Lim., “Ocean Compressed Air Energy Storage (OCAES) Integrated with Offshore Renewable Energy Sources” 2013., Disponível em: <<https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/8878/etd.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>., Acesso em 14.09.2022.

[42] Seamus D. Garvey., 2019., “Compressed Air Energy Storage: Underground Technologies”., Disponível em: < [https://energnet.eu/wp-content/uploads/2021/02/1-Garvey\\_at\\_EWUES\\_3\\_for-web.pdf](https://energnet.eu/wp-content/uploads/2021/02/1-Garvey_at_EWUES_3_for-web.pdf)>., Acesso em: 10.10.2022.

[43] Nancy Hall., “First Law of Thermodynamics”., Maio 2021. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html>., Acesso em: agosto 2022

[44] Energy Storage Air battery., [www.aug-wind.com](http://www.aug-wind.com)., Disponível em: <https://www.aug-wind.com/energy-storage>., Acesso em: setembro de 2022.

[45] José Roberto Simões Moreira., “Energias renováveis, Geração Distribuída e Eficiência energética”., 2ª Edição., Capítulo 2., Elementos de Engenharia Termodinâmica., Pág. 27

[46] Menezes, M.V.P.; Vilasboas, I.F.; da Silva, J.A.M. “Liquid Air Energy Storage System (LAES) Assisted by Cryogenic Air Rankine Cycle (ARC)”. *Energies* 2022, Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15082730>>., Acesso em: 06.10.2022.

[47] U.S. Particle Accelerator School Education in Beam Physics and Accelerator Technology., “Refrigeration & Liquefaction”., Disponível em: < [https://uspas.fnal.gov/materials/10MIT/Lecture\\_2.1.pdf](https://uspas.fnal.gov/materials/10MIT/Lecture_2.1.pdf)>., Acesso em:

06.10.2022.

[48] Jihong Wang, Xing Luo, Christopher Krupke and Mark Dooner., Livro: “Energy Storage”., 2017., Chapter 3., Compressed Air Energy Storage., Pág. 89., Schematic Layout of a LAES Plant.

[49] Rafi d Al-Khoury & Jochen Bundschuh., Livro: “Computational Models for CO2 Geo-sequestration & Compressed Air Energy Storage”., Ano de 2014., Capítulo 1., pág 5.,

[50] Nancy Hall., “Gas Pressure”., maio 2021., disponível em:<<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pressure.html>>., Acesso em agosto de 2022

[51] Nancy Hall., “Work Done by a Gas”., maio 2021. Disponível em:<<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/work.html>>., Acesso em agosto de 2022

[52] Nancy Hall., “Gas Temperature”., maio 2021. Disponível em:<<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/temptr.html>>., Acesso em 14.09.2022.

[53] Published By Direction Of Commander, Naval Sea Systems Command., “U.S. Navy Diving Manual”, Revision 7, 01 DECEMBER 2016., pág 144., disponível em:<[https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/SUPSALV/Diving/US%20DIVING%20MANUAL\\_REV7.pdf?ver=2017-01-11-102354-393](https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/SUPSALV/Diving/US%20DIVING%20MANUAL_REV7.pdf?ver=2017-01-11-102354-393)>., Acesso em: agosto 2022.

[54] Melissa Soares Caetano., “Termodinâmica Aula 1”., Universidade Federal de Ouro Preto Instituto de Ciências Exatas e Biológicas Departamento de Química., Disponível em: <<http://professor.ufop.br>>., Acesso em: agosto 2022.

[55] Paul Lindeberg., 6th Edition., Livro: “Compressed Air Manual”, September 1998., Capítulo 1; Página 13; 1.2.3 Thermal capacity; 1.2.4 Work; 1.2.5 Power; 1.2.6 Volume rate of flow.

[56] Wolfgang Littmann., 2022., “Compressed Air Energy Storage - CAES”., Disponível em: < <https://www.erneo.de/en/caes-erneo/our-concept.html>> Acesso em: 14.10.2022.

[57] Catarina Matos., “large scale underground energy storage for renewables integration: general criteria for reservoir identification and viable technologies”., Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/75982369.pdf>>., Acesso em: 04.10.2022.

[58] A Gazeta., “11 áreas de sal-gema no ES são compradas por quatro empresas”., 2021., Disponível em: < <https://www.agazeta.com.br/es/economia/11-areas-de-sal-gema-no-es-sao-compradas-por-quatro-empresas-0921>>., Acesso em: 04.10.2022.

[59] Braskem Alagoas., “Encerramento Definitivo da Extração de Sal”., novembro de 2019., Disponível em: < <https://www.braskem.com.br/encerramento-definitivo-da-extracao-de-sal>>., Acesso em: 04.10.2022.

[60] Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE)., Disponível em:<<https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908>>., Acesso em: 04.10.2022.

[61] Wolfgang Littmann., 2022., “Salt Deposits”., Disponível em: < <https://www.erneo.de/en/salt-caverns/salt-deposits.html>> Acesso em: 11.10.2022.

[62] Kendall Mongird, Vilayanur Viswanathan, Jan Alam, Charlie Vartanian, Vincent Sprenkle, Pacific Northwest., “2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment”., Disponível em: <

[https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/CAES\\_Methodology.pdf](https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/CAES_Methodology.pdf)>.,  
Acesso em: 11.10.2022.

[63] David J. Evans., Gideon Carpenter., Gareth Farr., “Mechanical Systems for Energy Storage – Scale and Environmental Issues. Pumped Hydroelectric and Compressed Air Energy Storage”., Disponível em: <  
<https://core.ac.uk/download/pdf/266986088.pdf>> Acesso em: 11.10.2022.

[64] Daniel Rodríguez, Matheus B. de A. Barros, Jorge R. Henríquez, Manuel Perdomo., “Análise Energética E De Confiabilidade De Um Sistema De Armazenamento De Energia Por Ar Comprimido Com Armazenamento De Ar A Volume Constante”., 2020., Disponível em:  
<[https://www.researchgate.net/publication/356972839\\_Energy\\_and\\_reliability\\_analysis\\_of\\_a\\_compressed\\_air\\_energy\\_storage\\_system\\_with\\_a\\_constant\\_volume\\_air\\_storage](https://www.researchgate.net/publication/356972839_Energy_and_reliability_analysis_of_a_compressed_air_energy_storage_system_with_a_constant_volume_air_storage)>., Acesso em 22.09.2022.

[65] Hydrostor., “Goderich Energy Storage Facility”., (World’s First Commercial A-CAES Facility & Energy Storage North America (ESNA) 2019 Innovation Award Recipient)., Disponível em:< <https://www.hydrostor.ca/goderich-a-caes-facility/>>., Acesso em: 25.09.2022.

[66] Hydrostor., “Hydrostor and NRStor Announce Completion of World’s First Commercial Advanced-CAES Facility”., November 25, 2019 (Toronto, Ontario) – Ontario Project Selected as Energy Storage North America 2019 Innovation Award Winner., Disponível em: <<https://www.hydrostor.ca/news-press-1/>>., Acesso em: 25.09.2022.

[67] Dan Gearino., “Inside Clean Energy: Here’s How Compressed Air Can Provide Long-Duration Energy Storage”., December 2, 2021., (A Canadian company wants to use compressed air to store energy in California.), Disponível em: <<https://insideclimatenews.org/news/02122021/inside-clean-energy-compressed-air-energy-storage/>>., Acesso em: 25.09.2022.

[68] Seetao., “Jiangsu salt cavern compressed air energy storage project put into

operation”., Disponível em: <<https://www.seetao.com/details/159902.html>>  
Acesso em: 24.09.2022.

[69] Jidai Wang, Kunpeng Lu, Lan Ma, Jihong Wang, Mark Dooner, Shihong Miao, Jian Li, Dan Wang., “Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development”., 2017., Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/991/htm>>., Acesso em: 24.09.2022

[70] Andy Colthorpe., “China’s compressed air energy storage industry makes progress”., Disponível em: <<https://www.energy-storage.news/chinas-compressed-air-energy-storage-industry-makes-progress/>>., Acesso em: 24.09.2022.

[71] Tsinghua University., “Jintan Salt Cave Compressed Air Energy Storage Project, a National Pilot Demonstration Project Co-developed by Tsinghua University, Passed the Grid Incorporation Test”., Disponível em: <<https://www.eea.tsinghua.edu.cn/en/info/1038/2062.htm>>., Acesso em 24.09.2022

[72] Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences., “Energy Storage R&D Center”., Disponível em: <<http://english.iet.cas.cn/Institute/6/>>., Acesso em: 24.09.2022.

[73] Giles Parkinson., “Storage proponent for huge Broken Hill micro-grid fails to land finance for pilot plant”., 14 August 2020., Disponível em: <<https://reneweconomy.com.au/storage-proponent-for-huge-broken-hill-micro-grid-fails-to-land-finance-for-pilot-plant-62075/>>., Acesso em: 30/09/2022.

[74] Australian Renewable Energy Agency (ARENA)., “Hydrostor Angas A-CAES Project”., Disponível em: <<https://arena.gov.au/projects/hydrostor-angas-a-caes-project/#>>., Acesso em: 30/09/2022.

[75] Modern Power Systems is a product of Progressive Media International.,

“The first CAES merchant”., 2001., Disponível em: <<https://www.modernpowersystems.com/features/featurethe-first-caes-merchant/>>., Acesso em: 25.09.2022.

[76] The Hydrodynamics Group., “C.A.E.S. Technology Norton CAES Facility”., Ano da publicação 2000., Disponível em: <<http://hydrodynamics-group.net/norton.html>>., Acesso em: 25.09.2022.

[77] L. Geissbühlera, V. Becattinia, G. Zanganehb, S. Zavattonic, M. Barbatoc, A. Haselbachera, A. Steinfelda., “Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 1: Plant description and tests with sensible thermal-energy storage”., 2018., Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/323642861\\_Pilotscale\\_demonstration\\_of\\_advanced\\_adiabatic\\_compressed\\_air\\_energy\\_storage\\_Part\\_1\\_Plant\\_description\\_and\\_tests\\_with\\_sensible\\_thermal-energy\\_storage/download](https://www.researchgate.net/publication/323642861_Pilotscale_demonstration_of_advanced_adiabatic_compressed_air_energy_storage_Part_1_Plant_description_and_tests_with_sensible_thermal-energy_storage/download)> ., Acesso em: 25.09.2022.

[78] Energy Media., “Compressed-Air Storage for Commercial Applications”., 30 Oct 2021., by pv-magazine.com., Disponível em: <<https://www.world-energy.org/article/20848.html>>., Acesso em: 25.09.2022.

[79] Augwind., “Energy Storage AirBattery”., Disponível em: <<https://www.augwind.com/energy-storage>>., Acesso em 27/09/2022.

[80] Danielle Fong., 2022., “Long overdue updates RE: LightSail Energy”., Insights By Danielle Fong., Disponível em: <<https://daniellefong.com/>>., Acesso em: 22.09.2022.

[81] Alacaes., “Creating Sustainable Energy Solutions for a Brighter Future”., Disponível em: <<https://alacaes.com/technology/concept/>>., Acesso em: 21.10.2022.

[82] RWE Power., “Adele – Adiabatic Compressed-Air Energy Storage For

Electricity Supply”., Disponível em: < <https://www.bing.com/search?q=ADELE+-+ADIABATIC+COMPRESSED-AIR+ENERGY+STORAGE+FOR+ELECTRICITY+SUPPLY&cvid=4f8554b024da441abe6d520dd7a3d6ef&aqs=edge..69i57.1001j0j1&pglt=297&FORM=ANNTA1&PC=SMTS>>., Acesso em 27/09/2022.

[83] John Cox., “State advances east Kern energy storage project”., Jul/2022., Disponível em: < [https://www.bakersfield.com/news/state-advances-east-kern-energy-storage-project/article\\_79f229c2-046e-11ed-9503-17f35d32ad90.html](https://www.bakersfield.com/news/state-advances-east-kern-energy-storage-project/article_79f229c2-046e-11ed-9503-17f35d32ad90.html)>., Acesso em: 30/09/2022.

[84] Silver City., “Silver City Energy Storage Centre”., Disponível em: < <https://www.silvercityenergystorage.com/>>., Acesso em: 02.10.2022.

[85] Ryan Kennedy., “Hydrostor planeja armazenamento de energia de ar comprimido de 400 MW / 3200 MWh”., 23 de novembro de 2021., Disponível em: < <https://pv-magazine-usa.com/2021/11/23/hydrostor-plans-400-mw-3200-mwh-compressed-air-energy-storage/>>., Acesso em: 02/10/2022.

[86] Hydrostor., “Pecho Energy Storage Center”., (Safe, Reliable and Emissions-Free Long Duration Energy Storage)., Disponível em:< <https://www.hydrostor.ca/pecho-energy-storage-center//>>., Acesso em: 10.02.2022.

[87] Malea Martin., “Another energy storage facility could come to the Central Coast”., December 02, 2021., Disponível em:< <https://www.newtimeslo.com/sanluisobispo/another-energy-storage-facility-could-come-to-the-central-coast/Content?oid=11799822>>., Acesso em: 10.02.2022.

[88] Haddington Ventures., February 6, 2019., “Renewable Integration and Compressed Air Energy Storage (CAES)”., Disponível em: < <https://img1.wsimg.com/blobby/go/6106b5bb-49bc-4158-a059-0521e75806a7/downloads/12.%20Sam%20Pyne%20CAES%20HaddingtonVen>

tures.pdf?ver=1627432506426>., Acesso em: 02.10.2022.

[89] Apex CAES., “Bethel Energy Center”., 2022., Disponível em: <  
<http://www.apexcaes.com/bethel-energy-center>>., Acesso em: 02.10.2022.

[90] Energy Cast Podcast., “Episode 57 | Subterranean Storage | Apex CAES”.,  
APRIL 29, 2019., Disponível em: < <https://energy-cast.com/57-apex.html>>.,  
Acesso em: 02.10.2022.