

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

BRUNO GUIMARÃES MOTHÉ

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR COMPRESSÃO DE AR NO BRASIL

Macaé, 02 de julho de 2020

BRUNO GUIMARÃES MOTHÉ

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR COMPRESSÃO DE AR NO BRASIL

Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: Uma Abordagem Técnica e Integrada.

Orientador: D.Sc. DIEGO CUNHA MALAGUETA

Macaé, 02 de julho de 2020

333.79  
M918d  
2020

Mothé, Bruno Guimarães

Análise da viabilidade de implantação de um sistema de armazenamento de energia por compressão de ar no Brasil / Bruno Guimarães Mothé. --- Macaé: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Laboratório de Meteorologia, 2020.

63 f. : il.

Monografia (Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada)

Orientador: Diego Cunha Malagueta.

Bibliografia: f. 54-57

1. CAES 2. Energia renovável 3. Planejamento energético I. Título.


BRUNO GUIMARÃES MOTHÉ

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR COMPRESSÃO DE AR NO BRASIL

Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada.

Aprovado em 02 de julho de 2020

BANCA EXAMINADORA



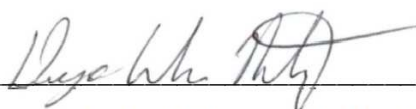
---

Prof. Marcelo Silva, M.Sc., UFRJ



---

Prof.ª Eliane Barbosa Santos, D.Sc., UENF



---

Prof. Diego Cunha Malagueta, D.Sc., UFRJ

(Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e a Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo ensino gratuito e de qualidade.

À professora Maria Gertrudes Justi que, com seu jeito extremamente carismático e acolhedor, sempre incentivou a turma de pós-graduação a continuar, mesmo diante a tantas dificuldades.

Ao professor e orientador Diego Cunha Malagueta que me apoiou, abraçando a ideia e dedicou grande parte do seu tempo nos direcionamentos necessários.

A todos os excelentes professores do curso que, sem exceção, compõem um quadro muito rico e valioso nas duas instituições de origem.

Agradeço também a todos os técnicos e administrativos das duas universidades que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso deste curso e apoio aos discentes.

Reconheço o apoio da minha esposa Cristiane Rosário que, apesar da distância nesse período do curso, sempre me incentivou, de forma muito complacente, a concluir o curso.

Gratifico os professores e às escolas estaduais do Estado do Rio de Janeiro, CE Dr Thiers Cardoso, E.T.E João Barcelos Martins e ao Programa Universidade para Todos, pelo qual obtive bolsa integral de estudo para o ensino superior. Sem os quais, eu não teria alcançado meus objetivos.

## RESUMO

Este trabalho trata a necessidade do Brasil de se antecipar e prever formas de armazenamento da energia elétrica produzida, principalmente, através das fontes renováveis eólicas e solar fotovoltaicas, que tendem a criar um pico de produção diário gerando excedentes que podem ser utilizados em momento mais adequado. O escopo do trabalho vem num momento muito propício, no qual o governo brasileiro reconhece a necessidade de aplicação de sistemas de armazenamento de energia, no plano decenal da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) de 2017 – 2027, publicado em 2018, tendo como objetivo a simulação de um sistema de armazenamento de energia para o cumprimento do plano decenal e a verificação do rendimento desse sistema. Para analisar uma das possibilidades que o governo poderá ter nos próximos anos, foi realizada uma análise do panorama mundial da tecnologia de armazenamento de energia através da compressão de ar e a possibilidade de aplicação no Brasil. Foi realizada uma simulação de um sistema de armazenamento de energia através da compressão do ar, através do software DWSIM e, com a simulação foi possível verificar que a eficiência do processo de armazenamento está próxima de 64%. Para atendimento ao plano decenal, a planta de armazenamento deveria ser projetada com capacidade acima ao exposto no trabalho, em 35%.

Palavras-chave: CAES. Energia renovável. Planejamento Energético.

## **ABSTRACT**

This work deals with Brazil's need to anticipate and predict ways of storing the electric energy produced, mainly through renewable wind and solar photovoltaic sources, which tend to create a peak in daily production generating surpluses that can be used at a more appropriate time. The scope of the work comes at a very favorable moment, when the Brazilian government recognizes the need to apply energy storage systems, in the ten-year plan of the energy research company (EPE) 2017 - 2027, published in 2018, with the objective of the simulation of an energy storage system to comply with the ten-year plan and the verification of the system's performance. To analyze one of the possibilities that the government may have in the coming years, an analysis of the world panorama of energy storage technology was carried out through air compression and the possibility of application in Brazil. A simulation of an energy storage system was carried out through air compression, using the DWSIM software and, with the results, it was possible to compare with the ten-year plan.

Keywords: CAES. Renewable energy. Energy Planning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Matriz Energética Mundial .....	14
Figura 02 – Matriz Elétrica Brasileira .....	15
Figura 03 – Evolução da capacidade Instalada .....	17
Figura 04 – Diagrama Esquemático do Turbogenerador (A) e do CAES (B) .....	25
Figura 05 – Compressor axial em corte .....	27
Figura 06 – Compressor centrífugo em corte .....	29
Figura 07 – Turboexpansor em corte .....	30
Figura 08 – Sistema SF-CAES .....	31
Figura 09 – Sistema NSF-CAES .....	32
Figura 10 – Sistema LAES .....	33
Figura 11 – Vista Aérea da Planta McIntosh, USA.....	34
Figura 12 – Esquemático da Planta McIntosh, USA.....	35
Figura 13 – Vista Interna da Planta McIntosh, USA.....	35
Figura 14 – Tela Inicial do <i>Software</i> DWSIM.....	37
Figura 15 – Ambiente do <i>Software</i> DWSIM.....	38
Figura 16 – Esquemático do Compressor .....	39
Figura 17 – Esquemático do Expansor .....	39
Figura 18 – Esquemático do Resfriador .....	40
Figura 19 – Esquemático do Aquecedor .....	40
Figura 20 – Processo em McIntosh.....	43
Figura 21 – Planta de Compressão e Expansão .....	44
Figura 22 – Fluxograma do Processo de Simulação e Obtenção de Dados .....	47



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Técnicas das Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	19
Tabela 2 – Parâmetros Técnicos de Distintos Tipos de Baterias Recarregáveis.....	23
Tabela 3 – Variáveis Fornecidas ao <i>Software</i> .....	41
Tabela 4 – Energia Consumida para a Compressão do Ar.....	48
Tabela 5 – Total de Energia Gerada na Expansão.....	49
Tabela 6 – Energia Consumida para o Resfriamento do Ar.....	49
Tabela 7 – Energia Consumida para o Aquecimento do Ar.....	50
Tabela 8 – Total de Energia Consumida no Processo.....	50

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABEEOLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CAES – Compressed Air Energy Storage

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GEE – Gases de Efeito Estufa

LAES – Liquid Air Energy Storage

NSF-CAES - Not Supplementary Fuel Compressed Air Energy Storage

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PHS – Hidrelétrica Reversível

PROEÓLICA – Programa Emergencial de Energia Eólica

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SF-CAES – Supplementary Fuel Compressed Air Energy Storage

SMES – Supercondutores

TES – Armazenamento de Energia Térmica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{W}_e$	Trabalho específico	kJ/kg
$\dot{Q}$	Calor transmitido	W
$\dot{m}$	Vazão mássica	Kg/s
$h_{std}$	Entalpia estática do gás na descarga	KJ/Kg
$h_{sts}$	Entalpia estática do gás na sucção	KJ/Kg
$M_u$	Número de Mach do impelidor	-
$c_d$	Velocidade do gás no bocal de descarga do compressor	m/s
$c_s$	Velocidade do gás no bocal de sucção do compressor	m/s
$z_d$	Altura do bocal de descarga	m
$z_s$	Altura do bocal de sucção	m
$\eta_p$	Eficiência politrópica final	-
$h$	Entalpia específica	kJ/kg
$\Delta h$	Diferença de entalpias específicas entre os bocais de sucção e descarga	kJ/kg
$P$	Potência cedida no eixo do compressor	kW
$Q$	Parâmetro a ser estudado para cálculo da incerteza	-
$R$	Constante universal dos gases	kJ/kmol.K
$T$	Temperatura do gás	K
$f$	Função	-
$g$	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$p$	Pressão absoluta	MPa
$u$	Energia interna específica	kJ/kg
$v$	Volume específico	m <sup>3</sup> /kg
$\tau$	Fator de transferência de trabalho	-
$\varphi$	Coeficiente de fluxo	-

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 PANORAMA GERAL DA ENERGIA NO BRASIL.....	14
2.2 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	15
2.2.1 Energia Eólica.....	16
2.2.2 Energia Solar.....	18
2.3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	18
2.3.1 Sistema de Hidrelétrica Reversível.....	19
2.3.2 Volante Inercial.....	20
2.3.3 Supercapacitores.....	20
2.3.4 Supercondutores.....	21
2.3.5 Sistema de Armazenamento Térmico.....	21
2.3.6 Combustível Solar.....	21
2.3.7 Células a Combustível.....	22
2.3.8 Baterias Recarregáveis.....	23
2.3.9 Armazenamento de Energia Através da Compressão do Ar.....	23
2.3.9.1 Componentes do Sistema CAES .....	26
2.3.9.1.1 Motor e Gerador Elétrico .....	26
2.3.9.1.2 Processos de Compressão e Expansão de Ar .....	26
2.3.9.1.3 Reservatório .....	30
2.3.9.1.4 Combustível para Aquecimento .....	31
2.3.10 Classificação dos Sistemas .....	31
2.3.11 Sistema Auxiliar de Armazenamento de Energia Térmica .....	33
2.3.12 Plantas de Larga Escala em Operação .....	33
3. METODOLOGIA .....	36
3.1 DADOS BÁSICOS DE CONHECIMENTO A RESPEITO DO PROCESSO.....	36
3.2 BASE DA SIMULAÇÃO DO CAES.....	36
3.3 SOFTWARE DWSIM PARA SIMULAÇÃO.....	36
3.3.1 Biblioteca de Propriedades Termofísicas CoolProp.....	38

3.3.2	Compressores e Expansores.....	38
3.3.3	Resfriadores e Aquecedores.....	38
3.3.4	Composições e Vazões Utilizadas.....	40
3.3.5	Parâmetros Avaliados.....	42
3.4	APLICAÇÃO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO – SIMULAÇÕES.....	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.	CONCLUSÕES.....	52
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
	ANEXO A – EQUAÇÕES RELEVANTES AO TRABALHO.....	58
	ANEXO B – EQUAÇÕES UTILIZADAS PELO DWSIM.....	61
	ANEXO C – RESULTADOS OBTIDOS NO DWSIM.....	63

## 1 INTRODUÇÃO

Mundialmente, o crescente consumo de energia faz com que a expansão das matrizes energéticas seja imprescindível, e implique na busca por fontes energéticas mais limpas. Tal demanda incentiva a pesquisa dessa área do conhecimento, especialmente no que diz respeito às fontes eólicas e solares fotovoltaicas, que têm mostrado que resultarão nos maiores índices de crescimento ao longo dos próximos anos. Estas fontes de energia possuem uma característica intermitente e têm produção nos períodos de maior intensidade dos ventos para a energia eólica e de maior insolação para a energia solar fotovoltaica, resultando num pico de produção de energia.

Mediante a tal problemática, faz-se necessária a realização de estudos com relação às formas de armazenamento dessa energia excedente, bem como a discussão e análise quanto ao seu dimensionamento, melhor adaptabilidade às características locais e à rede. A medida que a energia solar fotovoltaica e eólica possuam maiores valores percentuais da geração total de energia elétrica no país, aumentará cada vez mais a necessidade de implantação de formas de armazenamento de energia.

O plano decenal da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) sinaliza a necessidade de inclusão de sistemas de armazenamento de energias e, como vem enfrentando dificuldades para soluções a curto prazo, está alocando usinas termelétricas para suprir essa demanda. Calcula-se que a partir de 2022 já iniciarão essas demandas, podendo chegar ao entorno de 13 200MW em 2027. Desse total, aproximadamente 2 500 MW foram indicados na região Nordeste, a partir de 2025, 3 700 MW na região Sul, a partir de 2022, e 7 000 MW na região Sudeste/Centro-Oeste, a partir de 2023 (EPE, 2018).

Mediante a esses aspectos, torna-se urgente os estudos com relação às melhores alternativas para possibilitar o planejamento da geração de energia e garantia de suprimento no país. Nesse aspecto, algumas formas de armazenamento de energia têm se mostrado promissoras como, por exemplo, o armazenamento através de baterias, a roda livre, estações de bombeamento reversível, em bobinas supercondutoras, supercapacitores, armazenamento de energia térmica, dentre outros, como o realizado através de compressão de ar, que será analisado nesta pesquisa. O *compressed air energy storage* (CAES) ou sistema de armazenamento de energia por compressão de ar é uma forma de armazenamento já desenvolvida e com plantas instaladas na Alemanha e nos Estados Unidos da América (CHEN *et al.*, 2016).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é investigar o funcionamento, rendimento do CAES e o dimensionamento para atender ao plano decenal, assim como iniciar a discussão para implantação numa usina solar fotovoltaica no Brasil. Realizado em um momento oportuno, onde as fontes limpas de energia tendem a crescer bastante, este estudo pode ser de grande valia para o planejamento energético nacional.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PANORAMA GERAL DA ENERGIA NO BRASIL

O mundo vem tomando ciência que é necessário diminuir a dependência por combustíveis fósseis, principalmente carvão natural e o petróleo. Assim, a busca por energia mais barata, renovável e com características propícias à substituição dos combustíveis fósseis está crescendo (VIDAL, 2000). Com a introdução das fontes renováveis, o armazenamento de energia é uma possível solução para a problemática da sazonalidade oriunda de fontes intermitentes, tais como a energia solar fotovoltaica e eólica. Trata-se de uma forma de guardar a energia produzida num período do dia para posterior uso. A energia oriunda de hidrocarbonetos foi, e continua a ser, a principal fonte de energia em escala mundial. O petróleo (e derivados) é a fonte mais utilizada, seguida do gás natural e carvão, conforme pode ser verificado na Figura 1.

### MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

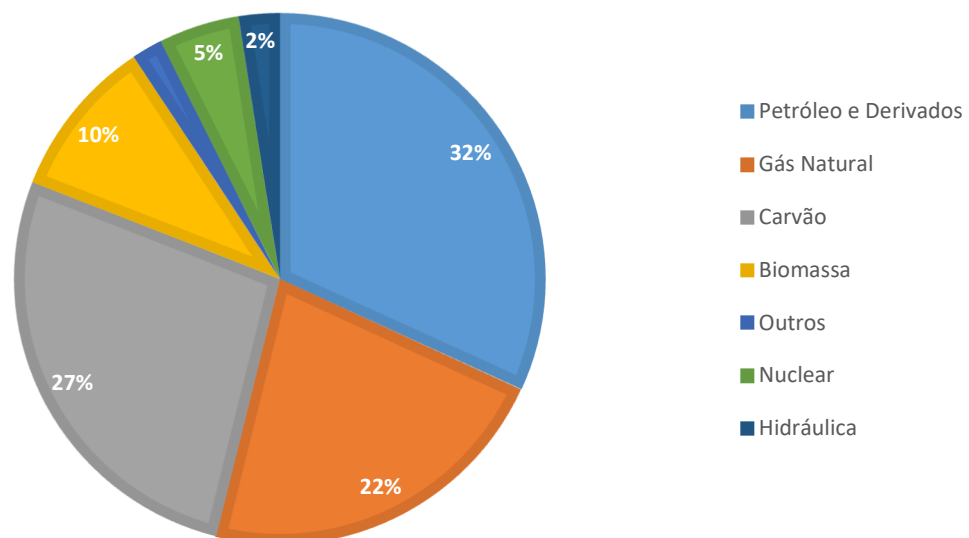


Figura 01 – Matriz Energética Mundial. Fonte: ABEEÓLICA (2018)

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) com a utilização de petróleo, carvão e óleo combustível para geração de energia é muito alta. O relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change*, diz que é necessário que sejam realizadas modificações na forma de obtenção



de energia e na mitigação das emissões de GEE (PACHAURI; REISINGER, 2008). A possibilidade de escassez desses recursos, a necessidade de diversificação da matriz energética e a mitigação das emissões de GEE tem alterado a forma de planejamento energético dos países e, no Brasil não é diferente. Leilões de energia realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Ministério de Minas e Energia têm blocos específicos para contratação de energias alternativas e/ou renováveis. Segundo os dados de 2018 da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA), o Brasil tem 1,1% de participação da energia oriunda de fonte solar fotovoltaica e 9,0% de energia oriunda de fonte eólica.

## 2.2 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A matriz elétrica brasileira se destaca pela predominância de fontes renováveis e que a coloca entre as mais limpas do mundo. As fontes de energias eólicas e solar fotovoltaicas têm apresentado um aumento significativo nos últimos anos, onde a participação das energias renováveis no setor elétrico aumentaria de 25% em 2017 para 85% até 2050 (ABEEOLICA, 2018). Com esta mudança é possível perceber que, se não houver uma política para antecipação ao problema de armazenamento de energia, o infortúnio será mais intenso futuramente. A Figura 2 traz dados sobre a geração de energia elétrica no Brasil no ano de 2018.

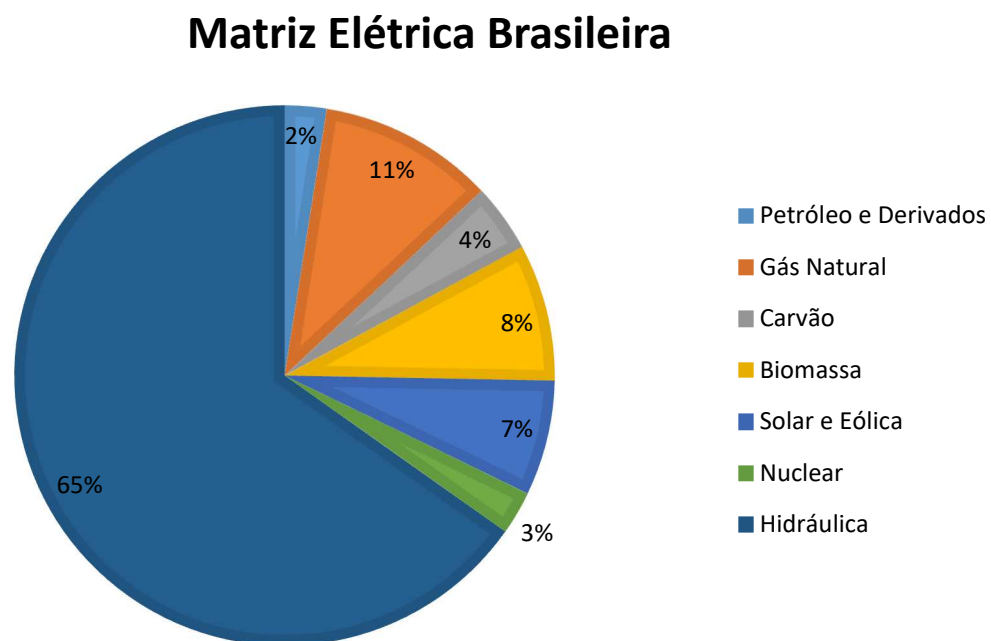


Figura 02 – Matriz Elétrica Brasileira. Fonte: ABEEÓLICA (2018)

### 2.2.1 Energia Eólica

A energia eólica tem o seu primeiro registro de uso para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos, na Pérsia, por volta de 200 A.C. (SHEPHERD, 1990). No Brasil, a energia eólica com fins de geração de energia elétrica tem uma história mais recente, sendo o primeiro aerogerador instalado no arquipélago de Fernando de Noronha em 1992. Durante os dez anos seguintes, a energia eólica pouco cresceu, em parte pela falta de políticas, mas principalmente pelo alto custo da tecnologia (ABEEOLICA, 2018).

O crescimento do setor no Brasil iniciou-se em 2001 com a crise energética, quando ocorreu a tentativa de incentivar a contratação de empreendimentos desta natureza para aumentar a potência de geração de energia do país. Neste período, o programa governamental Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) foi criado com intuito de contratar 1.050MW de projetos eólicos com previsão de entrega em 2003 (ABEEOLICA, 2018). Nesta época já eram discutidos os problemas da intermitência de produção desta fonte e da possibilidade de complementação à sazonalidade da matriz predominante do país, que é a hídrica.

Esse programa não obteve os resultados esperados e acabou por ser substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) que, a partir da sua criação, abriu caminho para instalação de empresas fabricantes de turbinas eólicas e componentes no país, além de incentivar o desenvolvimento das fontes de energias renováveis.

Somente em 2009 ocorreu o primeiro leilão de energia com exclusividade para a fonte eólica, denominado Leilão de Energia de Reserva. Após esse período foram realizados diversos leilões dessa modalidade e é possível verificar no infográfico a curva crescente a partir desse período, na Figura 3.

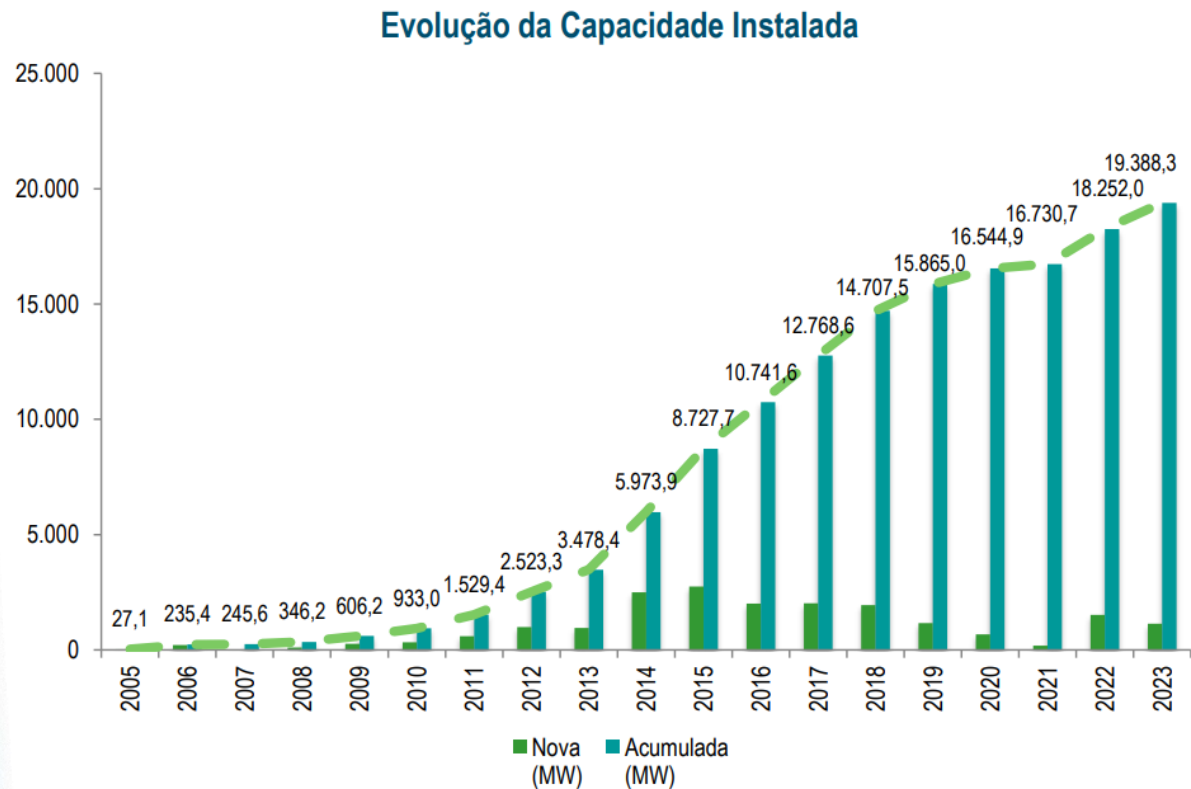


Figura 03 – Evolução da capacidade e contratações futuras. Fonte: ABEEOLICA

Com a produção de energia renovável crescendo, cresce junto a necessidade de compreender melhor os elementos que interferem na variabilidade de disponibilidade dessa energia. O vento, fonte da energia eólica, é sujeito a grandes imprevisibilidades fazendo com que nem toda esta capacidade instalada possa ser aproveitada.

O princípio de funcionamento da turbina eólica está em aproveitar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de giro, que acoplada a um gerador torna possível a conversão em energia elétrica.

Um fluxo mássico de ar que atravessa uma área A, que é proporcional a área de atuação das pás da turbina eólica, é regido pela equação da continuidade da mecânica dos fluidos. A potência final extraída do ar pela turbina é variável, de acordo com o comprimento das pás e características do vento local (velocidade e massa específica). Sendo a velocidade calculada à terceira potência, torna-se um dos principais itens a serem considerados na instalação de um parque eólico. Como o ar, ao passar pelas pás, sofre uma redução da sua velocidade que não chega a zero, a potência extraída é então uma fração da energia disponível no vento, e não da sua totalidade (PATEL, 2005).

### 2.2.2 Energia Solar

Dentre as várias formas de aproveitamento da energia solar, encontra-se a solar fotovoltaica. Essa tecnologia permite a conversão direta da luz em eletricidade através do aproveitamento do efeito fotovoltaico presente em alguns materiais semicondutores.

Montado na forma de painéis fotovoltaicos, eles têm as suas características elétricas dependentes basicamente da irradiação e da temperatura, onde a influência da irradiação é muito mais significativa do que a da temperatura na quantidade de eletricidade produzida. A irradiação pode variar significativamente em curtos intervalos de tempo (da ordem de segundos), especialmente em dias com nuvens (PINHO; GALDINO, 2014).

Ainda segundo Pinho e Galdino (2014), longos períodos de nebulosidade podem fazer com que a geração de energia elétrica fique comprometida.

### 2.3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A defasagem entre a demanda e a produção da energia elétrica oriunda de fontes renováveis como a solar fotovoltaica e eólica ainda é um desafio para a sua maior participação na matriz energética do mundo. Uma possibilidade de aumentar a sua confiabilidade e disponibilidade é conseguir armazenar parte da energia gerada em horários de pico para o consumo posterior, considerando que a ideia do armazenamento de energia objetiva o fornecimento de energia suplementar em períodos de baixa oferta e alta demanda.

Dentre as possibilidades de tecnologias para armazenamento de energia, fatores como o tempo de descarga, a capacidade de armazenagem, custo da tecnologia, durabilidade, autonomia, segurança podem ser determinantes para a escolha. Esses fatores tornam uma tecnologia mais atrativa em relação à outra em acordo com o projeto a ser instalado. (NORTHROP; CONNOR, 2013)

O armazenamento de energia pode ser destinado para altas potências, com um conteúdo de energia relativamente pequeno, ou podem ser concebidos para gestão de energia com capacidade de armazenar grandes quantidades de energia para longos períodos de descarga.

A Tabela 1 mostra algumas características técnicas dos sistemas de armazenamento de energia para os sistemas de hidrelétrica reversível (PHS), volante inercial ou roda livre (Flywheel), armazenamento de energia por compressão de ar (CAES), supercapacitor, supercondutores (SMES), sistema de armazenamento de energia térmica (TES), combustível de fonte solar, célula de hidrogênio, bateria de lítio e bateria chumbo ácido:

Tabela 1: Características Técnicas das Tecnologias de Armazenamento de Energia.

Tecnologia	Densidade de Energia (Wh/L)	Potência Desenvolvida (MW)	Duração do Armazenamento	Tempo de vida (anos)	Tempo de Descarga	Tempo de Ciclos (Ciclos)	Estado de desenvolvimento
PHS	0,5–2	30 – 5.000	Hora - Mês	40-60	1-24H+	10.000-30.000	Maduro
Flywheel	20–80	0,1 – 20	Seg. - Min	15-20	Seg-15Min	20.000	Pré-comercial
CAES	2–6	>=300	Hora - Mês	20-40	1-24H+	8.000-12.000	Pré-comercial
Supercapacitor	2–6	0 – 0,05	Seg. - Hora	1-10	Miliseg - 1H	50.000 +	Comercial
SMES	0,2–6	0,1 – 10	Miliseg - Hora	20-30	>=30min	10.000 +	Demonstrativo / Pré-comercial
TES	80–500	0,1 – 300	Min - Dias	5-30	1-24H+	-	Demonstrativo / Pré-comercial
Combustível Solar	500–10.000	0 – 10	Hora - Mês	-	1-24H+	-	Em desenvolvimento
Célula de Hidrogênio	500–3.000	0 – 50	Hora - Mês	5-20	Seg-24H+	1.000+	Em desenvolvimento / Demonstrativo
Bateria de Lítio	150–500	0 – 100	Min - Dias	5-15	Min-H	1.000-10.000	Demonstrativo
Bateria Chumbo Ácido	50–90	0 – 40	Min - Dias	5-15	Seg.-H	500-10.000	Maduro

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2017)

### 2.3.1 Sistema de Hidrelétrica Reversível

Usinas hidrelétricas que permitem a reversão do caminho da água, através de bombeamento, são chamadas de reversíveis. O principal objetivo deste sistema é utilizar a energia em excesso no sistema elétrico durante horários de pico de produção das fontes renováveis e bombear a água para o reservatório da hidrelétrica para posterior utilização da energia potencial na geração de energia elétrica. Podem ser chamadas de centrais hidrelétricas de acumulação por bombeamento ou Usina Hidrelétrica Reversível.

Esses sistemas aumentam a confiabilidade do sistema elétrico atuando como um reservatório de prontidão de energia, ajudam ainda na adaptação em períodos de déficit hídrico (HUNT; FREITAS; JUNIOR, 2014), como ocorreu no sudeste brasileiro durante a intensa seca de primeira metade da década de 2010.

Uma das desvantagens da Usina Hidrelétrica Reversível é a necessidade de uma topografia que seja altamente favorável à instalação da usina, a fim de evitar altos custos com construção de extensos túneis e condutos para ter acesso à água. Outra desvantagem é o tempo de construção de uma usina reversível, juntamente ao alto investimento de capital em um empreendimento que possui resultados condicionados à políticas energéticas favoráveis, o que pode comprometer a viabilidade econômica (WANG *et al.*, 2017; FLORES, 2018).

### 2.3.2 Volante Inercial

O volante inercial é uma massa girante que acumula energia elétrica na forma de energia cinética rotacional. A quantidade de energia acumulada nesse sistema é proporcional ao momento de inércia da massa girante multiplicada pela velocidade angular (FARHADI; MOHAMMED, 2015). Uma das tentativas mais modernas em aprimorar este sistema consiste na busca por menores índices de atritos, que representam o maior percentual de perda de energia do sistema.

Esse sistema tem a capacidade de liberar de forma muito rápida a energia para o sistema elétrico, porém com baixa densidade energética.

### 2.3.3 Supercapacitores

Diferentemente das outras formas de armazenamento de energia, os supercapacitores armazenam a energia diretamente na forma de energia elétrica, motivo pelo qual apresenta o mais rápido carregamento e descarregamento entre as formas de armazenamento de energias tratadas neste trabalho (FARHADI; MOHAMMED, 2015).

A capacidade de armazenamento do supercapacitor depende da capacitância equivalente e da tensão nos terminais. Outras variáveis secundárias são importantes na variação da capacidade de armazenamento dos supercapacitores tais como: as larguras dos eletrodos e a frequência da tensão nos seus terminais (FARHADI; MOHAMMED, 2015).

As vantagens de utilização dos supercapacitores consistem na versatilidade e no rápido e eficiente carregamento e descarregamento, enquanto a principal desvantagem, que é também

um fator limitante à sua utilização, é a baixa densidade energética quando comparado a outros sistemas de armazenamento de energia.

#### 2.3.4 Supercondutores

Supercondutor é uma tecnologia ainda em estágio inicial de maturidade, na qual se utiliza a corrente contínua passando por uma bobina supercondutora para armazenar a energia através do campo magnético. A energia armazenada pelo sistema de supercondutor é variável de acordo com a indutância apresentada pela bobina, que depende da geometria, do tamanho e seção transversal e da corrente que passa pelo supercondutor (FARHADI; MOHAMMED, 2015).

#### 2.3.5 Sistema de Armazenamento Térmico

O TES é uma tecnologia que estoca energia térmica aquecendo ou esfriando um meio de armazenamento para que a energia armazenada possa ser usada posteriormente em processos de aquecimento/resfriamento e geração de energia. Os sistemas de armazenamento térmico são utilizados em particular em edifícios e em processos industriais. As vantagens do seu uso em um sistema de energia incluem o aumento na eficiência geral e melhor confiabilidade, o que pode gerar melhoria econômica através da redução nos custos de investimento e funcionamento, além de mitigar a poluição do meio ambiente (FARHADI; MOHAMMED, 2015). Esse tipo de sistema será discutido com a integração de um sistema de compressão de ar, no tópico 2.3.10.

#### 2.3.6 Combustível Solar

Com base no processo de fotossíntese das plantas, um catalisador químico realiza reações fotoquímicas do vapor de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  podendo ser reduzido a  $\text{CO}$ , metano e outros combustíveis a base de hidrocarbonetos.

Desde que Fujishima e Honda (1972) demonstraram pela primeira vez o uso da divisão fotocatalítica de  $\text{H}_2\text{O}$  através de  $\text{TiO}_2$ , pesquisas vêm sendo realizadas para desenvolver uma forma de utilizar a energia solar de modo que possa facilitar o seu manuseio, transporte e armazenamento. Neste sentido, Xu *et al.* (2019), descrevem que os combustíveis solares líquidos são uma saída como combustível de baixa emissão de GEE, porém, esse tipo de tecnologia ainda está em estágio inicial de desenvolvimento e pesquisa.

### 2.3.7 Células a Combustível

O sistema de armazenamento de energia através de células de combustível a hidrogênio é a tecnologia de armazenamento mais promissora dentre os sistemas de células. É composto por um eletrolisador, um tanque para estocar o combustível e a célula de combustível. Dentre as suas vantagens estão a tecnologia em estágio maduro, baixo custo e uso de catalisadores não nobres. Suas desvantagens são a baixa densidade de corrente, possibilidade de contaminação (caso os gases entrem em contato) e a formação do eletrólito corrosivo. Segundo Carmo *et al.* (2013), as eficiências desta modalidade variam entre 62–82% e vida útil chegando a 90.000 horas.

O eletrolisador é responsável por realizar a eletrólise da água, dissociando a molécula de água e formando oxigênio e hidrogênio como produtos (DURING FILHO, 2018). É necessário um tanque para armazenamento do hidrogênio comprimido, caso se utilize do método de compressão através de compressores. Em seu estudo, During Filho (2018), afirma que este método tem um grande dispêndio de energia, mas é compensado pelas grandes quantidades de hidrogênio armazenados.

Outra forma de armazenamento do hidrogênio é a liquefação. Nesse processo é necessário o resfriamento do hidrogênio até 22K para que haja a condensação. Também exige grande quantidade de energia e o recipiente deve ser espesso com paredes duplas reforçadas e com isolamento a vácuo para manter a temperatura de condensação. Esse processo tem um gasto de energia para o gás hidrogênio de aproximadamente 30% do próprio potencial combustível (DURING FILHO, 2018).

Um terceiro método é a formação de hidretos metálicos. Os metais, que possuem a capacidade de absorver o hidrogênio através da dissociação do mesmo átomo e posteriormente a sua ligação com os metais, são colocados nos recipientes de armazenagem em finíssimos pós de modo a aumentar a capacidade de armazenamento do hidrogênio no recipiente (DURING FILHO, 2018).

A célula de combustível a hidrogênio permite a conversão direta da energia química em energia elétrica. Fisicamente a célula é uma fina camada de eletrólito entre dois eletrodos conectados a um circuito elétrico externo (DURING FILHO, 2018).

A eficiência elétrica das células de combustível a hidrogênio é em média de 40% para a platina como catalisador e ácido fosfórico como eletrólito, 50% para platina como catalisador



e Nafion como eletrólito e de 65% para platina, níquel ou prata como catalisador e hidróxido de potássio como eletrólito (DURING FILHO, 2018, apud ALASWAD *et al.*, 2016).

### 2.3.8 Baterias Recarregáveis

Baterias são equipamentos com capacidade de armazenar energia elétrica através da energia química. A bateria possui eletrodos, anodo e um catodo que cedem e recebem elétrons para o circuito externo e o eletrólito que realiza a transferência de carga através de íons (LINDEN, 2001).

Os materiais que constituem os eletrodos e os eletrólitos definem os tipos de baterias existentes e as características de operação, assim como o tempo de carga, dependem das combinações destes materiais. Esses materiais também irão afetar a eficiência de conversão da energia elétrica para energia química durante o armazenamento e, para uso posterior, a conversão de energia química em elétrica, mas em todos os casos é considerada alta.

Na Tabela 2, é possível verificar alguns parâmetros técnicos dos distintos tipos de materiais recarregáveis.

Tabela 2 – Parâmetros Técnicos de Distintos Tipos de Baterias Recarregáveis

Parâmetros Técnicos	Tipos de Baterias			
	Chumbo-ácido	Níquel-Cádmio	Níquel Hidreto-Metálico	Lítio-íon
Tensão Nominal na Célula (V)	2.0	1.2	1.2	4.0
Temperatura de Operação (°C)	-40 a 55	-20 a 60	-20 a 50	-20 a 50
Energia Específica (Wh/kg)	10 a 35	10 a 40	75	150
Densidade de Energia (Wh/L)	50 a 90	15 a 100	240	400
Eficiência elétrica (%)	80 - 90	70 - 80	65 - 70	90 - 99
Vida útil em Ciclos	250 - 1500	300 – 10.000	300 - 600	1000+
Vida útil em Anos	2 a 25	2 a 25	2 a 5	Acima de 5

Fonte: During Filho (2018, p. 37 apud ALASWAD *et al.*, 2016; O'HAYRE *et al.*, 2016; BAGOTSKY, 2012).

### 2.3.9 Armazenamento de Energia Através da Compressão do Ar

Algumas tecnologias citadas anteriormente possuem limitações, como no caso das baterias de lítio e supercapacitores. O seu custo, duração e periodicidade de troca são importantes pontos limitantes (CHEN *et al.* 2016).

A PHR apresenta dois fatores limitantes importantes, são eles: a necessidade de água em abundância e a dependência de que a geografia local seja favorável. Também são necessárias condições geológicas para um reservatório inferior e outro superior, ambos de grandes dimensões (CHEN *et al.*, 2016; MENG *et al.*, 2019).

Assim como as demais formas de armazenamento, o CAES também apresenta limitações. Dentre elas, a principal é a necessidade de um reservatório de grandes dimensões (MENG *et al.*, 2019). Em contrapartida, esse método tem grandes vantagens, por exemplo, a potência desenvolvida, a duração do fornecimento de energia e o baixo custo de operação.

O CAES é uma tecnologia desenvolvida a partir das turbinas à gás, que utiliza o excedente da energia produzida através de fontes renováveis para compressão de ar e armazenamento em cavernas de sal ou minas abandonadas, para posterior expansão, produzindo eletricidade de acordo com a necessidade (CHEN *et al.*, 2016).

Outro benefício do sistema de armazenamento de energia na forma de ar comprimido é a eliminação do estágio do compressor da turbina, onde utiliza aproximadamente 60% da energia mecânica produzida pela turbina de potência. Utilizando a energia oriunda da rede para pré-comprimir o ar, o sistema CAES ignora efetivamente a entrada do compressor, resultando em quase toda a energia mecânica da turbina sendo utilizada no gerador elétrico. O CAES efetivamente “armazena” a energia mecânica que seria necessário para girar o compressor da turbina. Turbinas que utilizam ar comprimido podem fornecer quase três vezes a quantidade de energia de uma determinada estrutura de turbina, reduzindo os custos da geração de energia (DENHOLM; KULCINSKI, 2004)

Ainda a respeito da supressão do estágio de compressão, Denholm e Kulcinski (2004) traz que o efeito do CAES sobre o *heat rate* é de cerca de 4.500kJ/kWh (4265 BTU/kWh), contra 10.000kJ/kWh (9500 BTU/kWh) para uma turbina comum ou de 7.000kJ/kWh (6600 BTU/kWh) para um ciclo combinado, a Figura 04 mostra o diagrama esquemático do turbogerador (Figura 4A) e do CAES (Figura 4B).

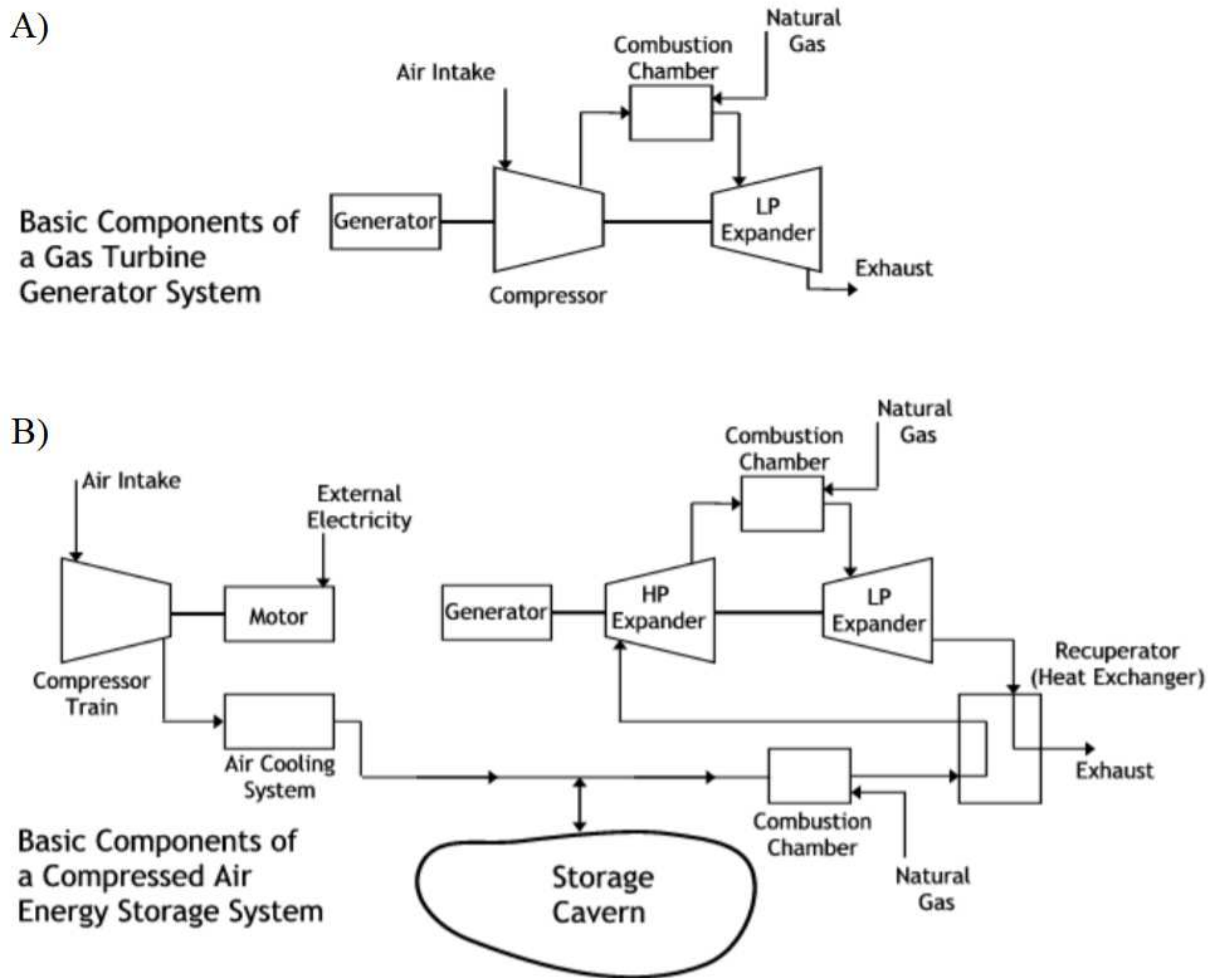


Figura 04 – Diagrama Esquemático do Turbogenerador (A) e do CAES (B). Fonte: Denholm e Kulcinski (2004).

Recentemente bastantes pesquisas envolvendo o CAES têm sido realizadas, principalmente como solução à problemática da sazonalidade das fontes renováveis, podendo ser citado Zhang *et al.* (2017), Nikolakakis e Fthenakis (2017), Simpure *et al.* (2016) e Marano, Rizzo, Tiano (2012).

Destacam-se os estudos voltados à integração com a energia solar fotovoltaica e com a eólica. Zhang *et al.* (2017) desenvolveram um modelo para a compressão adiabática integrada a um parque eólico. A flutuação na potência média pelo parque estudado era 21,05MW até 49,5MW e pode ser estabilizada para 18,5MW com coeficiente de utilização de energia eólica subindo de 26,29% para 70,62%.

Simpure *et al.* (2016) sugeriram um sistema CAES integrado a uma usina solar fotovoltaica para sanar os problemas de intermitência em Reunion, França. Além disso, avaliações econômicas para o CAES integrado a um parque eólico e a uma usina solar

fotovoltaica foram realizadas e constatadas a viabilidade econômica da integração (BALALI *et al.*, 2015; ALAMI *et al.*, 2017).

O princípio de funcionamento do CAES inicia-se na utilização da energia de pico oriundo das fontes renováveis para alimentação de um motor elétrico que irá acionar compressores de ar. O ar é o atmosférico, com tratamento para remoção de partículas sólidas que são agressivas às máquinas que irão realizar a compressão desse ar. A partir do momento em que o ar é comprimido, é direcionado para o seu reservatório. O ar comprimido possui energia concentrada na forma de aumento de pressão e de entalpia. No momento propício à utilização da energia, esse ar é liberado para passar por um turboexpansor que acoplado a um gerador elétrico irá converter a energia mecânica de giro em energia elétrica (WANG *et al.*, 2017).

Os equipamentos desse processo se resumem em compressores, expansores, motores elétricos e geradores elétricos, reservatório e armazenamento térmico, se o projeto incluir.

### 2.3.9.1 Componentes do Sistema CAES

#### 2.3.9.1.1 Motor e Gerador Elétrico

O motor elétrico é o responsável por receber a energia elétrica excedente e convertê-la em energia mecânica de giro para, através do seu eixo acoplado ao compressor centrífugo, realizar o trabalho de acionar o compressor de ar.

O gerador elétrico por sua vez, tem a função de converter a energia mecânica de giro, oriunda do expansor, em energia elétrica. Os principais tipos são: gerador de indução gaiola de esquilo, gerador de indução duplamente alimentado e gerador síncrono de rotor bobinado ou de ímã permanente (WU *et al.*, 2011). O tipo utilizado será definido conforme a necessidade do projeto.

#### 2.3.9.1.2 Processos de Compressão e Expansão de Ar

O processo de compressão de ar é realizado por uma máquina mecânica com a capacidade de comprimir o ar. Chamado de compressor, é definido como sendo uma máquina de fluxo geradora, que tem como finalidade transformar a energia de trabalho de eixo em energia cinética e, posteriormente, em energia de pressão (LÓPEZ RIVAS, 2018).

No CAES, os compressores devem ser acionados por motores elétricos para uso da energia de pico e os tipos mais indicados para utilização desse sistema são os de deslocamento positivo, de palhetas de fluxos axiais e os centrífugos de impelidores, não só pelas grandes vazões na etapa de coleta da atmosfera mas também pelas grandes pressões de descarga.

Os compressores axiais de palhetas possuem dois conjuntos, o rotativo e o estacionário. No conjunto rotativo encontram-se instaladas as palhetas rotativas que são responsáveis por adicionar velocidade cinética ao ar, convertendo energia mecânica de giro em energia cinética no ar. No conjunto estacionário, encontra-se o difusor de entrada, responsável pela admissão e direcionamento do ar, as palhetas estatoras, que realizam a conversão da energia cinética adicionada ao ar pelas palhetas rotativas em energia de pressão, e um difusor de saída, que direciona o fluxo de ar para a admissão do próximo estágio de compressão que normalmente será um compressor do tipo centrífugo (BLOCH; SOARES, 2001).

O compressor de palhetas têm capacidade de comprimir grandes vazões de ar, porém para chegar a pressão de armazenamento é necessário um compressor do tipo centrífugo. A Figura 05 mostra a configuração de um compressor axial de palhetas.

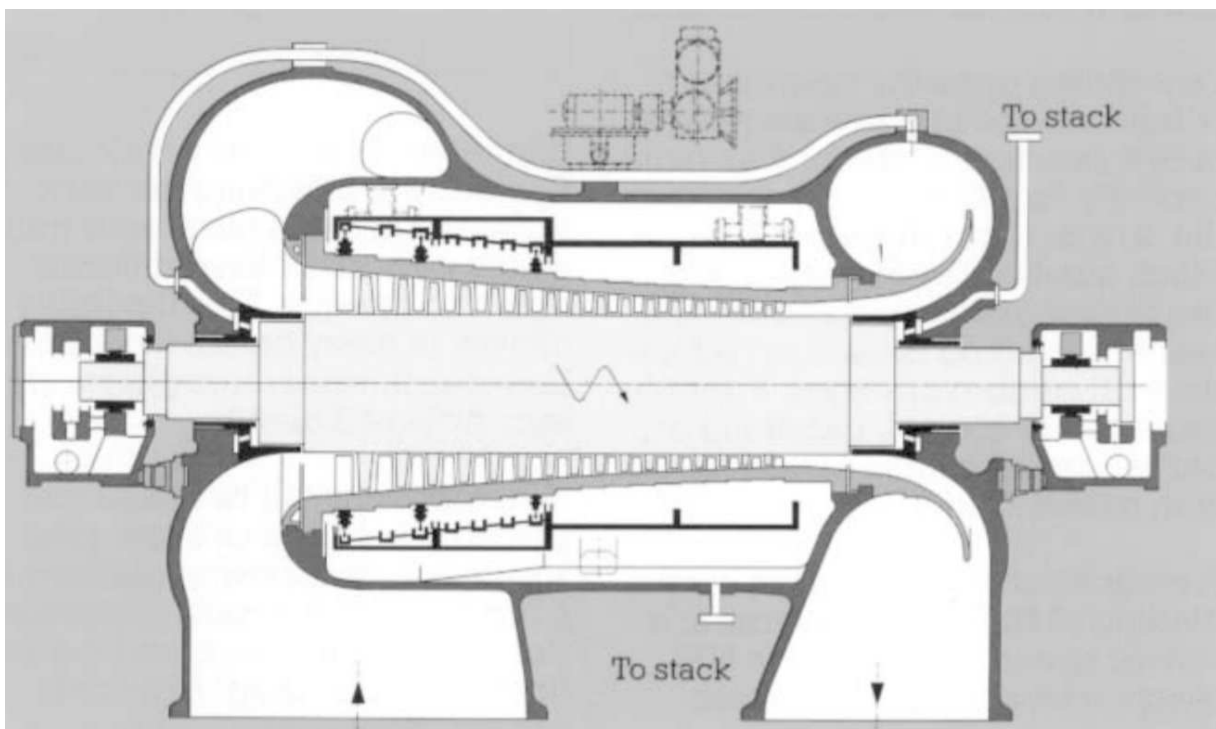


Figura 05 – Compressor axial em corte. Fonte: Bloch e Soares (2001)

O compressor centrífugo é concebido para altas pressões com altas vazões, como é a necessidade do CAES. Como o período de pico costuma ter menor duração que o período de necessidade de utilização da energia, o tempo de enchimento do reservatório deve ser curto.

O projeto desse tipo de máquina consiste em um conjunto rotor, que pode ter um ou mais estágios, e um conjunto estacionário. No conjunto rotor encontram-se os impelidores, que são os responsáveis por converter a energia mecânica de giro em energia cinética ao ar (BLOCH; SOARES, 2001).

No conjunto estacionário, os diafragmas fazem a condução do fluxo de ar que, através do efeito difusor, desaceleram e diminuem a velocidade desse fluxo e aumentam a sua pressão. Vários estágios costumam ser usados para que a sequência de impelidores e diafragmas possam comprimir cada vez mais o ar até a pressão desejada.

De acordo com a equação de estado, para uma substância de fase gasosa com baixa densidade, a pressão, o volume específico e a temperatura são relacionados pela Equação 1:

$$pv = RT \quad (1)$$

Onde,  $R$  é um fator que depende do gás e é chamado de constante universal dos gases,  $p$  é a pressão e  $v$  é o volume.

Durante o processo de compressão do ar, ocorre o aumento da temperatura (POTTER; SCOTT, 2006). Essa temperatura pode ser armazenada para um posterior uso com o processo de expansão do ar aumentando o rendimento do ciclo. A Figura 06 mostra a configuração de um compressor centrífugo.

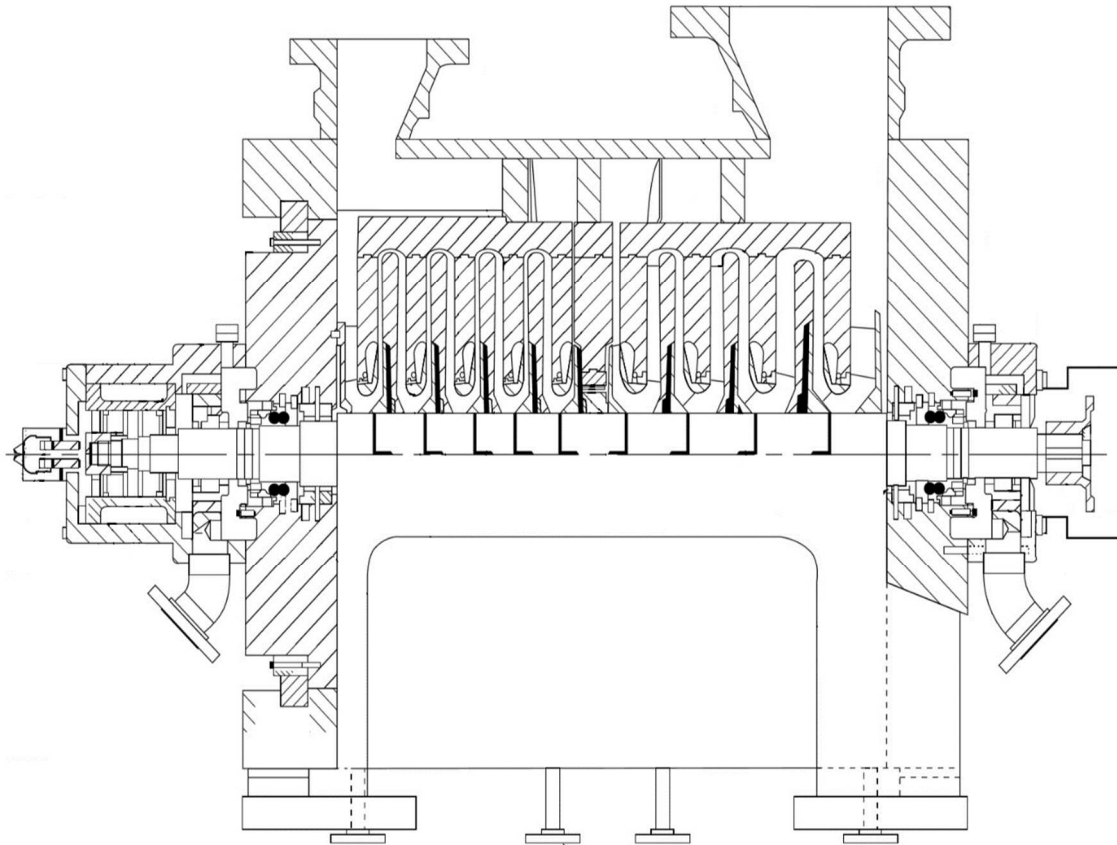


Figura 06 – Compressor centrífugo em corte. Fonte: Adaptado de Standard (2002).

Bloch e Soares (2001) definiram os turboexpansores como turbinas de expansão, máquinas rotativas semelhantes a turbinas a vapor. Geralmente, os termos “turbinas de expansão” e "turboexpansores" excluem especificamente turbinas a vapor e turbinas a gás.

Turboexpansores também podem ser caracterizados como dispositivos rotativos modernos que convertem a energia da pressão de um gás ou fluxo de vapor em trabalho mecânico à medida que o gás, ou vapor, se expande através da turbina. Se o objetivo principal é resfriar a corrente de gás ou de vapor, o trabalho mecânico produzido é frequentemente considerado um subproduto. Se a redução da pressão é o objetivo principal, a recuperação de calor do gás expandido é considerado um subproduto benéfico. Em cada caso, o objetivo principal dos turboexpansores é conservar energia (BLOCH; SOARES, 2001).

Assim, os expansores podem ser definidos como os equipamentos responsáveis por transformar a energia cinética do ar comprimido em energia mecânica de giro. No caso do CAES, este equipamento recebe o fluxo de ar oriundo do reservatório, que expande nas suas palhetas, forçando-o a girar. Para esta aplicação existe projeto construtivo semelhante a um compressor axial, invertendo a posição. As palhetas maiores no expansor recebem primeiramente o fluxo enquanto que no compressor axial as palhetas maiores são as primeiras

a iniciar o processo de compressão do ar (BLOCH; SOARES, 2001). A Figura 07 mostra a configuração de um turboexpansor.

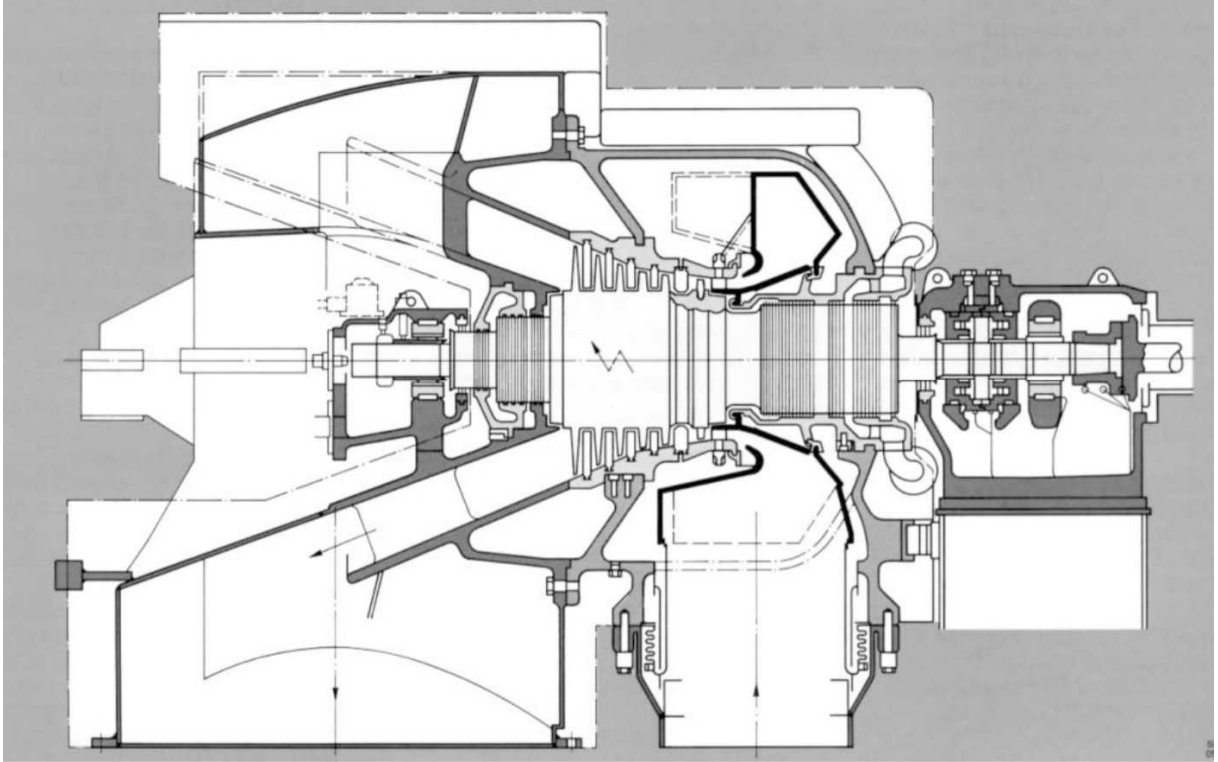


Figura 07 – Turboexpansor em corte. Fonte: Bloch e Soares (2001).

#### 2.3.9.1.3 Reservatório

O reservatório para o CAES de grande escala deve ser de grandes dimensões e esta é a questão chave para implementação de sistemas de grande porte. O tempo de fornecimento de energia e a capacidade de geração dependem diretamente do volume de armazenamento.

Sistemas de grande escala atualmente em operação utilizam cavernas de sal, no subsolo, para o armazenamento de ar. Esse tipo de reservatório pode ser uma formação natural ou escavada manualmente para esta finalidade, porém é extremamente dependente de condições geológicas (CHEN *et al.*, 2016).

Nos projetos de pequenas escalas são utilizados vasos de pressão, tanques de alta resistência e tubos de aços para altas pressões, de modo a reduzir a dependência das condições geológicas e torná-los mais flexíveis operacionalmente.



#### 2.3.9.1.4 Combustível para Aquecimento

De acordo com cada projeto, o sistema pode ou não possuir pré-aquecedores do ar. Com a expansão do ar, o calor latente é removido podendo causar o congelamento dos componentes. O pré-aquecimento pode ser realizado através de câmaras de combustão, semelhantes às de turbinas a gás, onde um combustível é adicionado ao ar para a realização da combustão. Normalmente o combustível utilizado é o gás natural (CHEN *et al.*, 2013).

#### 2.3.10 Classificações do CAES

Conforme Chen *et al.* (2013), as classificações para os sistemas CAES foram realizadas de acordo com a necessidade ou não de combustível suplementar. O sistema que utiliza suplemento de combustível chama-se *Supplementary Fuel Compressed Air Energy Storage* (SF-CAES) e o que não necessita chama-se *Not Supplementary Fuel Compressed Air Energy Storage* (NSF-CAES). O SF-CAES tem um fator impactante que é o uso de combustível fóssil e a poluição oriunda da combustão do gás. A Figura 08 mostra o sistema SF-CAES de forma esquemática.

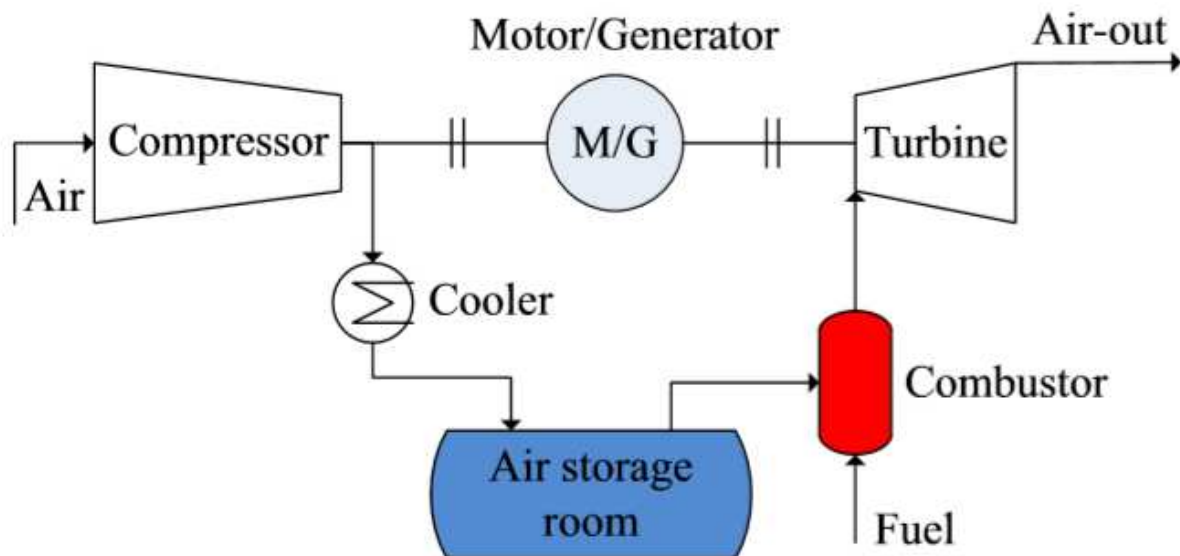


Figura 08 – Sistema SF-CAES. Fonte: Chen *et al.* (2013).

Já o NSF-CAES se distingue por coletar e armazenar o calor oriundo do processo de compressão do ar, através de sistemas de armazenamento térmico, para a posterior utilização no processo de expansão do ar (CHEN *et al.*, 2013).

A título de curiosidade, o sistema NSF-CAES pode suprir carga térmica de frio, calor e eletricidade, simultaneamente. A Figura 09 mostra o NSF-CAES.

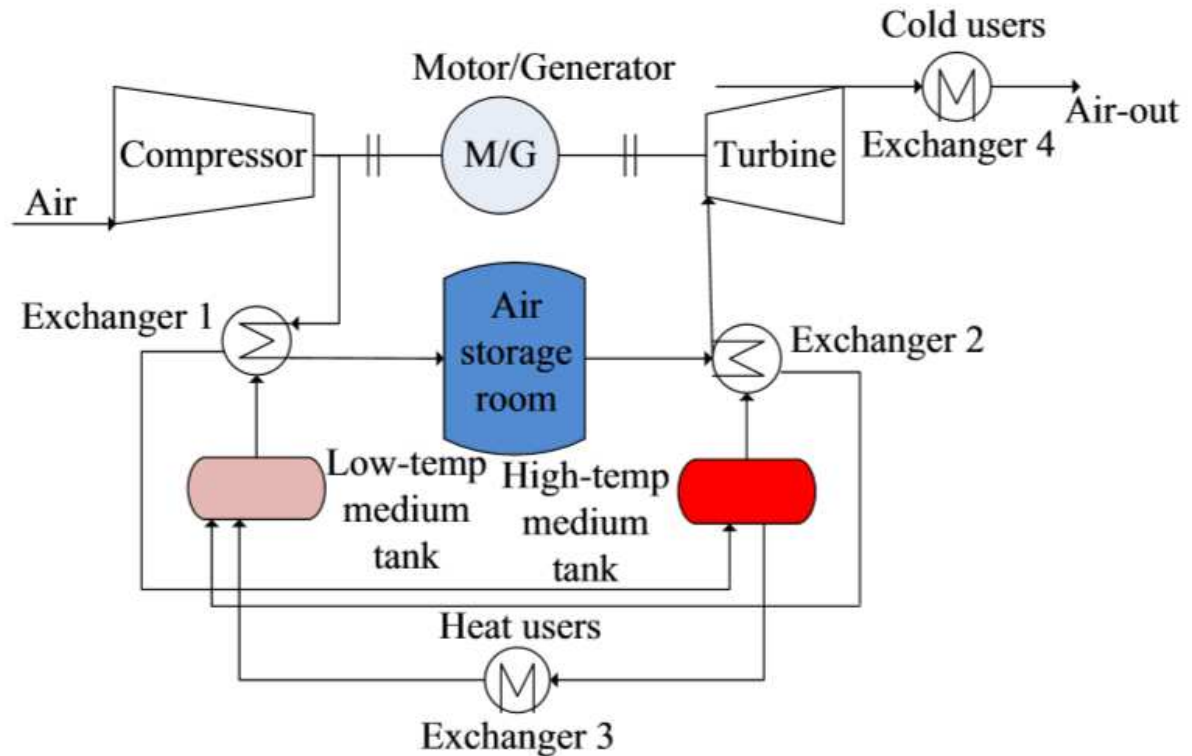


Figura 09 – Sistema NSF-CAES. Fonte: Chen *et al.* (2013).

Uma outra configuração, que é uma particularidade do NSF-CAES, é a utilização de ar comprimido na forma de líquido ou *Liquid Air Energy Storage (LAES)*, mostrada na Figura 10, no qual a energia térmica fria oriunda do processo de expansão do ar é armazenada para ser reciclada e utilizada para liquefazer o ar. Nesse processo, o reservatório se torna muito mais compacto que no CAES convencional, porém existe o dispêndio de energia para manter o ar resfriado durante o armazenamento (CHEN *et al.*, 2013).

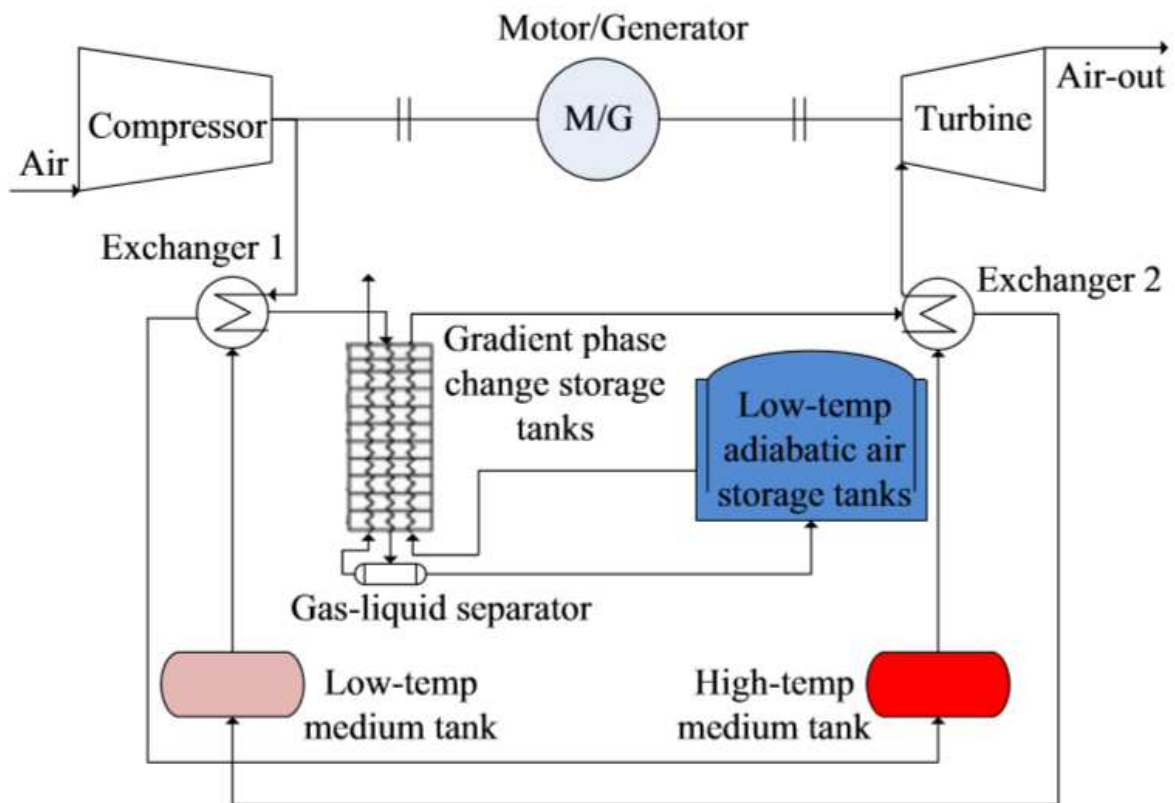


Figura 10 – Sistema LAES. Fonte: Chen *et al.* (2013).

### 2.3.11 Sistema Auxiliar de Armazenamento de Energia Térmica

Este é um dos sistemas chave que, se aplicado ao CAES, pode torná-lo mais viável e até comercial. Indica-se essa utilização para resolver algumas das limitações do modo convencional do sistema, tal como a baixa eficiência global.

Alguns sistemas TES aplicados ao CAES que reciclam água são descritos por McBride, Bell e Kephshire (2013), como o método de spray, espuma ou por bolhas, em casos de pequena escala.

### 2.3.12 Plantas de Larga Escala em Operação

Chen *et al.* (2013) classificou os CAES em categorias de acordo com a capacidade de operação. Sistemas com mais de 50MW de potência são categorizados como de grande ou larga escala. Nessa categoria existem duas plantas comerciais e operacionais, Huntorf, na Alemanha e McIntosh nos Estados Unidos da América. A planta de Huntorf é a mais antiga e entrou em operação em 1978, enquanto que a McIntosh foi datada em 1991. Os compressores de Huntorf têm 60 MW, enquanto que a planta fornece 321MW de potência (WANG *et al.*, 2017).

Para uma compressão de 8 horas, pode-se fornecer 2 horas de energia contínua; possui no modelo SF-CAES, um reservatório de 310 000 m<sup>3</sup> de volume a 600 metros de profundidade em uma pressão de 5 a 7 Mpa, com uma eficiência de 42% de conversão de energia elétrica para elétrica (eficiência global do processo de armazenamento) (CHEN *et al.*, 2013). Apesar do uso da combustão de gás natural e o total de energia produzida em 2007 sendo de 294.465 MWh, Chen *et al.* (2013) verificaram forte dependência de combustível fóssil, tendo a emissão total, em toneladas de carbono, nesse mesmo ano de 156.540 t.

A planta de McIntosh, localizada no Alabama, foi a segunda planta comercial construída no mundo, com compressores de 50 MW e potência desenvolvida de 110MW, projetada para 41 horas de compressão e operação contínua de 26 horas de fornecimento de energia elétrica (WANG *et al.*, 2017).

O seu reservatório está localizado a 450 metros abaixo da superfície terrestre e opera entre 4,5 a 7,4 MPa. Diferentemente da planta de Huntorf, a McIntosh utiliza os gases de exaustão do expansor para preaquecer o ar de entrada da turbina, tendo um acréscimo de 25% de eficiência, fazendo a eficiência global subir para 54%. Utilizando o modelo SF-CAES, tem o mesmo problema de emissão de carbono para a atmosfera que a planta de Huntorf (CHEN *et al.*, 2013). A Figura 11 traz a vista aérea da planta de McIntosh, a Figura 12 traz o esquemático e a Figura 13 traz a vista interna, com detalhes para a parte de compressão e de geração de energia da planta.



Figura 11 – Vista aérea da planta de McIntosh, USA. Fonte: Dresser-Rand (2010).



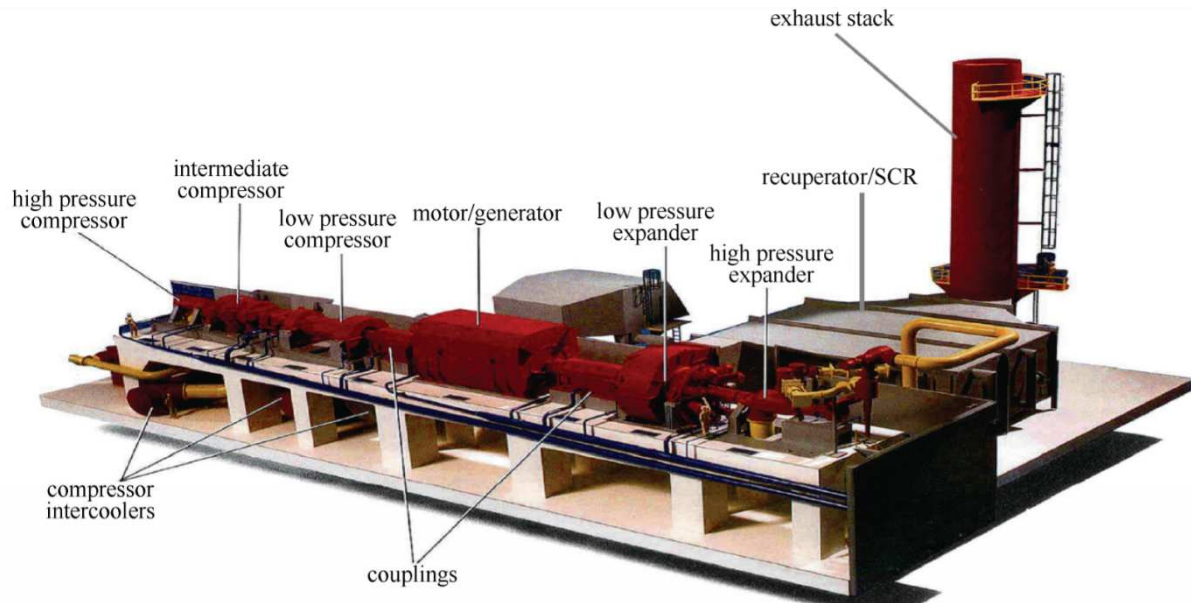


Figura 12 – Esquemático da planta de McIntosh, USA. Fonte: Dresser-Rand (2010).



Figura 13 – Vista interna da planta de McIntosh, USA. Fonte: Dresser-Rand (2010).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada neste trabalho. Foram realizadas simulações dos processos de uma planta de armazenamento de energia através do processo de compressão do ar. Essas simulações foram realizadas por meio do *software* DWSIM, visando avaliar o dimensionamento técnico de uma planta CAES para o aproveitamento da energia elétrica proveniente de fontes sazonais de produção. Para iniciar o entendimento da metodologia adotada, é necessária a definição de alguns parâmetros do processo.

#### 3.1 DADOS BÁSICOS DE CONHECIMENTO A RESPEITO DO PROCESSO

Durante a fase de elaboração de um projeto de compressão de gás, o ponto de partida é a Standard (2002), norma a qual trata a especificação de projeto de compressores centrífugos. O Ponto de projeto, é o ponto no qual o compressor é dimensionado considerando a vazão, rotação, e trabalho politrópico (*politropic head*), estas informações encontram-se no ANEXO A.

#### 3.2 BASE DA SIMULAÇÃO CAES

O modelo do processo foi representado por equações que expressam as leis físicas da conservação e demais relações entre variáveis. A modelagem e o dimensionamento dos sistemas de compressão e expansão, assim como os equipamentos auxiliares foram desenvolvidos pelo *software* simulador de processos DWSIM, na sua versão 5.8 atualização 3, para a análise do dimensionamento técnico do CAES. Para o cálculo das propriedades termodinâmicas, tais como pressão, temperatura e entalpia, foi utilizado o pacote *Coolprop*, que será descrito no tópico 3.4.1. Encontram-se no ANEXO B as equações empregadas nos cálculos do *software* DWSIM.

Foram considerados os parâmetros básicos sugeridos pelo *software*. O funcionamento e descrição dos equipamentos será descrito na subseção 3.3 em diante.

#### 3.3 SOFTWARE DWSIM PARA SIMULAÇÃO

A simulação do processo foi realizada para dimensionar o CAES necessário para suprir a demanda do plano decenal da EPE. Para isso foi utilizado o DWSIM, que é uma ferramenta em código aberto muito utilizado na indústria química em diferentes fases do ciclo de vida de um projeto, desde projetos conceituais até otimização, monitoramento de desempenho de plantas industriais de processamento de gás e refino de petróleo, químicas e petroquímicas.

Por ser um simulador de estrutura modular, considera a planta industrial como um conjunto dos seus componentes conectados um ao outro e ao ambiente por fluxos de massa e energia. Dessa forma, o *software* permite reproduzir parte ou todo um sistema de processamento, utilizando composições de entrada definidas e pacotes termodinâmicos adequados. Estas análises permitem avaliar melhor a operação da planta durante o seu ciclo de vida, além da otimização da mesma.

Os principais módulos utilizados para a montagem da simulação no ambiente do *software* foram: compressores, expansores, aquecedores e resfriadores, que são descritos nas subseções 2.4.2, 2.4.3 e 2.4.4. A Figura 14 mostra a tela inicial do *software* DWSIM, enquanto a Figura 15 mostra o ambiente de navegação do software DWSIM.

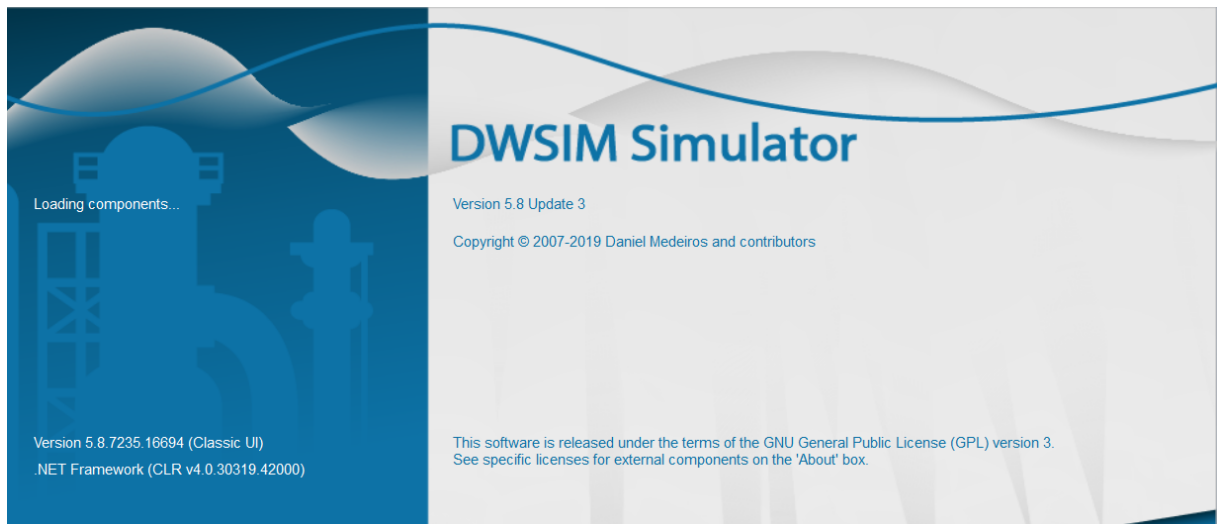


Figura 14 – Tela inicial do *software* DWSIM. Fonte: *Software* DWSIM.

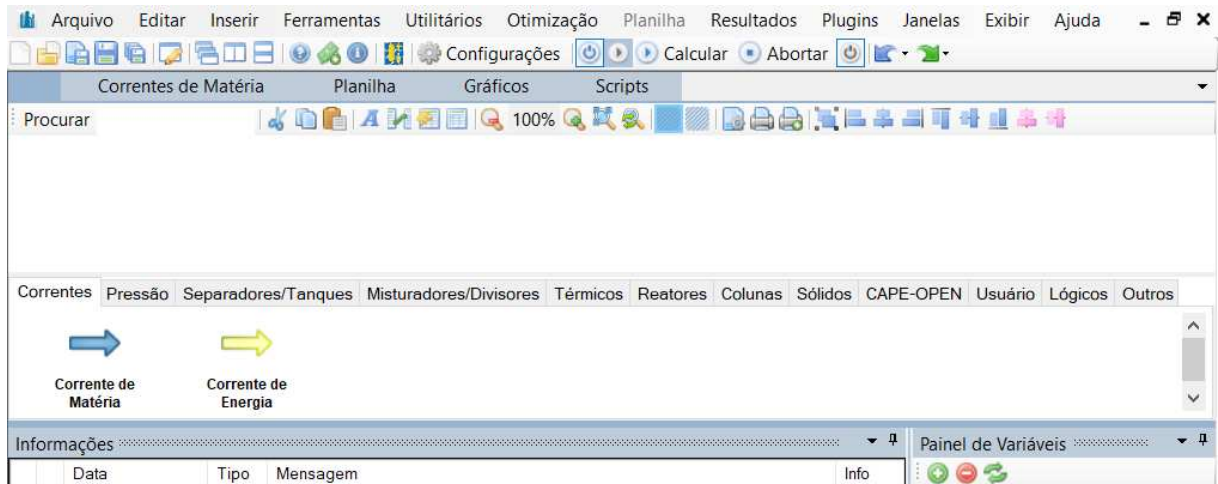


Figura 15 – Ambiente do *software* DWSIM. Fonte: *Software* DWSIM.

### 3.3.1 Biblioteca de Propriedades Termofísicas *Coolprop*

O *CoolProp* é uma biblioteca de propriedades termofísicas *open-source* que dispõe do estado da arte em termos de formulações de propriedades termofísicas. O *Coolprop* permite o cálculo de propriedades de 110 fluidos puros e pseudocomponentes, assim como propriedades de fluidos incompressíveis e ar úmido. O código do *CoolProp* foi escrito em C++ e possui interface com uma gama de linguagens de programação, além de dispor das funcionalidades inerentes à programação orientada a objeto. Através do *CoolProp* é possível calcular propriedades como a densidade, viscosidade, pressão e temperatura. O cálculo das propriedades termodinâmicas de todos os fluidos que são implementados no *CoolProp* é baseado em equações de estado explícitas para a energia de Helmholtz. Segundo Bell *et al.* (2014), essa formulação é empregada atualmente para todas as equações de estado de alta acuracidade que estão disponíveis na literatura. Nesse tipo de formulação, a energia de Helmholtz total é determinada pela soma de duas contribuições: a residual e a do gás ideal. A equação de Helmholtz explícita usa temperatura e massa específica como variáveis independentes, se outras variáveis forem dadas, faz-se necessário o uso de soluções numéricas para obter a temperatura e massa específica.

### 3.3.2 Compressores e Expansores

Para este estudo, foram utilizados três compressores centrífugos e um axial e dois expansores. Deve-se definir a corrente de matéria de entrada, que é a vazão mássica em Kg/s (para o caso do primeiro compressor).



Para realizar o cálculo, deve ser escolhido uma das seguintes opções parâmetro no *software*: Pressão na saída; Variação da pressão; Potência fornecida/produzida; Corrente de energia. Não é interessante utilizar o ponto de orvalho para o ar atmosférico, sendo este mais interessante quando se utiliza o vapor. A eficiência em ambos os equipamentos também deve ser fornecida. Tanto para os compressores quanto para os expansores foi utilizada a pressão na saída e adotou-se 75% para eficiência de compressão e de expansão, valor padrão do simulador. As Figuras 16 e 17 trazem os esquemáticos do compressor e do expansor no *software* DWSIM, respectivamente.

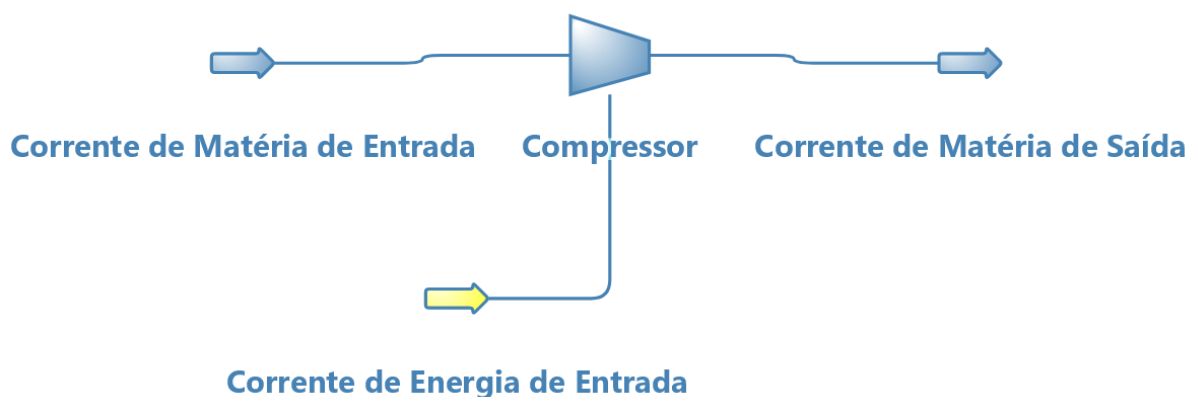


Figura 16 – Esquemático do Compressor – Fonte: *Software* DWSIM

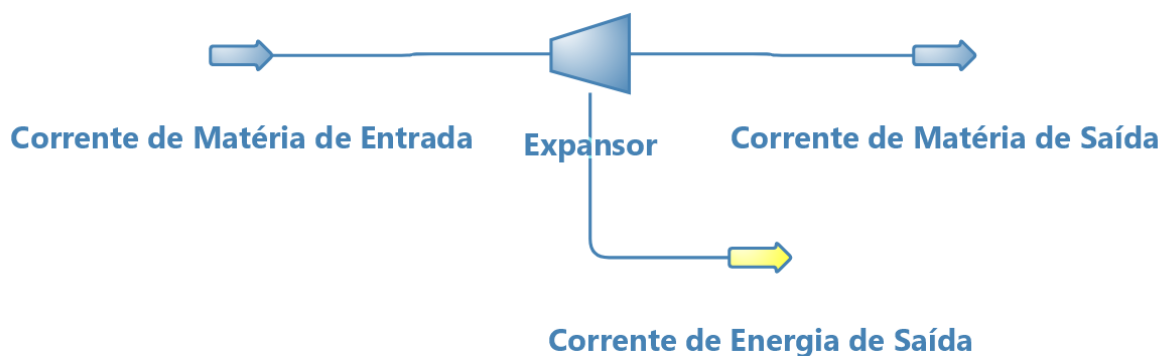


Figura 17 – Esquemático do Expansor. Fonte: *Software* DWSIM

### 3.3.3 Resfriadores e Aquecedores

Uma vez definida a vazão mássica no início do processo, esta se manterá constante ao longo do mesmo. O cálculo do resfriador pode ser realizado a partir do calor adicionado ou removido, da variação de temperatura, da temperatura na saída, fração de vapor na saída e corrente de energia. Deve ser informada ainda a eficiência em todos os equipamentos.

Para ambos os equipamentos, Figuras 18 e 19, foram utilizados os modelos simplificados, uma vez que as informações a respeito da planta forneciam dados apenas para o modelo simples. Foi utilizada a eficiência de troca térmica de 100%, valor padrão do simulador.

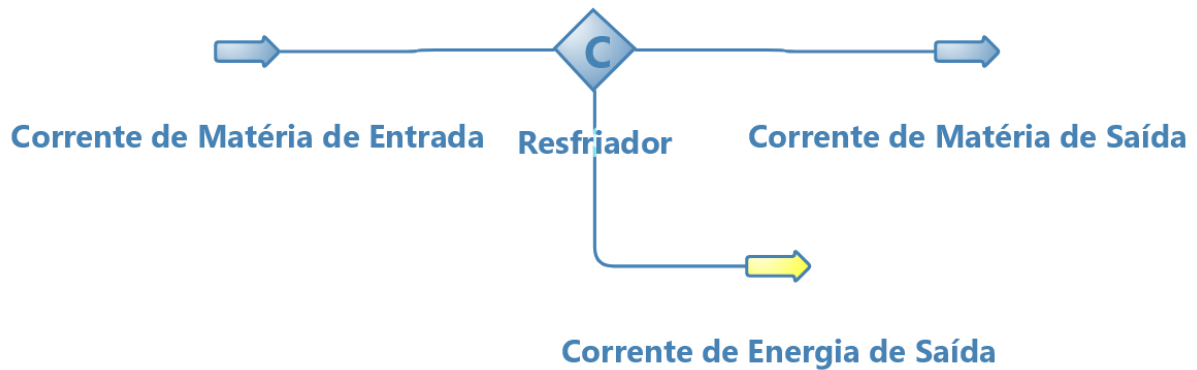


Figura 18 – Esquemático do Resfriador. Fonte: *Software DWSIM*

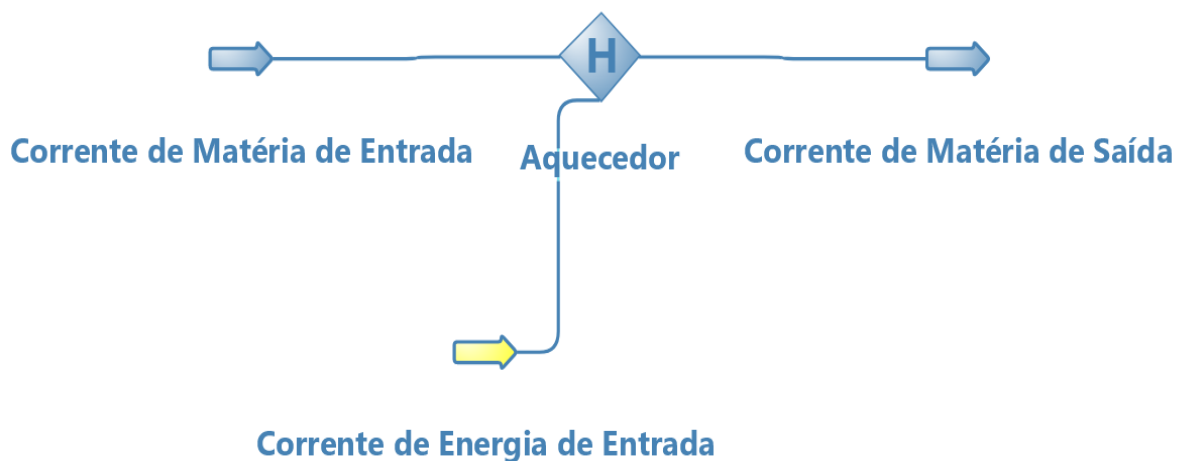


Figura 19 – Esquemático do Aquecedor. Fonte: *Software DWSIM*

### 3.3.4 Composições e vazões utilizadas

Durante a fase de inserir os dados no *software* DWSIM apareceu uma limitação do *CoolProp*, ao aplicar a biblioteca de fluidos para o ar atmosférico acontecia um erro, que apresentam uma grande complexidade e desafios numéricos em comparação com a avaliação das propriedades termodinâmicas de fluidos puros. Por este motivo, foi utilizado a mistura de 21% de oxigênio e de 79% de nitrogênio. Sem essa consideração, o *software* não seria capaz de realizar os cálculos. Confirmando a escolha, o suporte do *software* DWSIM informou que o pacote ideal para utilização nesta simulação é o *CoolProp*.

Além da limitação com relação a mistura do ar atmosférico, ao introduzir os valores de pressão e temperaturas nominais da planta de McIntosh houve erro no *software*, pois possui um parâmetro de restrição quanto ao material utilizado. Para contornar tal problema, foram atribuídos valores de pressão, vazão mássica e temperaturas no limite máximo da capacidade de aceitação do *software* para simulação, tendo como base valores que constam em Dresser-Rand (2010), sintetizados na Figura 22 e que constam na Tabela 3. Esses valores foram manipulados para que o software aceitasse realizar os cálculos. Outros parâmetros secundários como vazão molar, vazão volumétrica, entalpia e entropias foram calculados automaticamente pelo *software* através dos dados inseridos anteriormente.

Outra restrição do *software* é a eficiência dos equipamentos de troca térmica, sendo próximo de 100%. Foi possível perceber que, quando valores mais baixos foram inseridos, erros de cálculos começaram a aparecer, não permitindo o cálculo através do *software*. Neste caso, o software informa através de uma mensagem de erro que não irá realizar os cálculos. Por esse motivo, somado ao fato que o *software* não é específico para um CAES, alguns cálculos o *software* não executa, sendo necessário então finalizar os cálculos através do *Excel* onde, foram criadas planilhas para os cálculos de forma organizada, evitando-se erros que poderiam ser gerados por métodos manuais. As planilhas geradas fazem apenas as operações matemáticas básicas, onde a lógica de cálculos foi introduzida na subseção 3.4.

As variáveis em que houve necessidade de introduzir dados para os cálculos estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Variáveis Fornecidas ao *Software*

Parâmetros	Equipamento				
	Admissão	Compressor	Resfriador	Aquecedor	Expansor
Temperatura (F)	X	-	-	-	-
Pressão (Psi)	X	-	-	-	-
Vazão Mássica (Kg/s)	X	-	-	-	-
Pressão na Saída (Psi)	-	X	-	-	X
Eficiência (%)	-	X	X	X	X
Temperatura na Saída (F)	-	-	X	-	-
Perda de Carga (Pa)	-	-	X	X	-
Corrente de Energia (kW)	-	-	-	X	-

Os valores numéricos para esses itens são os descritos na subseção 3.4 (Aplicação do sistema de armazenamento – Simulações).

### 3.3.5 Parâmetros Avaliados

A principal questão avaliada neste estudo é a quantidade de energia de entrada e a quantidade de energia que é retornada após o processo de armazenamento, ou seja, qual a porcentagem de eficiência do processo de armazenamento através da compressão do ar. Ressalta-se que, ao término da simulação, é esperado uma eficiência maior que 50%, conforme Chen *et al.* (2016) e Northrop, Connor (2013) descreveram.

Para essa análise, as variáveis definidas na tabela 3, foram consideradas de acordo com as informações coletadas na planta de McIntosh (CHEN *et al.*, 2016), como segue: para o compressor modelo 5013 axial, pressão de entrada igual a 13,4 psia, pressão de descarga igual a 65,7 psia, energia de entrada igual a 37.537 kw; para o compressor modelo D24A5S centrífugo, pressão de entrada igual a 61,7 psia, pressão de descarga igual a 237 psia e energia de entrada igual a 32.000 kw; para o primeiro compressor modelo D16R6B centrífugo, pressão de entrada igual a 230 psia, pressão de descarga igual a 594 psia e energia de entrada igual a 18.687 kw, para o segundo compressor e final do ciclo de compressão, do modelo D16R68 centrífugo a pressão de entrada 587 psia, a pressão de descarga sendo 1220 psia e a energia de entrada igual a 17.536 kw.

Já para o sistema de expansão do ar, o expensor de alta pressão possui pressão de entrada igual a 700 psia, pressão de saída de 270 psia e não sendo informada a energia de saída no material consultado da Dresser-Rand (2010), para o expensor de baixa pressão, pressão de entrada igual a 254 psia, pressão de saída de 15,5 psia. Nos casos dos expansores, por existir na planta de McIntosh o sistema com queima de gás natural, conforme informado na subseção 2.3.10 (Classificações do CAES), os valores de temperaturas são informados para o expensor de baixa pressão, sendo 1600 °F para a admissão e 690 °F para a descarga. A Figura 20 mostra o esquemático da planta com todos esses valores citados.

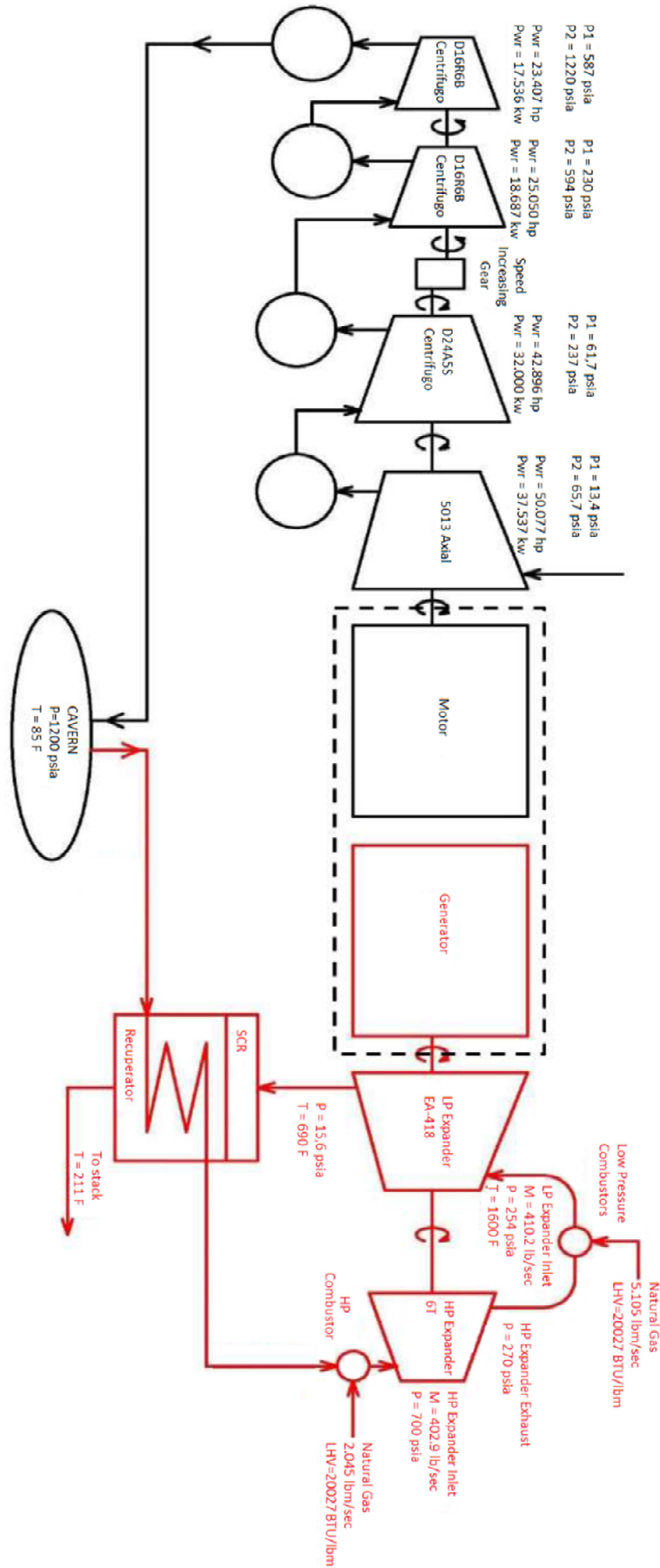


Figura 20 – Processo em McIntosh. Fonte: Adaptado de Dresser-Rand (2010).

### 3.4 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO – SIMULAÇÕES

O objeto de estudo CAES, teve o seu sistema montado no *software* DWSIM conforme a sequência de funcionamento da planta do processo, exibido na Figura 21.

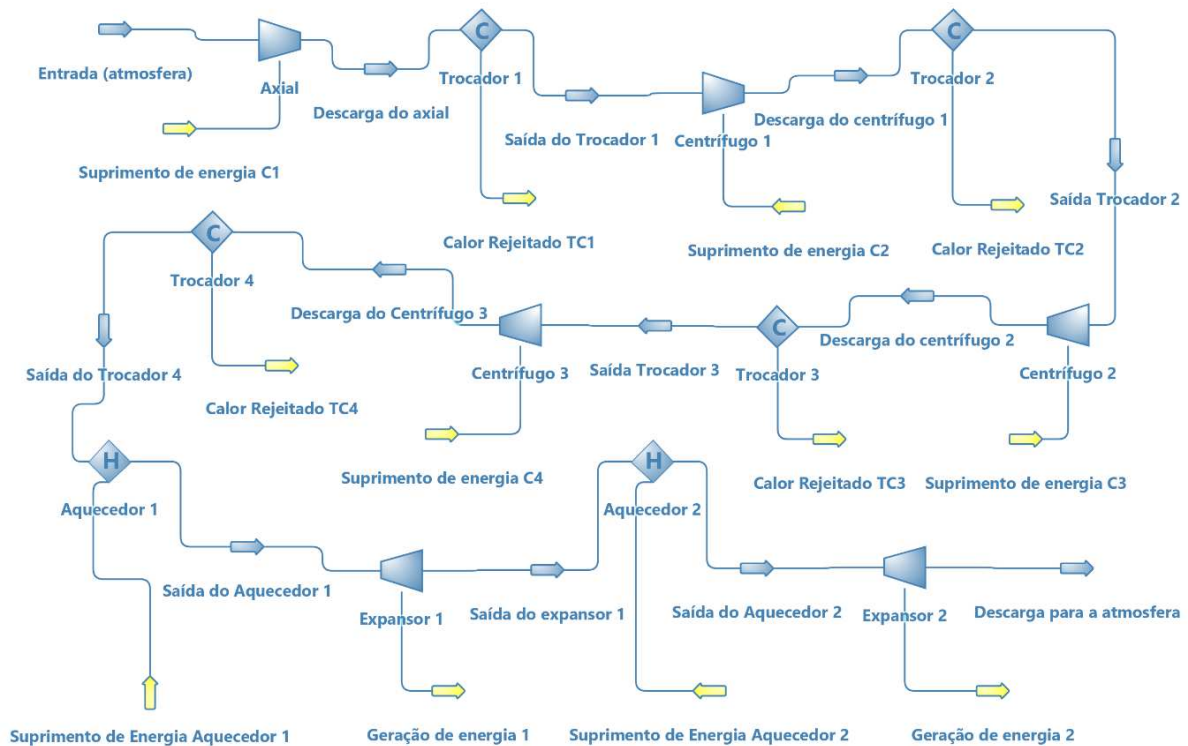


Figura 21 – Planta de Compressão e Expansão. Fonte: Autor

Em algumas etapas, o *software* recebe o valor atribuído e retorna um valor, na qual as equações no memorial de cálculo do *software* são utilizadas. Alguns equipamentos como filtros de ar, reservatórios, válvulas específicas de turbomáquinas, dentre outros, foram suprimidos, pois o *software* não dispõe de tais equipamentos e cálculos.

Para a simulação correta, alguns parâmetros são introduzidos e não sofrerão alterações durante todo o processo, por conta da natureza química do ar e por conta do princípio da conservação da massa, que são eles: 20 kg/s a vazão mássica, 21% a fração molar de oxigênio e 79% a de nitrogênio. Em seu funcionamento, o ar atmosférico é tratado por um filtro para retenção de impurezas com a temperatura em 77 graus Fahrenheit (°F), pressão de 14,696 *pound force per square inch* (PSI), vazão volumétrica de 16,955 metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s), valores de pressão atmosférica e temperatura hipotética, para ser admitido pelo compressor axial.

Nesse caso e nos próximos, a energia elétrica para alimentar os motores, que irão fornecer energia mecânica de giro para os compressores, são oriundas de fontes renováveis como Solar ou Eólica.

Conforme seguirá, os processos de compressão e expansão do ar acarretará na variação dos parâmetros como pressão, temperatura e balanço de energia resultante. Isso é previsto pela lei da termodinâmica.

Na saída dos compressores (descarga) existe a necessidade de um trocador de calor, pois o ar, ao ser comprimido, tem um aumento de temperatura, elevando no compressor axial para 588,31 °F, pressão de 100 psi e vazão volumétrica de 4,88 m<sup>3</sup>/s e o suprimento de energia de 5.843,41 kW.

Para melhoria da eficiência do processo de compressão, existe um trocador de calor após cada etapa de compressão, então no primeiro trocador de calor, haverá a diminuição da temperatura, da pressão e da vazão volumétrica para 80 °F, 95,65 psi e 2,62 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

Seguindo para o próximo processo de compressão, haverá aumento da temperatura para 247,99 °F, da pressão que se elevaria para 200 psi, a vazão volumétrica cairia para 1,65 m<sup>3</sup>/s e o suprimento de energia no valor de 1 892,08 kW, já o trocador de calor do segundo compressor terá a temperatura de 80 °F, pressão de 193 psi e vazão volumétrica de 1,29 m<sup>3</sup>/s.

Na descarga do terceiro compressor a temperatura será de 176,40 °F, pressão de 300 psi, vazão volumétrica de 0,99 m<sup>3</sup>/s e o suprimento de energia de 1 046,21 kW, enquanto o trocador de calor do terceiro compressor apresenta na descarga a temperatura de 80 °F, a pressão de 193 psi e a vazão volumétrica de 1,29 m<sup>3</sup>/s.

Para o último compressor, a temperatura na descarga é 193,64 °F, a pressão é 490 psi, a vazão volumétrica é de 0,62 m<sup>3</sup>/s e o suprimento de energia é de 1 251,24 kW e para o trocador de calor a temperatura é de 85 °F, à pressão de 485,65 psi e vazão volumétrica de 0,51 m<sup>3</sup>/s.

Após o quarto processo de compressão, existe o armazenamento do ar comprimido no reservatório. Para esta simulação, o valor de pressão do reservatório seria de aproximadamente 485 psi.

Durante o processo de expansão do ar, acontece a remoção de calor da sua fronteira e, para que não haja o congelamento dos equipamentos de processo é necessário fornecer calor, de forma que, antes de cada turboexpansor deverá haver um aquecedor.

A temperatura após o primeiro aquecedor é de 1000 °F à pressão de 481,29 psi e a vazão volumétrica é de 1,40 m<sup>3</sup>/s. Após o primeiro expansor a temperatura cai para 463,532 °F, a pressão vai a 270 psi com uma vazão volumétrica de 1,60 m<sup>3</sup>/s, sendo gerada a energia de

1.345,83 kW. É novamente aquecido o ar para 826,75 °F à pressão de 265,64 psi e vazão volumétrica de 2,26 m<sup>3</sup>/s, quando será novamente expandido e cederá energia no expansor 2, sendo o ar é devolvido à atmosfera à temperatura de 300,58 °F, pressão de 15 psi e vazão volumétrica de 23,54 m<sup>3</sup>/s, nesta etapa gerando 6 159,9 kW.

Esse residual térmico ainda é alto, porém o software realiza os cálculos de acordo com o tipo de cálculo selecionado que pode ser pela pressão na saída, variação da pressão, potência fornecida/produzida ou ainda através da corrente de energia. Em todos os casos, a temperatura na saída permanece alta. Todos os dados fornecidos pelos cálculos do software estão no ANEXO C.

Partindo do início, foram incluídos no *software* os equipamentos para a simulação do CAES, incluídos os dados informados no tópico 3.3.6 (Parâmetros Avaliados), que são as informações iniciais a respeito da planta de McIntosh. Como o *software* não possui capacidade para simulação de uma planta da magnitude de McIntosh, foram necessárias modificações nos valores dos parâmetros como pressão, temperatura e vazões mássicas, sempre em sentido a reduzir a escala do CAES. A partir dos parâmetros modificados onde o *software* foi capaz de simular, chegou-se ao máximo de potência que o *software* consegue simular para o CAES. Neste momento, é possível gerar uma planilha com todas as variáveis, do início ao fim do processo, sendo que a grande maioria dessas variáveis não são interessantes para a discussão deste trabalho, por conta do objeto de estudo ser a aplicação desse CAES para atender ao plano decenal.

Posteriormente, foram realizados os cálculos através do *Excel* para obter os valores de energia consumida e gerada nesse CAES. A eficiência final então pode ser obtida através do balanço de energia de saída pelo de entrada. Para esse balanço, soma-se todos os gastos energéticos, que são eles: energia de entrada nos compressores, com 10.032,94 kW, aquecedores que somam 10.142,32 kW e trocadores de calor com 10.142,32 kW, totalizando 30.317,58 kW. Enquanto que a parcela de energia gerada no processo é de 8.575,89 kW. Nesse caso, não foi utilizado nenhum fator de armazenamento térmico, como no caso de um SF-CAES.

Se incluirmos um sistema de armazenamento térmico, passando para o NSF-CAES, com reciclo de energia, ou seja, a energia térmica de calor gerada no processo de compressão será armazenada e utilizada no processo de expansão do ar, processo esse que consome muito calor e considerando 75% de eficiência na troca térmica, pois o software não executou os cálculos com valores superiores a este, chegamos ao resultado de eficiência para o NSF-CAES.



A Figura 22 sintetiza o processo de simulação e obtenção dos dados pelo *software* DWSIM e a elaboração da planilha do *Excel*.

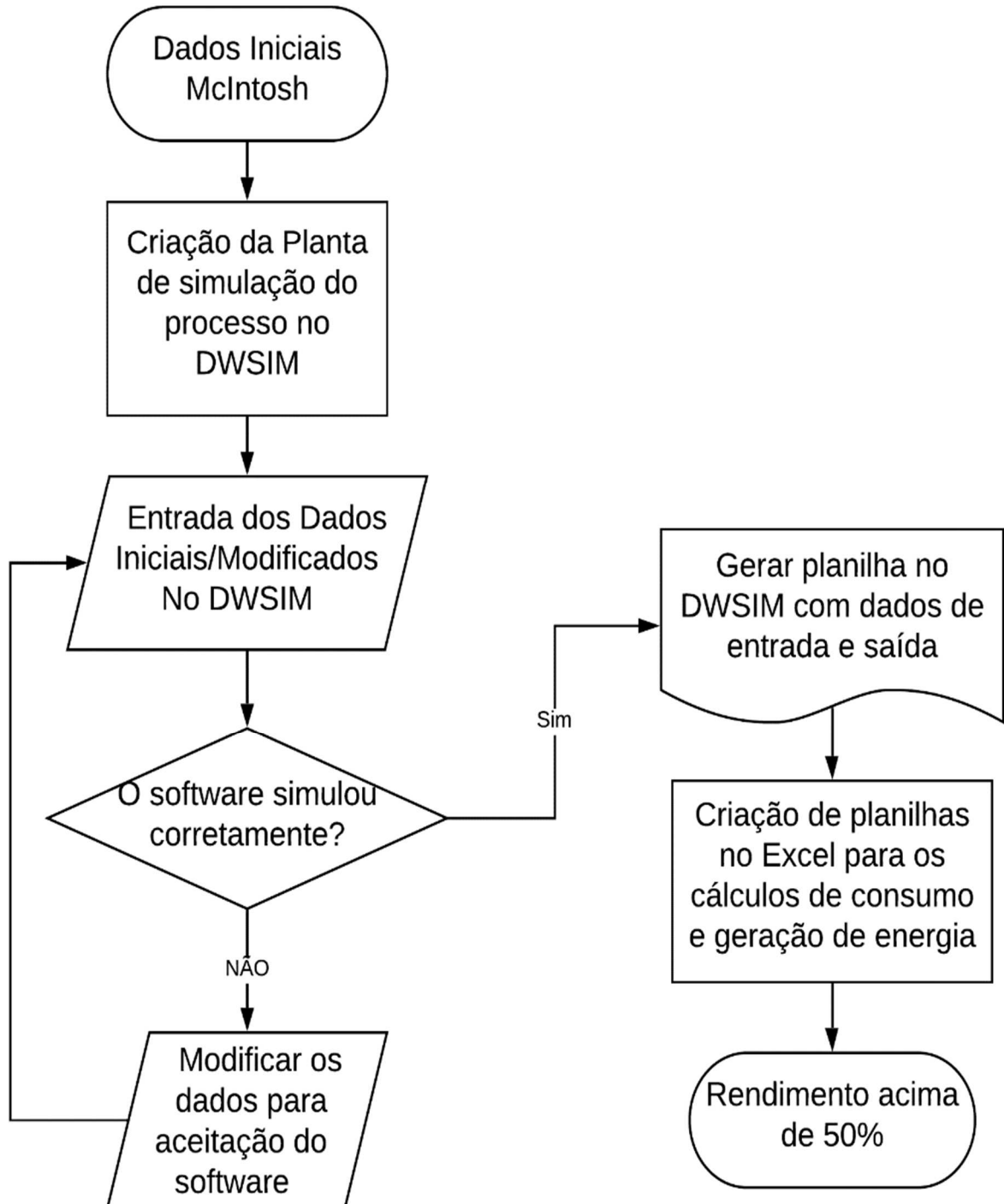


Figura 22 – Fluxograma do proceso de simulação e obtenção de dados. Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações de processo foram realizadas no DWSIM e as configurações da planta CAES foram apresentadas nas Figuras 19 e 20 anteriormente, assim como todos os equipamentos relevantes.

Os cálculos foram realizados de acordo com os dados citados na subseção 3.4 (Aplicação do sistema de armazenamento – Simulações). Porém, o software DWSIM apresenta limitações, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 22, os cálculos realizados são automáticos assim como os resultados. Porém, os resultados gerados no DWSIM necessitam de tratamento para uma melhor interpretação, uma vez que o software não foi projetado especificadamente para simulação de um CAES, mas para processos químicos de uma forma geral, onde foi utilizado o Excel para obtenção do total de energia aproveitada pelo sistema, energia consumida no processo, energia gerada no processo e a percentagem teórica real. A partir disso, foram desenvolvidas as Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8.

A Tabela 4 listas todos os equipamentos que consumiram energia para compressão do ar e o somatório, ou seja, o trabalho executado para a compressão resume-se aos quatro compressores do processo. Na Tabela 4, observa-se também o total de energia consumido para compressão do ar. Os valores se distinguem uma vez que o processo de compressão necessitará de energia de acordo com os parâmetros do ar, que também variam. Ou seja, valores de pressão, temperatura, peso molecular irá variar de acordo com a intensidade de compressão e de entalpias e entropias. As características construtivas trazem grandes variações de vazões, e é notória a energia consumida no compressor axial, principalmente, mas não exclusivamente, da sua vazão mássica.

Tabela 4 – Energia Consumida para a Compressão do Ar.

Equipamento	Energia (kW)
Compressor Axial	5.843,41
Compressor Centrífugo 1	1.892,08
Compressor Centrífugo 2	1.046,21
Compressor Centrífugo 3	1.251,24
Total de Energia Consumida na Compressão	10.032,94

A Tabela 5 mostra o total de energia gerada nos expansores, bem como o somatório dos resultados, que é o total de energia gerada pela expansão do ar. Essa é a energia de interesse no processo, a energia que será retornada à rede. Assim como nos compressores, esses valores irão variar de acordo com características construtivas e de parâmetros do processo. A partir das informações dessa tabela é possível realizar os cálculos que seguirão no *Excel* para a confirmação do rendimento do CAES.

Tabela 5 – Total de Energia Gerada na Expansão.

Equipamento	Energia (kW)
Expansor 1	1.953,26
Expansor 2	6.622,63
Total de Energia Gerada na Expansão	8.575,89

A Tabela 6 mostra as energias consumidas para o resfriamento do ar que, neste caso, são os resfriadores (trocadores de calor). Como discutido na subseção 2.3.9.1.2 (Processos de Compressão e Expansão de Ar), durante o processo de compressão do ar existe a elevação da temperatura do ar, sendo necessário o seu resfriamento antes de prosseguir para o próximo estágio de compressão. Nesse sentido, foram somados os gastos energéticos de cada resfriador. Como pode se verificar, os valores variam, principalmente com relação ao trocador 1, que está instalado logo após ao compressor axial. Esse valor mais alto está relacionado principalmente, mas não exclusivamente, ao fato do compressor axial possuir uma vazão muito maior que os outros compressores.

Tabela 6 – Energia Consumida para o Resfriamento do Ar.

Equipamento	Energia (kW)
Trocador 1	5.834,81
Trocador 2	1.922,87
Trocador 3	1.076,65
Trocador 4	1.307,99
Total de Energia Consumida no Resfriamento do Ar	10.142,32

A Tabela 7 apresenta a energia consumida por aquecedor para o aquecimento do ar, que ocorre anteriormente ao processo de expansão. Como são dois expansores, existe a necessidade

de aquecimento do ar em dois momentos diferentes, sendo então somados para obtenção do gasto energético com aquecimento do ar.

Tabela 7 – Energia Consumida para o Aquecimento do Ar.

Equipamento	Energia (kW)
Aquecedor 1	5.834,81
Aquecedor 2	4.307,51
Total de Energia Consumida no Aquecimento do Ar	10.032,94

Finalmente, a Tabela 8 mostra um balanço do processo como um todo, apresentando o consumo total de energia do processo. Nesse cálculo são somados os gastos energéticos nos processos de compressão do ar atmosférico, da energia consumida para aquecimento e resfriamento do ar.

Tabela 8 – Total de Energia Consumida no Processo.

Equipamento	Energia (kW)
Total de Energia Consumida na Compressão	10.032,94
Total de Energia Consumida no Aquecimento do Ar	10.142,32
Total de Energia Consumida no Resfriamento do Ar	10.142,32
Total de Energia Consumida no Processo	30.317,58

Realizados esses cálculos, existem alguns cenários possíveis e que vão de encontro a algumas das classificações apresentadas na subseção 1.4.2.

Considerando apenas as entradas e saídas de energia, como um ciclo aberto onde o fluido rejeitado apresenta significativa parcela de energia, chega-se à eficiência global de 28,29%, através do cálculo realizado no *Excel*, que foi descrito na subseção 3.4 (Aplicação do Sistema de Armazenamento – Simulações). É um valor muito baixo e que nesse aspecto, provavelmente em um estudo de viabilidade econômica, o projeto se mostraria desvantajoso.

A outra forma de cálculo é ignorar as perdas por trocas térmicas, fluidodinâmicas, dentre outras, tendo assim um sistema teórico que apresenta rendimento exagerado, chegando a uma eficiência de 88,94%. Um sistema desse tipo, com as tecnologias existentes no momento, ainda não consegue essa eficiência, por conta das perdas que foram ignoradas.

Um outro cenário, é introduzir um sistema de armazenamento térmico, onde o cálculo para a eficiência térmica, processos de resfriamento e aquecimento foi estimada em 75%,

chegando-se a eficiência global do sistema em 63,72%, o que condiz com a literatura e apresentada na subseção 2.3.12 (Plantas de Larga Escala em Operação), onde é esperado uma eficiência maior que 50% (CHEN *et al.*, 2016; NORTHROP; CONNOR, 2013). O ANEXO C traz uma tabela resumida com resultados complementares deste trabalho.

Por fim, os valores obtidos na simulação foram comparados com a demanda prevista pelo plano decenal da EPE, onde é recomendado que até 2027 o Brasil possua 13.200 MW de potência instalada em sistemas de armazenamentos de energia.

Como retorno da simulação, temos 8.575,89 kW de potência útil gerada para o total de 30.317,58 kW consumida no processo. Por limitações do *software*, o resultado para a potência dos equipamentos é retornado em kilowatt, sendo que a demanda prevista pelo plano decenal é da ordem de megawatt, faz-se necessário uma multiplicação por 1000 para obter valores na mesma ordem de grandeza. Considerando então que entrando com 30.317,58 MW iremos obter 8.575,89 MW de potência que poderá retornar à rede. Neste caso, precisaremos aumentar em 35% a capacidade das instalações para obter 13.200 MW e conseguir suprir o plano decenal de expansão da matriz elétrica com uma única planta CAES.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi dimensionado um sistema CAES para aplicação no Brasil, para satisfazer o plano decenal da EPE. Algumas considerações devem ser feitas para tal análise.

Com a simulação do processo, foi possível observar que a eficiência do processo de armazenamento está próximo de 64%. Isto indica que este sistema de armazenamento pode ser uma alternativa viável para implantação no Brasil e que uma única planta de processo pode ser o suficiente para atender a demanda de 2027 do plano decenal de planejamento energético. Para suprir a demanda de 13.200 MW em 2027 num único sistema CAES, para 64% de rendimento, deverá ser fornecida um total de 21.648 MW.

Nessa demanda, a planta de armazenamento deveria ser dimensionada em aproximadamente 35% a mais que o simulado neste trabalho que, por limitações do *software*, não foi realizado com os valores da demanda real do cenário nacional.

Outra conclusão a que se pode chegar neste trabalho é que o fator técnico de maior limitação para aplicação dessa tecnologia é o armazenamento, pois esse tipo de informação é muito difícil de ser encontrada, pois ainda é muito pouco estudada explorada, sendo então um fator de grande limitação. Se houvesse um reservatório descoberto e com as especificações técnicas e de segurança necessárias para esta finalidade, poderia ser feito o estudo tomando como base a área interna do reservatório. Porém, se uma única formação geológica de grandes dimensões fosse localizada e satisfizesse os requisitos técnicos, ambientais e de segurança, a necessidade decenal estaria satisfeita. Essa informação baseia-se neste estudo, onde uma formação que atendesse as especificações da planta de processo simulada estaria alinhada ao plano decenal de expansão da matriz elétrica, conforme o estudo.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros e complementação deste, fica a necessidade de buscar mais informações a respeito de outras plantas de armazenamento CAES que possam estar em andamento e comparar os parâmetros inseridos neste trabalho.

Existe ainda a necessidade de aprofundar o estudo com relação ao sistema de armazenamento térmico aplicável e as suas reais eficiências.

Outra sugestão é buscar dados de usinas solares fotovoltaicas, tratar os dados e aplicá-los, tendo então a real dimensão do projeto e da necessidade, integrando a teoria do estudo realizado com o real existente da usina solar fotovoltaica, onde os dados estão disponíveis na página do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAMI, A. H. *et al.* Low pressure, modular compressed air energy storage (CAES) system for wind energy storage applications. **Renewable Energy**, v. 106, p. 201-211, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). Boletim Anual 2018. Disponível em: [http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual\\_2018.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf). Acesso em: 21 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). Energia para um futuro inovador. 2020. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>. Acesso em: 22 fev. 2020.

BALALI, M. H. *et al.* Development of an economical model for a hybrid system of grid, PV and Energy Storage Systems. In: **2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**. IEEE, 2015. p. 1108-1113.

BELL, I. H. *et al.* Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 53, n. 6, p. 2498-2508, 2014.

BLOCH, H. P.; SOARES, C. **Turboexpanders and process applications**. Elsevier, 2001.

CARMO, M. *et al.* A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International journal of hydrogen energy**, v. 38, n. 12, p. 4901-4934, 2013.

CASEY, M.; ROBINSON, C., A Method to Estimate the Performance Map of a Centrifugal Compressor Stage, **Journal of Turbomachinery**, ASME, v.135, n.2, 021034, 2013.

CHEN, H; LIU, J; GUO, H; XU, Y; TAN, C. Technical principle of compressed air energy storage system. **Energy Storage Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 146-151, 2013.

CHEN, L. *et al.* Review and prospect of compressed air energy storage system. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 4, n. 4, p. 529-541, 2016.

DENHOLM, P.; KULCINSKI, G. L. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems. **Energy Conversion and Management**, Elsevier BV, v. 45, n. 13-14, p. 2153–2172, 2004.



DRESSER-RAND. Compressed air energy storage (CAES). 2010. 7 pp. Web article. Disponível em: < <https://www.dresser-rand.com/literature/general/85164-10-CAES.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2017

DURING FILHO, F. A. **Estudo técnico-econômico de dois sistemas de armazenamento de energia em um sistema híbrido hidrelétrico fotovoltaico**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ENERGETICA>. Acesso em: 22 nov. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano decenal de expansão da energia 2027. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027\\_aprovado\\_OFICIAL.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf). Acesso em: 22 fev. 2020.

FARHADI, M.; MOHAMMED, O. Energy storage technologies for high-power applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 3, p. 1953-1961, 2015.

FLORES, A. T. **Hidrelétricas de acumulação por bombeamento associadas a aerogeradores para o aumento da oferta de energia no horário de ponta: estudo de caso na Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho, 2018.

FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. **Nature**, v. 238, n. 5358, p. 37-38, 1972.

HUNT, J; FREITAS, M; JUNIOR, A. Enhanced-Pumped-Storage: Combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil. **Energy**, v. 78, p. 513-523, 2014.

JAIN, R. *et al.* Development of a thermodynamic engine in OpenModelica. In: **Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017**. Linköping University Electronic Press, p. 89-99, 2017.

LINDEN, D. Basic concepts. In: LINDEN, D; REDDY, T. B. **Handbook of batteries**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2001. cap. 1.

LÓPEZ RIVAS, D. R. **Metodologia de pré-dimensionamento de compressor axial de múltiplos estágios**. Dissertação (Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, 2018.

MARANO, V; RIZZO, G; TIANO, F. Application of dynamic programming to the optimal management of a hybrid power plant with wind turbines, photovoltaic panels and compressed air energy storage. **Applied Energy**, v. 97, p. 849-859, 2012.

MCBRIDE, T.; BELL, A.; KEPSHIRE, D. ICAES innovation: foam-based heat exchange. Seabrook, TX, USA, 2013.

MENG, H. *et al.* Process design, operation and economic evaluation of compressed air energy storage (CAES) for wind power through modelling and simulation. **Renewable Energy**, v. 136, p. 923-936, 2019.

NIKOLAKAKIS, T.; FTHENAKIS, V. The Value of Compressed-Air Energy Storage for Enhancing Variable-Renewable-Energy Integration: The Case of Ireland. **Energy Technology**, v. 5, n. 11, p. 2026-2038, 2017.

NORTHROP, R. B.; CONNOR, A. N. **Ecological sustainability: understanding complex issues**. CRC Press, 2013.

PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. Climate change 2007. **Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fourth assessment report**. Cambridge University Press, Cambridge, 2008.

PATEL, M. R. **Wind and solar power systems: design, analysis, and operation**. CRC press, 2005.

PEREIRA, J. L. dos S. **Métodos estimativos de pré-dimensionamento e performance de compressores centrífugos multiestágios**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2019.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro**, v. 1, p. 47-499, 2014.

POTTER, M. C.; SCOTT, E. P. **Termodinâmica**. São Paulo: Thomson Learning, 2006. 365 p.

SIMPORE, S. *et al.* Design and Dynamic Simulation of a Compressed Air Energy Storage System (CAES) Coupled with a Building, an Electric Grid and a Photovoltaic Power Plant. In: **12th REHVA world congress, Denmark**. 2016.

SHEPHERD, D. G. Historical development of the windmill. 1990.

STANDARD, A. P. I. 617, “**Axial and Centrifugal Compressors and Expander-Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services,**” Seventh Edition, American Petroleum Institute, Washington, DC, 2004.

VIDAL, J. W. B. **Brasil, civilização suicida.** Editora Nação do Sol, 2000.

WANG, J. *et al.* Overview of compressed air energy storage and technology development. **Energies**, v. 10, n. 7, p. 991, 2017.

WU, B.; LANG, Y.; ZARGARI, N.; KOURO, S. **Power Conversion and Control of Wind Energy Systems.** Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

XU, H. *et al.* Modelling of a hybrid system for on-site power generation from solar fuels. **Applied energy**, v. 240, p. 709-718, 2019.

ZHANG, Y. *et al.* Compressed air energy storage system with variable configuration for wind power generation. **Energy Procedia**, v. 142, p. 3356-3362, 2017.

## ANEXO A – Equações relevantes ao trabalho

Os parâmetros característicos do processo de compressão e expansão, analisando a teoria do processo de compressão e expansão dos gases, temos os principais parâmetros adimensionais resumidos pelas seguintes relações (CASEY; ROBINSON, 2013):

$$\eta_p = f(\varphi, M_u) \quad (2)$$

$$\tau = g(\varphi, M_u) \quad (3)$$

Onde:  $\eta_p$  é a eficiência politrópica final no ponto de projeto (adimensional);

$\tau$  é o fator de transferência de trabalho a ser definido (adimensional);

$\varphi$  é o coeficiente de fluxo (adimensional);

$M_u$  é o número de Mach do impelidor (adimensional);

$f$  e  $g$  são funções deduzidas a partir de características construtivas, tais como geometria dos impelidores e diafragmas (adimensional).

### 2.3 Equações Termodinâmicas

A primeira lei da termodinâmica foi concebida para um ciclo: o calor efetivo transmitido é igual ao trabalho efetivo realizado para um sistema perfazendo um ciclo, expresso na Equação 4 (POTTER; SCOTT, 2006):

$$\sum W = \sum Q \quad \text{ou} \quad \oint \delta W = \oint \delta Q \quad (4)$$

Onde:  $\oint$  implica uma integração ao longo de um ciclo completo, retornando ao ponto inicial;

$W$  é o trabalho, em J;

$Q$  é o calor transmitido, em J;

$\delta Q$  é o diferencial de calor, em J.

Outras propriedades relevantes são a energia interna específica, que é uma propriedade dependente apenas da pressão e temperatura (no caso de fluido gasoso) e a entalpia, é definida como uma combinação de propriedades de um sistema, definida pela equação 5:

$$h = u + pv \quad (5)$$

onde:  $h$  é a entalpia específica, em kJ/kg,  $u$  é energia interna específica, em kJ/kg,  $p$  é a pressão, em MPa,  $v$  é o volume específico, em m<sup>3</sup>/kg (POTTER; SCOTT, 2006).

Os equipamentos onde estas considerações são aplicadas são: os trocadores de calor, os compressores e os expansores. Os trocadores tem a função de transmitir a energia de um corpo mais quente para um mais frio, ou vice e versa (POTTER; SCOTT, 2006). Como nenhum trabalho ocorre no trocador de calor, a equação resultante é a 6:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (6)$$

Onde:  $\dot{Q}$  é o calor transmitido, em W,  $\dot{m}$  é a vazão mássica, em kg/s.

Compressores são equipamentos que transferem energia para um fluido gasoso que escoar através de um duto, produzindo um aumento de pressão. Um expansor, no entanto, é o equipamento onde o fluido realiza trabalho sobre as pás que giram (PEREIRA, 2019). Como resultado, acontece uma queda na energia do fluido, que escoar da entrada para a saída do equipamento.

Para tais equipamentos, a equação de energia toma a forma da equação 7:

$$-\dot{W}_e = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (7)$$

Onde:  $\dot{W}_e$  é o trabalho específico, em kJ/kg, negativo para um compressor que cede energia ao fluido e positivo para um expansor que remove energia do fluido.

A primeira lei da termodinâmica aplicada a compressores centrífugos assume a seguinte forma (PEREIRA, 2019):

$$P + \dot{m}h_{sts} + \dot{m}\frac{c_s^2}{2} + \dot{m}gz_s = \dot{Q} + \dot{m}h_{std} + \dot{m}\frac{c_d^2}{2} + \dot{m}gz_d \quad (8)$$

Onde:  $h_{sts}$  é a entalpia estática do gás na sucção, em kJ/kg,  $h_{std}$  é a entalpia estática do gás na descarga, em kJ/kg,  $c_s$  é a velocidade do gás no bocal de sucção do compressor, em m/s,  $c_d$  é a velocidade do gás no bocal de descarga do compressor, em m/s,  $z_s$  é a altura do bocal de sucção, em m,  $z_d$  é a altura do bocal de descarga, em m (PEREIRA, 2019).

Tratando como desprezíveis as diferenças entre as alturas de energias potenciais dos bocais de sucção e de descarga, e as perdas de calor entre as seções de compressão por radiação e convecção, é possível considerar o compressor como adiabático e a equação 8 se simplifica em (PEREIRA, 2019):

$$P = \dot{m}(h_d - h_s) = \dot{m}\Delta h \quad (9)$$

## ANEXO B – Equações utilizadas pelo *software* DWSIM

Em uma mistura que se encontra em um estado de equilíbrio líquido-vapor (AVA), as fugas de componentes são as mesmas em todas as fases, ou seja (JAIN, 2017):

$$f_i^L = f_i^V \quad (10)$$

A fugacidade de um componente em uma mistura depende da temperatura, pressão e composição. Para relacionar  $f_i^V$  com temperatura, pressão e fração molar, definimos o coeficiente de fugacidade (JAIN, 2017):

$$\phi_i = \frac{f_i^V}{y_i P'} \quad (11)$$

que pode ser calculado a partir de dados de PVT, geralmente obtidos a partir de uma equação de estado. Para uma mistura de gases ideais,  $\phi_i = 1$ .

A fugacidade do componente  $i$  na fase líquida está relacionada à composição dessa fase pelo coeficiente de atividade  $\gamma_i$ , que por si só está relacionado a  $x_i$  e a fugacidade do estado padrão  $f_i^0$  por (JAIN, 2017):

$$\gamma_i = \frac{f_i^L}{x_i f_i^0} \quad (12)$$

A fugacidade do estado padrão  $f_i^0$  é a fugacidade do  $i$ -enésimo componente na temperatura do sistema, isto é, mistura, e em uma pressão e composição arbitrárias. No DWSIM, a fugacidade no estado padrão de cada componente é considerada igual ao líquido  $i$  na temperatura e pressão do sistema.

Se uma Equação de Estado for usada para calcular equilíbrios, a fugacidade do  $i$ -enésimo componente na fase líquida é calculada por (JAIN, 2017):

$$\phi_i = \frac{f_i^L}{x_i P'} \quad (13)$$

com o coeficiente de fugacidade  $\phi_i$  calculado pela EOS, assim como é para o mesmo componente na fase de vapor.

O coeficiente de fugacidade do  $i$ -ésimo componente, tanto na fase líquida quanto na fase vapor, é obtido na mesma equação de estado através das seguintes expressões (JAIN, 2017):

$$RT \ln \phi_i^L = \int_{V^L}^{\infty} \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial n_i} \right)_{T,V,n_j} - \frac{RT}{V} \right] dV - RT \ln Z^L, \quad (14)$$

$$RT \ln \phi_i^{LV} = \int_{V^V}^{\infty} \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial n_i} \right)_{T,V,n_j} - \frac{RT}{V} \right] dV - RT \ln Z^V, \quad (15)$$

onde o fator de compressibilidade  $Z$  é dado por (JAIN, 2017):

$$Z^L = \frac{PV^L}{RT} \quad (16)$$

$$Z^V = \frac{PV^V}{RT} \quad (17)$$



	<b>Fluxo de Energia (kW)</b>	<b>Fator de Compressibilidade da Fase Vapor</b>	<b>Entropia Específica da Mistura (kJ/[kg K])</b>	<b>Entalpia Específica da Mistura (kJ/kg)</b>	<b>Massa Específica da Mistura (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vazão Volumétrica (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vazão Mássica (kg/s)</b>	<b>Pressão (psi)</b>	<b>Temperatura (F)</b>
<b>Saída do</b>	16825,2	1,01243	6,7679	841,262	14,2793	1,40063	20	481,298	578,898
<b>Descarga para a</b>	17827,6	1,00128	7,489	891,382	1,3942	14,3451	20	50	300,582
<b>Saída do</b>	24450,3	1,00525	7,3521	1222,51	5,28317	3,7856	20	254	826,751
<b>Saída do expensor</b>	14872	1,00714	6,8138	743,599	8,87364	2,25387	20	270	463,532
<b>Saída do Trocador</b>	5955,66	0,993441	5,7185	297,783	38,9989	0,512835	20	485,649	85
<b>Descarga do</b>	7230,58	1,00455	5,9107	361,529	32,154	0,622008	20	490	193,642
<b>Saída Trocador 3</b>	5955,3	0,995082	5,8659	297,765	23,497	0,851173	20	293	80
<b>Saída Trocador 2</b>	5985,74	0,996595	5,9908	299,287	15,454	1,29416	20	193	80
<b>Saída do Trocador</b>	6015,72	0,998253	6,1976	300,786	7,64615	2,6157	20	95,6489	80
<b>Descarga do</b>	7067,54	1,00169	6,0297	353,377	20,2776	0,986311	20	300	176,397
<b>Descarga do</b>	7907,8	1,00285	6,2596	395,39	12,1366	1,6479	20	200	247,998
<b>Descarga do axial</b>	11850,5	1,00269	6,8691	592,526	4,09837	4,87998	20	100	588,31
<b>Entrada</b>	6007,12	0,999751	6,7355	300,356	1,17959	16,955	20	14,696	77