



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

João Afonso Salomão

**ANÁLISE DE CICLOS DE POTÊNCIA E  
ARMAZENAMENTO TÉRMICO DE ENERGIA  
PARA UMA BATERIA DE CARNOT**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Márcio Duarte Albino dos Santos e Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Julho de 2023



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Análise de Ciclos de Potência e Armazenamento Térmico de Energia para uma Bateria de Carnot**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica  
na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Analysis of Power Cycles and Thermal Energy Storage for a Carnot Battery**

**Autor**

**João Afonso Salomão**

**Orientadores**

**Márcio Duarte Albino dos Santos**

**José Manuel Baranda Ribeiro**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor Jorge Campos da Silva André</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Márcio Duarte Albino dos Santos</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>José Vasco Santos de Oliveira e Mota</b> <b>Investigador da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, julho, 2023**



“Colocaria o meu dinheiro em prol da energia solar fotovoltaica...Que fonte de potência! Oxalá que não esperemos até que o crude e o carvão se esgotem para que possamos tirar proveito disso.”

Thomas Edison, 1931



## Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e pelas imensuráveis bênçãos.

Votos de agradecimentos ao professor Márcio Duarte Albino dos Santos e José Manuel Baranda Ribeiro pela orientação, paciência, disponibilidade e por tornarem a escrita dessa tese mais fácil. Também, encaminho os meus sinceros agradecimentos a ADAI pelo suporte imediato ao longo de todo esse percurso.

Aos meus progenitores (pai em memória) pelo amor incondicional e por me proporcionarem tudo e mais alguma coisa desde a minha concepção até me tornar homem; não existem palavras suficientes para expressar a minha eterna gratidão, *‘muito obrigado pais’*.

Aos meus irmãos pelo suporte em todos momentos difíceis, aos meus amigos e companheira que sempre estiveram comigo, endereço também os meus agradecimentos.



## Resumo

Com a descarbonização do setor energético, será previsível um crescimento no consumo de energia elétrica, a maioria da qual será fornecida por fontes de geração renováveis que são intrinsecamente variáveis. Para compensar esta variabilidade, será necessário recorrer a sistemas de armazenamento de energia sendo que as Baterias de Carnot se apresentam como uma das possíveis opções para o efeito. Esta tese foca-se na análise comparativa da adequação de diferentes ciclos de potência (e.g. ORC, subcrítico, supercrítico, transcrito) tendo em análise a avaliação do armazenamento térmico de energia (TES), a diferentes soluções de armazenamento de energia térmica.

Neste trabalho fez-se uma revisão sobre os sistemas de armazenamento de energia, com principal destaque nos sistemas térmicos de armazenamento de energia nos quais as Baterias de Carnot fazem parte. Em seguida procedeu-se uma análise preliminar de configurações da Bateria de Carnot, operando em ciclo subcrítico e transcrito com dióxido de carbono, de modo a se estabelecer o ciclo termodinâmico de operação mais eficiente.

Fez-se também uma análise cuidadosa da influência de diferentes fluidos de trabalho na eficiência global do sistema para a Bateria de Carnot. Dentre os fluidos selecionados, o R1233zd operando num ciclo subcrítico mostrou-se o mais eficiente.

No final, por intermédio do modelo construído no MATLAB, procedeu-se a simulação dinâmica do armazenamento térmico de energia, para duas configurações distintas, nomeadamente de armazenamento sensível e latente. Contudo, dentre as conclusões obtidas os armazenamentos latentes mostraram-se mais promissores, mas por sua vez constituem um valor de mercado muito mais caro que os sensíveis e exigem muito mais cuidados na sua utilização.

**Palavras-chave:** Armazenamento de Energia, Bateria de Carnot, Bomba de Calor de Compressão a Vapor, Ciclo Orgânico de Rankine, Ciclo Transcrítico de Dióxido de Carbono, Energia Elétrica



## Abstract

With the decarbonization of the energy sector, an increase in the consumption of electrical energy is foreseeable, most of which will be provided by renewable generation sources that are intrinsically variable. To compensate for this variability, it will be necessary to resort to energy storage systems, with Carnot Batteries being one of the possible options for this purpose. This thesis focuses on the comparative analysis of the adequacy of different power cycles (e.g., ORC, subcritical, supercritical, transcritical) considering the evaluation of thermal energy storage (TES), to different thermal energy storage solutions.

In this work, a review of energy storage systems was carried out, with main emphasis on thermal energy storage systems in which Carnot Batteries are part. Then, a preliminary analysis of the configurations of the Carnot Battery was carried out, operating in subcritical and transcritical cycles with carbon dioxide, to establish the most efficient thermodynamic cycle of operation.

A careful analysis was also made of the influence of different working fluids on the overall system efficiency for the Carnot Battery. Among the selected fluids, R1233zd proved to be the most efficient.

In the end, using the model built in MATLAB, a dynamic simulation of thermal energy storage was carried out, for two distinct configurations, namely sensitive and latent storage. However, among the conclusions obtained, latent storage proved to be more efficient, but in turn constitute a much more expensive market value than sensitive storage and require much more care in its use.

**Keywords:** Energy Storage, Carnot Battery, Vapour Compression Heat Pump, Organic Rankine Cycle, Transcritical Carbon Dioxide Cycle, Electrical Energy



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xii
Simbologia.....	xii
Siglas .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE .....	3
2.1. Armazenamento de Energia.....	3
2.2. Classificação das Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	3
2.2.1. Armazenamento de Energia Mecânica .....	4
2.2.2. Armazenamento de Energia Térmica (TES) .....	7
2.2.3. Armazenamento Eletroquímico de Energia.....	14
2.2.4. Armazenamento Químico de Energia.....	14
2.2.5. Armazenamento Híbrido de Energia (HESS).....	15
3. BATERIAS DE CARNOT.....	18
3.1. Classificação das Baterias de Carnot.....	19
3.1.1. Armazenamento Bombeado de Energia Térmica Baseado no Ciclo de Brayton (PTES-Brayton) .....	20
3.1.2. Armazenamento Bombeado de Energia Térmica Baseado no Ciclo de Rankine (PTES-Rankine) .....	21
3.1.3. Armazenamento de Energia de Ar Líquido (LAES) .....	22
3.1.4. Outros conceitos – Lamm-Honigmann.....	24
3.2. Projetos no Âmbito das Baterias De Carnot .....	24
4. MODELAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	26
4.1. Ciclo de Carnot .....	26
4.2. Ciclo Convencional da Bomba de Calor e Orgânico de Rankine.....	27
4.2.1. Bomba de Calor.....	27
4.2.2. Ciclo Orgânico de Rankine.....	29
4.2.3. Ciclos Termodinâmicos Transcríticos .....	30
4.3. Análise Preliminar da Bateria de Carnot .....	32
4.3.1. Configuração Subcrítica .....	33
4.3.2. Configuração Transcrítica com CO <sub>2</sub> .....	35
4.4. Seleção de fluidos de trabalho para a Bateria de Carnot .....	37
4.5. Simulação do TES-Sensível.....	40
4.6. Comparação entre o TES-Sensível e TES-Latente .....	47
5. CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51
APÊNDICE - CÓDIGO DO MATLAB.....	54



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Classificação dos Sistemas de Armazenamento de Energia .....	4
Figura 2.2. Princípio de funcionamento de um sistema PHS [7] .....	5
Figura 2.3. Esquema de operação do CAES [5] .....	6
Figura 2.4. (a) Sistema de armazenamento de energia do volante onde a energia é armazenada como energia cinética rotacional de um cilindro no vácuo; (b) diagrama esquemático do armazenamento de energia de volante (FES), também chamado de acumulador[11] .....	7
Figura 2.5. Sistemas de armazenamento de frio (a) e armazenamento de calor (b)[13] .....	9
Figura 2.6. Classificação dos PCMs .....	13
Figura 2.7. Exemplos de tecnologias de armazenamento químico de energia [20] .....	15
Figura 3.1. Princípio de funcionamento de uma Bateria de Carnot (as setas sólidas representam a interação do sistema com o ambiente, as setas tracejadas representam a interação do sistema com o armazenamento a frio) [15] .....	18
Figura 3.2. Classificação das Baterias de Carnot com alguns exemplos .....	20
Figura 3.3. Diagrama de um Brayton PTES [14] .....	21
Figura 3.4. Diagrama de um Rankine PTES [14] .....	22
Figura 3.5. Diagrama de um LAES autónomo, incluindo configurações alternativas para os processos opcionais de recuperação de calor [14] .....	23
Figura 4.1. Diagrama T-s de uma bomba de calor genérica com compressão não isentrópica (à esquerda), representação esquemática da bomba de calor simples (à direita) com pontos de estado correspondentes; R-152a .....	27
Figura 4.2. Diagrama T-s de um ORC genérico com expansão e bombeamento não isentrópico, sobreaquecimento e sub-arrefecimento do fluido de trabalho R-152a30 .....	30
Figura 4.3. Diagrama P-h para processos de CO <sub>2</sub> super, trans e subcrítico [39] .....	31
Figura 4.4. Diagrama T-s dos ciclos transcíticos do HP e ORC [28] .....	31
Figura 4.5. Variação do COP com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point .....	33
Figura 4.6. Variação da eficiência do ORC com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point .....	34
Figura 4.7. Variação da eficiência global do sistema com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point .....	35
Figura 4.8. Variação do COP com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point do ciclo transcítico .....	35
Figura 4.9. Variação da eficiência do ORC com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point do ciclo transcítico .....	36

Figura 4.10. Variação da eficiência global do sistema com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point do ciclo transcrito .....	36
Figura 4.11. Variação do COP dos fluidos selecionados com a temperatura de armazenamento .....	38
Figura 4.12. Variação da eficiência do ORC dos fluidos selecionados com a temperatura de armazenamento .....	39
Figura 4.13. Variação da eficiência global dos fluidos selecionados com a temperatura de armazenamento .....	39
Figura 4.14. Fluxograma do algoritmo usado no Matlab .....	42
Figura 4.15. Parâmetros principais da fase de carga .....	44
Figura 4.16. Parâmetros principais da fase de descarga.....	45
Figura 4.17. Variação dos parâmetros de eficiência com a temperatura do armazenamento .....	46
Figura 4.18. Diagrama T-Q dos subprocessos da BC com armazenamento sensível (esquerda) e latente (direita)[40] .....	47
Figura 4.19. Comparação dos parâmetros principais da BC com um TES latente e sensível .....	48

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Capacidade térmica a 20° C de alguns materiais comuns de TES .....	10
Tabela 2.2. Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de PCMs .....	14
Tabela 2.3. Resumo dos sistemas de armazenamento de energia mais comuns .....	16
Tabela 2.4. Resumo dos sistemas de armazenamento de energia mais comuns (continuação) .....	17
Tabela 4.1. Parâmetros iniciais de simulação para a análise preliminar do ciclo subcrítico	32
Tabela 4.2. Propriedades dos fluidos selecionados .....	37
Tabela 4.3. Parâmetros iniciais de simulação .....	43

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

- $\eta$  – Eficiência
- $\eta_s$  – Eficiência Isentrópica
- $k$  – Energia Cinética
- $I$  – Momento de Inércia
- $\omega$  – Velocidade Angular
- $w$  – Trabalho Específico
- $q$  – Calor Específico
- $h$  – Entalpia Específica
- $U$  – Coeficiente Global de Transferência de Calor
- $R$  – Resistência Térmica
- $\dot{Q}$  – Taxa de Transferência de Calor
- $\dot{m}$  – Caudal Mássico
- $A$  – Área de Transferência de Calor
- $T$  – Temperatura
- $t$  – Tempo
- $E$  – Energia
- $c_p$  – Calor Específico
- $L$  – Entalpia de Mudança de Fase

### Siglas

- RES – Fontes de Energia Renováveis
- PV – Solar Fotovoltaica
- ESS – Sistema de Armazenamento de Energia
- TES – Armazenamento Térmico de Energia
- BC – Bateria de Carnot

HT – Alta Temperatura

LT – Baixa Temperatura

HP – Bomba de Calor

HE – Máquina Térmica

RC – Ciclo de Rankine

ORC – Ciclo Orgânico de Rankine

COP – Coeficiente de Performance

FES – Armazenamento de Energia de Volante

PCM – Material de Mudança de Fase

HESS – Armazenamento Híbrido de Energia

PHS – Armazenamento de Hidroelétrico Bombeado

CAES – Armazenamento de Energia de Ar Comprimido

P2P – Eficiência Global do Sistema/*Power to Power/Roundtrip efficiency*



## 1. INTRODUÇÃO

A problemática do aquecimento global como consequência dos efeitos das mudanças climáticas, constitui o principal estímulo para a produção de energia verde, pois a energia destaca-se significativamente como fonte de produção de gases com efeito de estufa. A energia como referência, engloba as necessidades de aquecimento, arrefecimento, produção de eletricidade e os transportes, que são indispensáveis para o nosso dia-a-dia.

De acordo com a Comissão Europeia, a década anterior (2011-2020) foi a mais quente alguma vez registada, tendo a temperatura média mundial atingido, em 2019, 1,1 °C acima dos níveis pré-industriais.

O aquecimento do planeta induzido pelo homem aumenta atualmente à taxa de 0,2 °C por década. Um aumento de 2 °C em relação às temperaturas da época pré-industrial tem um impacto negativo considerável no ambiente natural e na saúde e bem-estar humanos, incluindo um risco muito mais elevado de ocorrerem alterações ambientais perigosas – e, eventualmente, catastróficas – a nível mundial.

Contudo, com bastante esforço e ativismo tem se criado várias políticas em prol da descarbonização até 2050, tendo como ênfase a produção de energia elétrica através de fontes renováveis, nomeadamente energia hídrica, eólica e solar fotovoltaica (PV), para sustentar os sectores industriais, transportes e residenciais/serviços. Como a geração de fontes de energia renovável (RES) sustenta os esforços de descarbonização, espera-se que a taxa anual de adição de capacidade dos RES aumente cinco vezes de 2020 a 2050, resultando em 90% de fornecimento de eletricidade livre de combustíveis fósseis em cenários de emissões líquidas zero, contra 22,3 % de 2022.

Portanto, surgem preocupações pontuais devido a volatilidade intrínseca das fontes de energia renováveis, como a eólica e solar, que são dependentes das condições climáticas, e são necessárias soluções para assegurar o aumento crescente do seu uso. Dentre as soluções destacam-se principalmente os sistemas de armazenamento de energia, que é um dos principais facilitadores para maior penetração de energia renovável e futura descarbonização do sistema de energia.

Atualmente, tem sido criado diferentes tipos de sistemas de armazenamento de energia elétrica de pequena e grande escala, mas muitos são limitados pela geografia dos locais a se

instalar, pela dificuldade na aquisição de materiais e até mesmo pelo custo. Por isso, surge a necessidade de romper essas barreiras e construir sistemas armazenamentos de energia cada vez mais abrangentes e de utilidade universal.

Contudo, esta tese foca-se na análise comparativa da adequação de diferentes ciclos de potência (subcrítico e transcrito) tendo em análise o armazenamento térmico de energia (TES), a diferentes soluções.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Armazenamento de Energia

As tecnologias de armazenamento de energia constituem sistemas que possibilitam a regularização das diferenças que ocorrem instantaneamente ou devido as condições meteorológicas intermitentes que afetam a oferta de energia como a solar e eólica, por exemplo. O armazenamento de energia recentemente ganhou interesse acentuado devido aos avanços na tecnologia de armazenamento, aumento dos preços dos combustíveis fósseis e aumento da penetração da energia renovável no *mix* energético[1].

Atualmente, existem muitos sistemas e diferentes tecnologias de armazenamento de energia. Embora sua utilização e disponibilidade comercial sejam diferentes, cada tecnologia tem a sua singularidade. As tecnologias de armazenamento de energia são basicamente caracterizadas por suas capacidades de armazenamento de energia e potência. Uma maior capacidade de armazenamento permite cobrir maior extensão de demanda, enquanto uma maior potência energética permite responder a demandas de maior magnitude.

Dentro da gama de tecnologias de armazenamento de energia existentes, nenhum sistema pode fornecer simultaneamente uma longa vida útil, baixo custo, alta densidade e alta eficiência[2], o que significa que uma tecnologia de armazenamento adequada precisa ser selecionada para cada caso de acordo com a sua potencial aplicação[3].

### 2.2. Classificação das Tecnologias de Armazenamento de Energia

Embora as tecnologias de armazenamento de energia possam ser categorizadas com base em sua função específica, duração do armazenamento e velocidade de resposta, o método mais comum é pela forma como a energia é armazenada, podendo ser classificada em energia mecânica, termoquímica, química e térmica, como pode ser vista na figura 2.1. Além disso, a energia também pode ser armazenada de forma híbrida, ou seja, por meio da combinação de duas ou mais formas de armazenamento[4].

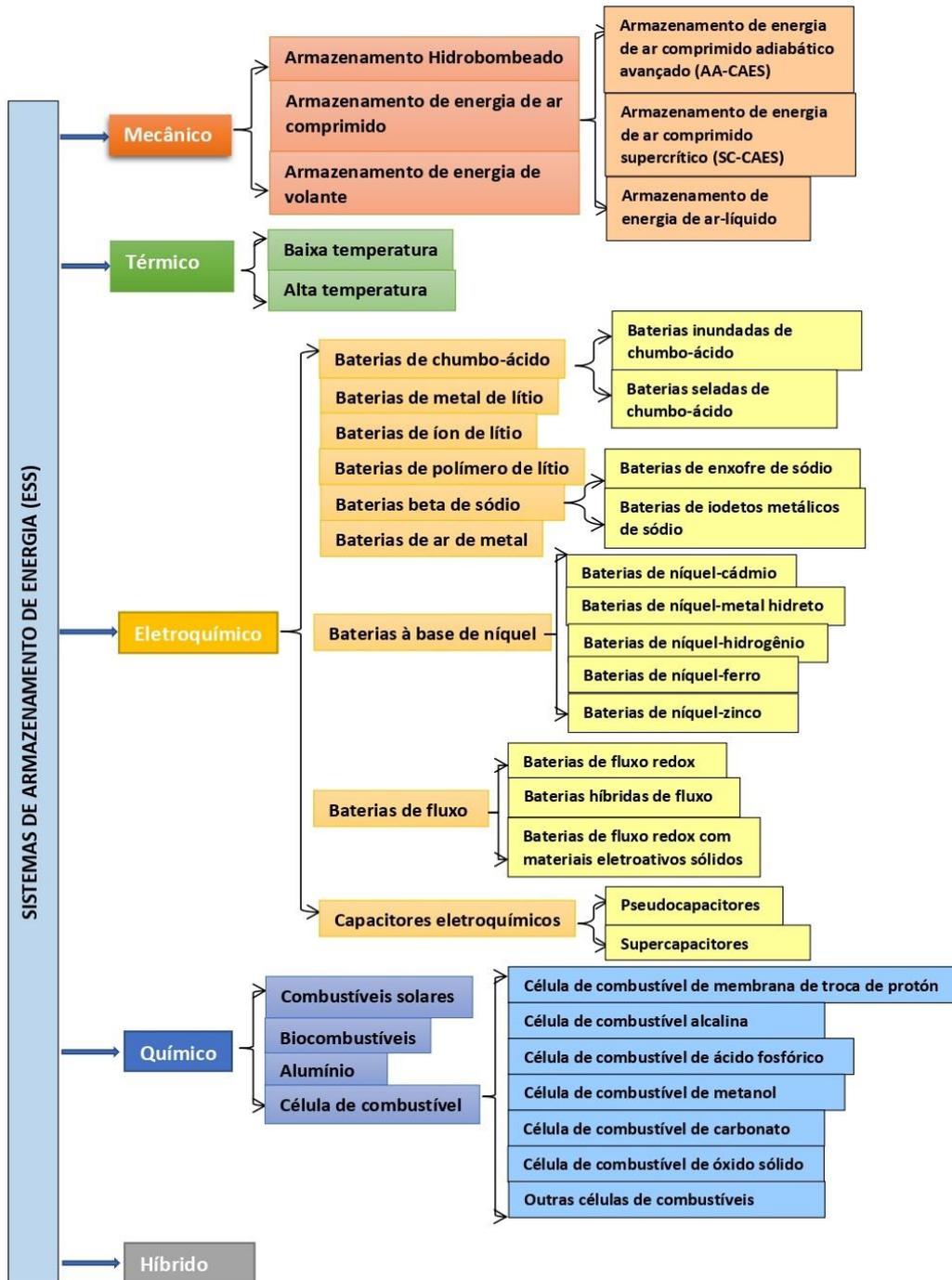


Figura 2.1. Classificação dos Sistemas de Armazenamento de Energia

### 2.2.1. Armazenamento de Energia Mecânica

Os armazenamentos de energia mecânica são bastante usados em todo mundo devido a sua flexibilidade para converter a energia, quando é necessário aplicar trabalho mecânico [4]. Tal como referido na figura 2.1, as formas mais comuns de armazenamento de energia

mecânica são: armazenamento hidroelétrico bombeado (PHS), armazenamento de energia de volante (FES) e armazenamento de energia de ar comprimido (CAES)[5]. De seguida serão descritos em detalhe cada um destes tipos de armazenamento.

### 2.2.1.1. Armazenamento Hidroelétrico Bombeado (PHS)

PHS é uma das técnicas de armazenamento mais populares em virtude da sua simplicidade e capacidade de armazenamento em larga escalada, i.e, numa faixa de 1 a 3000 MW. Este tipo de sistema, constitui o maior armazenamento de eletricidade do mundo com uma capacidade de até 125 GW, equivalente a 96% da capacidade de armazenamento elétrico mundial e 3% da capacidade de geração de energia elétrica do mundo[6]. O armazenamento hidroelétrico é uma tecnologia robusta e com alta eficiência (76-85 %), com baixo custo de capital por unidade de energia, longo período de armazenamento e um ciclo de vida que pode chegar até 50 anos ou mais. O seu princípio de operação, figura 2.2, é semelhante as centrais hidroelétricas convencionais, mas trabalhando no sentido inverso. Nas centrais hidrelétricas convencionais, a água é armazenada em um reservatório e é liberado para uma turbina de modo converter a energia potencial gravitacional da água em energia elétrica, i.e, a água armazenada pode ser usada apenas uma vez. No PHS, existem dois reservatórios desnivelados em altura, disponíveis juntamente com uma sala de turbinas/bombeamento[4]. Os PHS constituem uma das formas mais eficientes de armazenamento de energia, todavia são limitados pelo espaço e pelas condições geográficas.

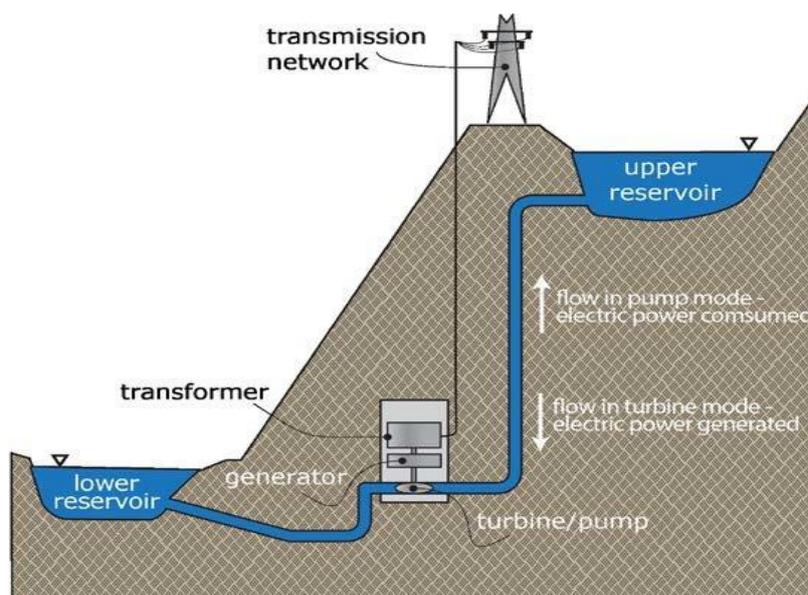


Figura 2.2. Princípio de funcionamento de um sistema PHS [7]

### 2.2.1.2. Armazenamento de Energia de Ar Comprimido (CAES)

CAES é uma tecnologia que armazena energia em forma de ar comprimido a alta pressão. Em comparação com PHS, CAES é muito menor em tamanho, porém a sua construção é muito mais difundida, sendo capaz de oferecer em larga escala, uma rede de distribuição e armazenamento mais ampla, com uma capacidade de armazenamento variando entre 35 MW a 300 MW[6].

Durante o processo de carregamento, o ar comprimido é armazenado num reservatório (geralmente uma caverna subterrânea); já no processo de descarrega esse ar pressurizado é expandido em uma turbina a gás para gerar eletricidade, tal como pode ser visto na figura 2.3. No entanto, existem diferentes tecnologias para esses tipos de armazenamento, nomeadamente CAES diabático, adiabático e isotérmico. A diferença entre esses sistemas consiste no tratamento dado ao calor no processo de compressão ou expansão. No CAES Diabático devido ao aumento da temperatura do ar em virtude do processo de compressão, o calor é liberado para a atmosfera, sendo reaquecido durante o processo de expansão. Já no CAES adiabático, o calor é armazenado num depósito térmico para uso posterior no processo de descarga e no CAES isotérmico é usado um *spray* de água para manter as temperaturas de compressão e expansão quase constantes[4].

Apesar da sua alta eficiência, estes tipos de sistemas são limitados pelas condições geográficas, pois geralmente requerem cavernas subterrâneas para o armazenamento.

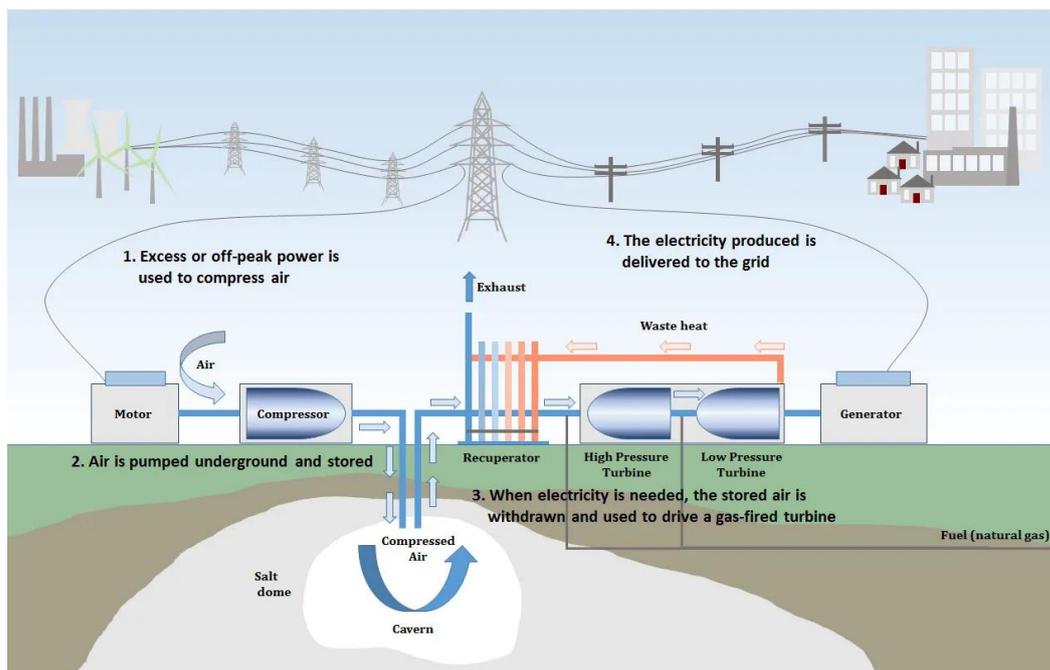


Figura 2.3. Esquema de operação do CAES [5]

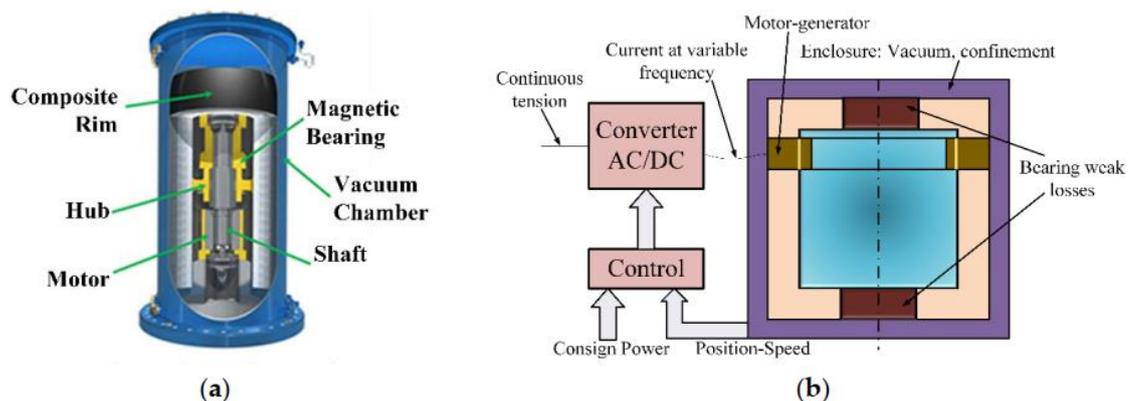
### 2.2.1.3. Armazenamento de Energia de Volante (FES)

Nos sistemas FES, o momento angular da massa do volante, é usado para armazenar energia na forma cinética. Têm alta potência e densidade energética, com um número infinito de ciclos de carga-descarga e são usados para estabilizar a tensão e a frequência[8]. O "estado de carga (SoC)" do FES é uma função do momento de inércia e da velocidade angular, como é mostrado na equação 2.1.

$$E = \frac{1}{2}mr^2(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (2.1)$$

Onde  $E$  é a energia útil do volante na faixa de velocidade angular máxima ( $\omega_{max}^2$ ) e mínima ( $\omega_{min}^2$ ). A massa do volante concentrado na borda e o raio são dados por  $m$  e  $r$  respectivamente. A eficiência do sistema FES está entre 85% a 90% devido a diminuição da fricção mecânica provocado pelo uso de rolamento magnético e resistência aerodinâmica muito baixa devido ao vácuo[9], [10].

As FES possuem uma capacidade de armazenamento de energia até 500 MJ, o que os torna úteis para uma ampla gama de sistemas de armazenamento de energia para aplicações como sistemas militares, satélites, transporte e entre outros[11]. Além disso, em comparação com as baterias eletroquímicas, as FES têm um ciclo vida mais longo e também maior tempo de resposta instantânea. Portanto, os principais componentes das FES podem ser vistos na figura 2.4.



**Figura 2.4.** (a) Sistema de armazenamento de energia do volante onde a energia é armazenada como energia cinética rotacional de um cilindro no vácuo; (b) diagrama esquemático do armazenamento de energia de volante (FES), também chamado de acumulador[11]

### 2.2.2. Armazenamento de Energia Térmica (TES)

A energia desempenha um papel importante na prosperidade econômica e na competitividade tecnológica de uma nação. Com a previsão de disponibilidade futura muitas

vezes imprecisa, é necessário ter uma ampla gama de tecnologias para atender as necessidades energéticas do futuro. Porém, as tecnologias desenvolvidas devem ser aquelas que garantem a segurança energética e qualidade ambiental.

Como problemas técnicos, econômicos e os riscos são reduzidos por meio de desempenho comprovado, espera-se que o TES seja aceite como uma opção atrativa nos setores industriais e comerciais que trará, entre outros benefícios, maior eficiência energética e conservação do meio ambiente. O TES foi identificado como um método crucial para diminuir as demandas elétricas de pico, ajudando assim a melhorar a escassez de energia prevista com o avanço da tecnologia e da civilização humana. O TES fornece um meio potencialmente econômico de usar o calor residual e a energia climática para atender a uma parcela significativa de nossas crescentes necessidades de eletricidade, aquecimento e arrefecimento, especialmente para instalações industriais e edifícios comerciais.

Os TESs têm sido usados de várias formas, ou seja, por meio de atividades de pesquisas desenvolvidas em vários laboratórios, universidades, centros de pesquisas e até mesmo em várias indústrias ao redor do mundo.

A energia térmica pode ser armazenada por intermédio do aumento ou diminuição da temperatura de uma substância (alterando seu calor sensível) ou através da mudança de fase da substância (alterando seu calor latente), ou ainda por meio da combinação dos dois. Em geral, são considerados três tipos principais de sistemas de TES: sensível (ex. água), latente (ex. água/gelo, hidratos de sais) e termoquímicos. A seleção do tipo de sistema de TES depende principalmente do período de armazenamento requerido, da viabilidade econômica e das condições de operações.

Basicamente, um TES é um sistema de "retenção" temporária de energia para uso subsequente durante horários picos de demanda. Assim, um dos principais objetivos dos sistemas de armazenamento de energia é regularizar a disparidade entre a oferta e a demanda de energia[12]. A temperatura na qual a energia é mantida, em parte, determina a sua potencial aplicação. Exemplos de TESs são os armazenamentos de energia solar para uso noturno, do calor do verão para aquecimento de ambientes no inverno, e de gelo do inverno para arrefecimento de ambientes no verão.

O aumento da procura de energia, a escassez de combustíveis fósseis e as preocupações com o impacto ambiental estão impulsionando o desenvolvimento de fontes de energia renováveis, como solar, biomassa e energia eólica. Devido a sua natureza intermitente, a

utilização eficaz dessas e de outras fontes de energia depende em parte da disponibilidade de sistemas de armazenamento de energia eficientes.

Um exemplo comum de um TES é o sistema solar de armazenamento de água quente. A fonte de energia é a radiação solar e o utilizador de calor é a pessoa que consome a água quente. Nesta situação, o armazenamento é necessário porque a taxa de fornecimento de energia é pequena em comparação com a demanda instantânea e porque a radiação solar nem sempre está disponível quando se necessita de água quente.

### 2.2.2.1. Princípio Básico do TES

Praticamente, o princípio básico de operação dum TES, figura 2.5, é semelhante para todos os tipos de sistemas. Ou seja, o princípio envolve pelo menos três processos primordiais, nomeadamente o carregamento, armazenamento e descarga. Na prática alguns processos podem ocorrer simultaneamente (ex. carregamento/armazenamento), bem como cada processo ocorrer mais de uma vez em cada ciclo. O processo de carregamento e descarregamento ocorrem geralmente por meio de ciclos termodinâmicos, como serão abordados posteriormente.

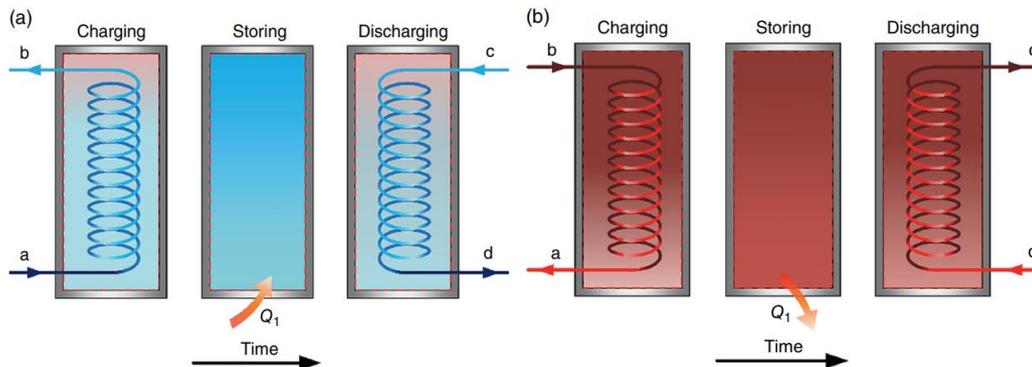


Figura 2.5. Sistemas de armazenamento de frio (a) e armazenamento de calor (b)[13]

Na figura acima pode ser visto os três processos em cada sistema TES: carregamento, armazenamento e descarga. Aqui o calor  $Q_1$  está se infiltrando e tem valor positivo para um sistema de armazenamento de frio. Se o calor  $Q_1$  é liberado, como é o caso de um sistema de armazenamento de calor, ele passa para o ambiente e tem valor negativo. O fluxo de calor é ilustrado para os processos de armazenamento, mas pode ocorrer em todos os processos[12].

### 2.2.2.2. Armazenamento de Energia Sensível (TES-Sensível)

Os TES sensíveis armazenam a energia em consequência da mudança de temperatura de um meio (material) de armazenamento como água, ar, óleo e areia[13]. Durante o

processo de absorção de calor, o material não sofre nenhuma mudança de fase, mas experiencia um aumento de temperatura[5]. A quantidade de calor armazenado numa determinada massa de material é expressa por:

$$Q = mc_p\Delta T = \rho c_p V \Delta T \quad (2.2)$$

Onde,  $m$  é a massa do material,  $c_p$  é a capacidade calorífica,  $\Delta T$  é a variação da temperatura,  $\rho$  é a densidade e  $V$  é volume.

No entanto, a quantidade de energia de entrada de um TES sensível é proporcional a densidade, volume, capacidade calorífica e variação da temperatura do material de armazenamento.

Cada meio tem suas próprias vantagens e desvantagens. Por exemplo, a água tem aproximadamente o dobro do calor específico da rocha e do solo. A alta capacidade térmica da água (~4,2 kJ/kg C), geralmente torna os tanques de água uma escolha lógica para sistemas TES que operam em uma faixa de temperatura necessária para aquecimento ou arrefecimento de edifícios[14].

A capacidade de armazenar calor sensível para um determinado material depende fortemente do valor da quantidade  $\rho c_p$ . A água tem um alto valor e é barata, mas sendo um líquido, deve ser contida em um recipiente de melhor qualidade do que um sólido. Para que seja útil em aplicações TES, o material normalmente deve ser barato e ter boa capacidade térmica.

Outro parâmetro importante no TES sensível é a taxa na qual o calor pode ser liberado e extraído. Esta característica é uma função da difusividade térmica. Por esta razão, *iron-shot* (grãos produzidos a base de ferro) é um excelente meio de armazenamento térmico, possuindo alta capacidade calorífica e condutividade térmica[15].

Na tabela 2.1 é mostrado a capacidade térmica de alguns materiais vulgais a temperatura ambiente.

**Tabela 2.1.** Capacidade térmica a 20° C de alguns materiais comuns de TES

<b>Material</b>	<b>Densidade, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Calor específico, J/kgK</b>	<b>Capacidade térmica volumétrica, MJ/m<sup>3</sup>K</b>
Argila	1458	879	1,28
Tijolo	1800	837	1,52
Arenito	2200	712	1,57

<b>Material</b>	<b>Densidade, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Calor específico, J/kgK</b>	<b>Capacidade térmica volumétrica, MJ/m<sup>3</sup>K</b>
Madeira	700	2390	1,67
Betão	2000	880	1,76
Vidro	2710	837	2,27
Alumínio	2710	896	2,43
Ferro	7900	452	3,57
Aço	7840	465	3,68
Cascalhos	2050	1840	3,77
Magnetite	5177	752	3,89
Água	988	4182	4,17
Betão armado	2400	1000	2,40
Calcário	2200	1000	2,10
Azulejo cerâmico	2000	800	1,60
Areia e cascalho	2000	910 – 1180	2,07

### 2.2.2.3. Armazenamento de Energia Latente (TSE-Latente)

Nesses tipos de sistemas o calor é armazenado de forma latente a temperatura constante, ocorrendo mudança de fase do material. Geralmente, a mudança de fase sólido-líquido é a mais recorrente. Mudança de fase sólido-sólido (mudança na estrutura cristalina do material sem entrar na fase líquida isotrópica) também são usados, embora que para este tipo de mudança o calor latente específico seja menor, ela apresenta vantagens como ausência de vazamento. Já a mudança de fase líquido-gás apresenta maior calor latente, mas a enorme mudança no volume dos materiais constitui um problema, portanto, no geral não é usado.

Contudo, a energia térmica armazenada pelo calor latente pode ser expressa através da equação 2.3[16]:

$$Q = m \cdot L \quad (2.3)$$

A entalpia de mudança de fase ( $L$ ), corresponde a quantidade de energia trocada por uma unidade de massa da substância para que mude de fase a temperatura constante. A mudança provocada pelo calor latente geralmente é muito maior que a do calor sensível para

um determinado material em relação ao seu calor específico. Quando a água se transforma em vapor, por exemplo, a troca de calor é da ordem de 2 MJ/kg[17].

A maioria dos sistemas práticos que usam armazenamento de energia de mudança de fase envolve soluções de sais em água, mas vários problemas estão associados a tais sistemas, incluindo os seguintes:

- Pode ocorrer super-arrefecimento do PCM, em vez de cristalização com liberação de calor;
- É difícil construir um permutador de calor capaz de lidar com a aglomeração de cristais de tamanhos variados que flutuam no líquido;
- A operação do sistema não pode ser completamente revertida.

Qualquer sistema TES de calor latente deve possuir pelo menos os três componentes a seguir[12]:

- 1) Uma substância de armazenamento de calor que passa por uma transição de fase dentro da faixa de temperatura operacional desejada e na qual a maior parte do calor adicionado é armazenada como calor latente;
- 2) Uma contenção para a substância de armazenamento;
- 3) Uma superfície de troca de calor para transferir calor da fonte de calor para a substância de armazenamento e desta para o dissipador de calor.

As principais vantagens dos sistemas TES latentes são as altas capacidades do TES por unidade de massa em comparação com sistemas de calor sensível e uma pequena faixa de temperatura de operação, pois a interação de calor ocorre em temperatura constante. Não há declínio gradual na temperatura a medida que o calor é removido do PCM. Compostos de sais que absorvem uma grande quantidade de calor durante a fusão são úteis para o armazenamento de energia. Sais eutéticos e hidratos de sais são amplamente utilizados. O sal de Glauber (sulfato de sódio decahidratado) é um dos principais PCM, pois possui alta capacidade de armazenamento de calor (280 kJ/kg) e temperatura de mudança de fase compatível com sistemas de energia solar (31,5° C), fazendo com que seja adequado para uso em projetos convencionais[12], [18], [19].

Outra categoria importante capaz de armazenar energia através da mudança de fase são as parafinas. Este tipo de material apresenta alta estabilidade em relação aos ciclos repetidos de operação latente do TES sem provocar degradação.

Em suma, os critérios mais importantes para a escolha de um material de mudança de fase para TES em que o material passa de sólido – líquido ou de sólido – sólido são:

- Alta entalpia de transição por unidade de massa;
- Capacidade de reverter totalmente a transição;
- Temperatura de transição adequada;
- Estabilidade química e compatibilidade com o recipiente (se presente);
- Alteração de volume limitada com a transição;
- Não toxicidade e baixo custo

#### 2.2.2.4. Materiais de mudança de fase (PCM)

Quando um material passa do estado sólido ao líquido ou vaporiza, ele absorve calor; quando muda para um sólido (cristaliza) ou para um líquido (condensa), ele libera seu calor. Essa mudança de fase é usada para armazenar calor em PCMs. Os PCMs mais típicos são água/gelo, hidratos de sais e certos polímeros.

Existem muitos tipos de PCMs comercialmente disponíveis para uma gama de temperatura limite, como é mostrado na figura 2.6.

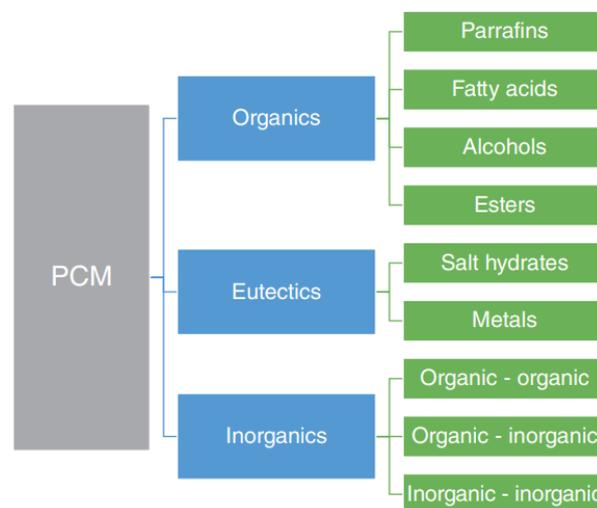


Figura 2.6. Classificação dos PCMs

Dentre as variedades de PCMs os hidratos de sais e as parafinas são as mais amplamente utilizadas para TES. De acordo com pesquisas feitas, as parafinas mostraram-se mais estáveis após vários ciclos termodinâmicos em comparação com os hidratos de sais. Por outro lado, os hidratos de sais são mais propensos a corrosão e apresentam sub-arrefecimento durante o processo de solidificação[12]. Uma breve comparação entre esses dois tipos de PCMs é mostrado na tabela 2.2.

**Tabela 2.2.** Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de PCMs

	<b>Hidratos de Sais (Inorgânicos)</b>	<b>Parafinas (Orgânicos)</b>
Vantagens	<i>Maior densidade; Maior variação de entalpia;</i>	<i>Termicamente estável; Não corrosivo; Quase não sofre sub-arrefecimento</i>
Desvantagens	<i>Menos estável; Corrosivo; Sub-arrefecido</i>	<i>Menor variação de entalpia; Baixa densidade; Inflamável</i>

Uma vez que as densidades de energia para TES latente são mais elevadas em relação ao TES sensível, normalmente resultam dispositivos de armazenamento menores, mais leves e com menores perdas de armazenamento.

### 2.2.3. Armazenamento Eletroquímico de Energia

Os armazenamentos eletroquímicos de energia, conhecidos convencionalmente como baterias, são dispositivos que convertem energia química (energia livre de Gibbs) em energia elétrica no processo de descarga. Essa conversão ocorre na interface entre a massa do eletrodo ativo e o eletrólito por meio de uma reação eletroquímica de oxidação-redução. Porém, no processo de carregamento ocorre a reação reversa com a absorção da corrente elétrica. As baterias eletroquímicas consistem em três componentes principais: o eletrodo negativo, o eletrodo positivo e um eletrólito condutor de íão.

### 2.2.4. Armazenamento Químico de Energia

São sistemas armazenam energia na forma de combustíveis químicos que podem ser facilmente convertidos em energia mecânica, térmica ou elétrica. Os sistemas de geração de energia podem aproveitar o armazenamento de energia química para maior flexibilidade. O excesso de eletricidade pode ser usado para produzir uma variedade de produtos químicos, como o hidrogênio por exemplo, que pode ser armazenado e posteriormente usado para produzir eletricidade ou para uma variedade de aplicações conforme é ilustrado na figura 2.7.

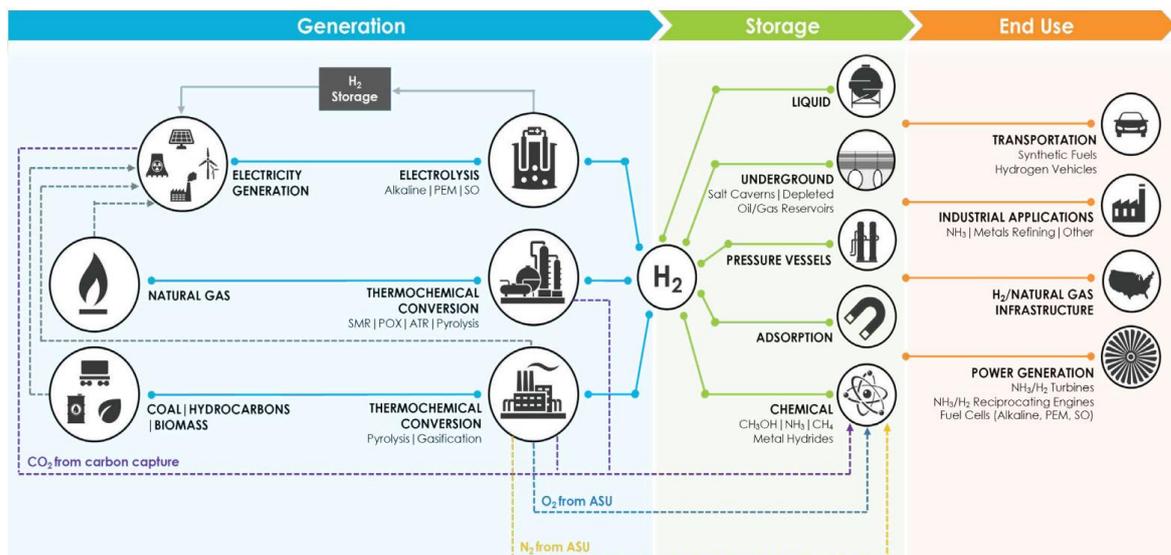


Figura 2.7. Exemplos de tecnologias de armazenamento químico de energia [20]

### 2.2.5. Armazenamento Híbrido de Energia (HESS)

Em geral, um HESS é um sistema de armazenamento de energia integrado, composto por dois ou mais sistemas de armazenamento de energia que operam de maneira simultânea. A aplicação dos HESSs tem se destacado em vários contextos, incluindo o sector de energias renováveis, redes inteligentes, indústrias automobilísticas e naval. Em comparação com os sistemas de armazenamento de energia convencionais, a integração harmónica das tecnologias de armazenamento híbrido de energia oferece um desempenho geral aprimorado em relação à eficiência, confiabilidade e vida útil.

Nas tabelas 2.3 e 2.4 estão dispostas algumas tecnologias de armazenamento de energia em desenvolvimento e em fase comercial.

**Tabela 2.3.** Resumo dos sistemas de armazenamento de energia mais comuns

Tecnologia	Referência	Potência [MW]	Energia [MWh]	Tempo de descarga	Tempo de resposta	Auto-descarga [%/dia]	Duração de armazenamento	Roundtrip efficiency [%]	Vida útil (anos)
<b>PHS</b>	[21], [22]	100-5000+	1000+	1-24+ h	~3 min	0.005-0.02	h-mês	65-85	30-60
		10-5000		1-24+ h	s-2 min				
<b>CAES</b>	[21], [22]	0.1-1000+	1-1000+	1-24+ h	1-10 min	0.003-1	h-mês	40-95	20-40
		5-100		1-24+ h	1-15 min		médio prazo		
<b>Flywheel</b>	[21], [22]	0.1-10	0.01-5	ms-s	ms-s	55-100	s-min	75-95	15-20
		0-20		ms-min	4 ms-s		s-curto prazo		
<b>Baterias convencionais</b>	[21], [22]	0.001-50	10 <sup>-5</sup> -100	s-h	ms	0.033-1.2	min-dia	60-95	5-20
		0-100		s-h	ms-s		0-0.83		curto-longo prazo
<b>Baterias de fluxo</b>	[21], [22]	0.005-15	0.01-10+	s-10h	ms	0.2-0.24	h-mês	57-85	5-15
		0.05-15		s-10h	s-10 min		0.2-0.24		longo prazo
<b>Baterias de alta temperatura</b>	[21], [22]	0.001-50	0.12-600	s-h	ms	0.05-20	s-h	70-90	10-15
		0-34		s-h	s-2 min		0.05-20		médio-longo prazo
<b>Supercapacitores</b>	[21], [22]	0.001-50	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-2</sup>	ms-h	ms	20-40	s-h	85-95	10-20
		0-10		ms-h	<10 ms		5-4.0		curto prazo
<b>SMES</b>	[21], [22]	0.01-10	10 <sup>-4</sup> -0.1	ms-s	ms	10-15	min-h	80-90	15-20
		0.1-10		ms-1 min	<100 ms		10-15		curto prazo
<b>PTES</b>	[21], [22]	0.5-10+	0.5-60+	1-6+ h	<1 min	1	h-mês	70-80	25

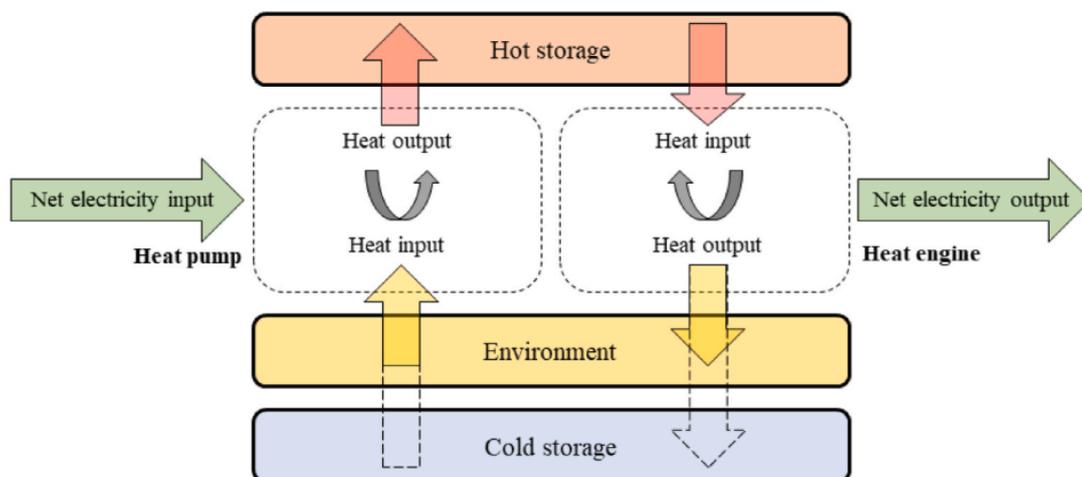
**Tabela 2.4.** Resumo dos sistemas de armazenamento de energia mais comuns (continuação)

<b>Tecnologia</b>	<b>Referência</b>	<b>Densidade de potência [kW/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Potência específica [W/kg]</b>	<b>Densidade energética [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Energia específica [Wh/kg]</b>	<b>Custo capital de potência (\$/kW)</b>	<b>Custo capital de energia (\$/kWh)</b>	<b>Estado</b>	<b>Aplicação</b>
<b>PHS</b>	[21], [22]	-	-	0.5-1.5	0.5-1.5	600-200	5-100	Desenvolvido	Deslocamento de cargas
				0.5-2	2500-4300	5-271	Comercial		
<b>CAES</b>	[21], [22]	-	-	3-12	30-60	400-2000	2-200	Comercial	Deslocamento de cargas
				0.5-10	400-1628	2-271	Comercial		
<b>Flywheel</b>	[21], [22]	1000-2000	400-1500	20-80	5-100	250-350	1000-5000	Comercial	Qualidade de energia
		800-200	20-80	250-380	500-14000	Desenvolvido			
<b>Baterias convencionais</b>	[21], [22]	10-10000	75-2000	50-500	20-250	300-4000	200-2500	Comercial	Transporte, Reserva de energia
		7.8-5000	25-600	15-500	15-207	200-4342	54-2500	Demonstração	
<b>Baterias de fluxo</b>	[21], [22]	0.2-0.25	45-166	150-250	10-85	330-2500	120-100	Demonstração	Qualidade, Reserva de energia
		0.5-34	1.31-166	10-70	10-54	175-4500	110-200	Comercial	
<b>Baterias de alta temperatura</b>	[21], [22]	120-300	150-230	85-240	85-240	~400-3000	300-1000	Comercial	Deslocamento de cargas
		3.5-500	150-230	100-280	100-240	150-3256	100-543	Aprovado	
<b>Supercapacitores</b>	[21], [22]	100000	500-5000	10-30	2.5-50	100-360	300-2000	Demonstração	Qualidade de energia
		1000-5000	500-10000	1-35	0.5-22	100-480	300-2000	Pré-comercial	
<b>SMES</b>	[21], [22]	1000-400	500-2000	0.2-2.5	0.5-5	200-350	1000-10000	Demonstração	Qualidade de energia
		300-4000	500-2000	0.2-13.8	1-75	200-489	1085-10854	Pré-comercial	
<b>PTES</b>	[21], [22]	-	-	~110-170	~50-140	~600	~60	Pré-comercial	Deslocamento de cargas

### 3. BATERIAS DE CARNOT

As Baterias de Carnot (BC) são soluções de armazenamento de energia onde a eletricidade é armazenada como exergia térmica[15]. As Baterias de Carnot têm como princípio básico de operação estabelecer uma diferença de temperatura entre dois reservatórios térmicos (de alta e baixa temperatura). Essa diferença de temperatura é provocada pela entrada de energia elétrica num sistema que opera através de um ciclo termodinâmico durante o processo de carregamento. Posteriormente, essa diferença de temperatura aciona um ciclo de potência térmica para produção de eletricidade durante o processo de descarga, como é ilustrado na figura 3.1.

Entretanto, os processos de carregamento e descarga das BC envolvem, respectivamente, conversão direta e inversa entre eletricidade e calor, enquanto a fase de armazenamento consiste no armazenamento de energia térmica (TES).



**Figura 3.1.** Princípio de funcionamento de uma Bateria de Carnot (as setas sólidas representam a interação do sistema com o ambiente, as setas tracejadas representam a interação do sistema com o armazenamento a frio) [15]

Na prática, segundo Dumont[23] et al. Steinmann[24], existem muitas variações tecnológicas possíveis de BCs. O carregamento pode ser realizado quer através da conversão direta ou intermédio de qualquer ciclo termodinâmico da bomba de calor. A descarga oferece uma gama de opções semelhantes com motores térmicos aos de ciclo de Brayton, Rankine ou Stirling, suas combinações e também conversão direta como sistemas termoeletrônicos, termo-iônicos e termo-fotovoltaicos.

Os primeiros exemplos relacionados as BCs remontam a 1924, quando *Fritz Marguerre*[19]patenteou sua própria solução de armazenamento de energia térmica, ou mesmo a 1833 ao trabalho de *Ericsson*[25]. Na última década, devido altas volatilidades da produção de eletricidade e seu descompasso com a demanda, contraiu-se maior interesse por esta tecnologia. As Baterias de Carnot normalmente fornecem uma eficiência relativamente baixa na faixa de 30% a 70% em comparação com outros sistemas, mas também apresentam baixo custo para armazenamento de eletricidade de média e longa duração.

As BCs apresentam muitas vantagens em relação as outras tecnologias de armazenamento de energia, incluindo:

- i. Baixo custo, uma vez que os materiais de armazenamento térmico podem ser baratos e abundantes;
- ii. Sem restrições geográficas;
- iii. Alta densidade de energia;
- iv. Facilidade de implantação comercial e escalabilidade de tamanho, dada a disponibilidade de mercado dos seus principais componentes.

Existe uma grande variedade de classes das BCs de acordo com diferentes autores e literaturas. Dentre as principais classes propostas, destacam-se as seguintes: armazenamento bombeado de energia térmica (PTES), armazenamento de energia de ar líquido (LAES) e armazenamento de Lamm-Honigmann (LHS). O PTES pode ser ainda subdividido em ciclos baseados em Brayton e Rankine[26]. Mais detalhes sobre a classificação das BCs são destacados na seção 3.1.

Contudo, é necessário destacar que o armazenamento de energia de ar comprimido (CAES) não é considerado uma BC, porque armazena energia principalmente na forma de ar de alta pressão em vez de energia térmica do processo de compressão. Também não se deve confundir a energia solar concentrada ou eólica com BC, a menos que a energia solar ou eólica primária seja convertida em eletricidade antes de ser transformada em calor.

### **3.1. Classificação das Baterias de Carnot**

A classificação de BC adotada para esta dissertação é apresentada na figura 3.2; é baseado nos ciclos termodinâmicos mais proeminentes propostos no âmbito das BCs. Embora não seja único, ele cria uma estrutura útil para discussão e comparação de classes alternativas de BC, conforme discutido a seguir.

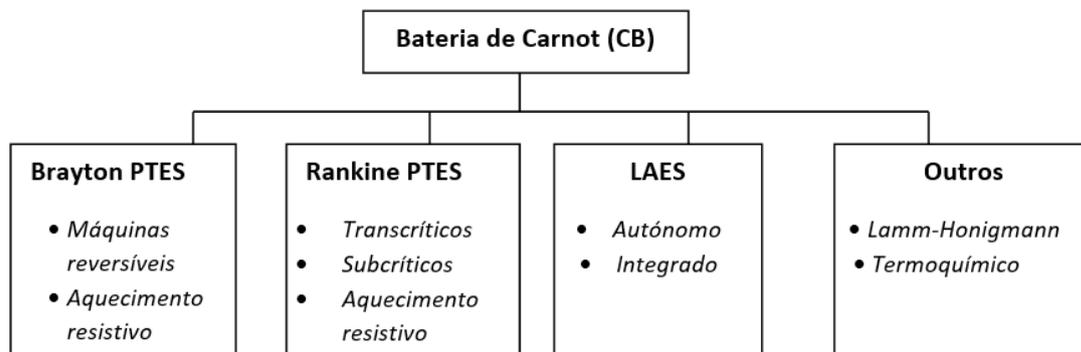


Figura 3.2. Classificação das Baterias de Carnot com alguns exemplos

### 3.1.1. Armazenamento Bombeado de Energia Térmica Baseado no Ciclo de Brayton (PTES-Brayton)

O armazenamento de energia térmica baseado no ciclo de Brayton geralmente opera um ciclo reversível de Brayton entre dois reservatórios (quente e frio). Na figura 3.3 é ilustrada a configuração desse sistema.

Durante o carregamento, o ciclo funciona no sentido horário; um fluido de trabalho gasoso é comprimido (1-2) e o calor de compressão é transferido para o TES quente (2-3). Então, a expansão do gás (3-4) resulta em baixa pressão de saída e temperaturas mais baixas no ponto 4, que diminuem a temperatura no TES frio (4-1), estabelecendo uma diferença de temperatura positiva entre os dois reservatórios térmicos. Durante a descarga, o ciclo é invertido. O calor é transferido do TES quente para o fluido pressurizado (3'-2') para impulsionar a expansão da turbina (2'-1'), e a energia fria é usada (1'-4') para reduzir o trabalho de compressão (4'-3'). Brayton PTES opera um ciclo de malha fechada, o que cria a necessidade de um ou dois permutadores de calor extras para rejeitar o calor gerado por irreversibilidades e garantir a operação cíclica. As faixas típicas de temperatura e pressão para Brayton PTES são 170 a 950 °C e 1 a 20 bar[14].

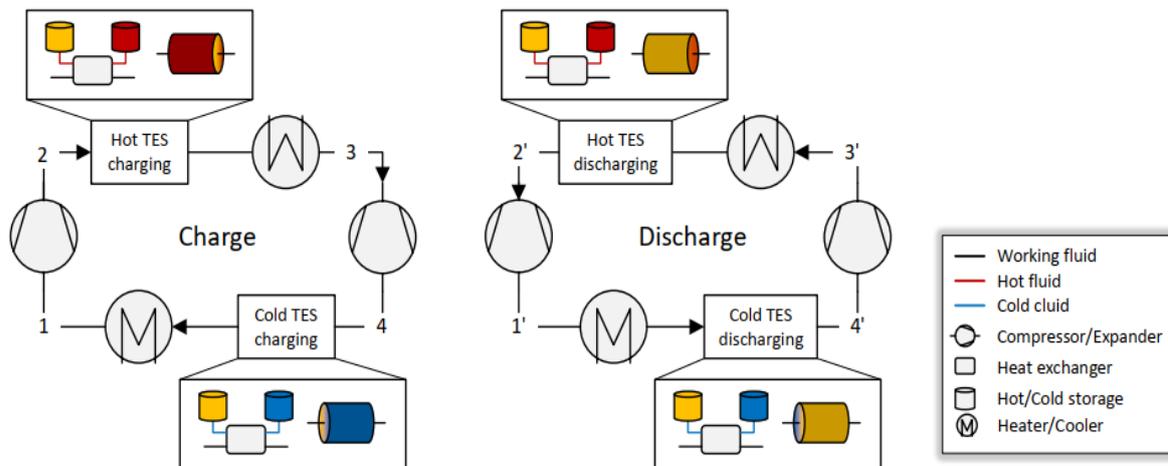


Figura 3.3. Diagrama de um Brayton PTES [14]

Os fluidos de trabalho mais comuns para Brayton PTES são os gases monoatômicos argônio e hélio. Para uma taxa de compressão fixa, eles permitem temperaturas de processo mais altas, o que é benéfico para a eficiência do sistema. Além disso,  $\text{CO}_2$  supercrítico, hidrogênio e nitrogênio também foram estudados como fluidos de trabalho. Segundo Benato e Stoppato, o ar deve ser preferido ao argônio se um aquecedor elétrico for incluído no processo, pois deste modo podem ser alcançados maior potência e eficiência do sistema[14].

Segundo a literatura, a eficiência global dos PTES-Brayton está em torno de 60-70%, no entanto, esses valores são altamente sensíveis ao desempenho politrópico da máquina[27].

### 3.1.2. Armazenamento Bombeado de Energia Térmica Baseado no Ciclo de Rankine (PTES-Rankine)

Tal como no PTES-Brayton, neste tipo de sistema os reservatórios também são carregados com exergia térmica e o ciclo Rankine produz trabalho aproveitando a diferença de temperatura entre os reservatórios de alta e baixa temperatura. Em comparação com os sistemas Brayton, o PTES baseado em Rankine oferece as vantagens de alta densidade de energia e operação em baixa temperatura – esses recursos permitem armazenamento mais compacto, menor auto-descarga e integração potencialmente mais eficiente do calor residual.

O diagrama de fluxo do processo de um PTES-Rankine é representado na figura 3.4; compreende uma bomba de calor de compressão de vapor e uma unidade de recuperação de energia baseada em um ciclo Rankine, além de uma seção de armazenamento de energia térmica (TES). Durante a fase de carregamento, o fluido de trabalho é evaporado (1-2) e

depois comprimido a altas temperaturas e pressões (2-3), liberando calor sensível e latente para o TES durante a condensação (3-4) e finalmente expandido para baixas pressões (4-1). Já na descarga ou produção de energia, o fluido líquido é bombeado a alta pressão (1'-4'), evaporado com energia do TES (4'-3') e expandido em uma turbina (3'-2'). No final, é condensado através de um permutador de calor auxiliar e do reservatório de frio (2'-1'). As faixas de temperatura e pressão para Rankine PTES variam de  $-30\text{ °C}$  à  $400\text{ °C}$  e entre 1 e 200 bar. Para um sistema de aquecimento resistivo, a bomba de calor é substituída por um aquecedor resistivo[14].

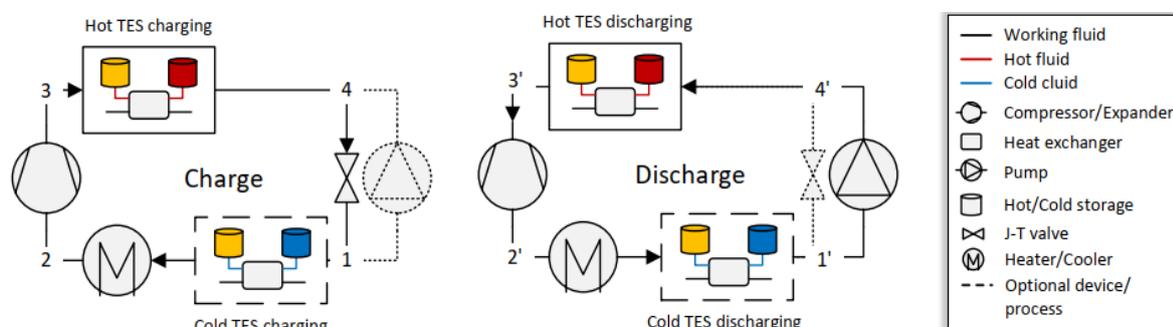


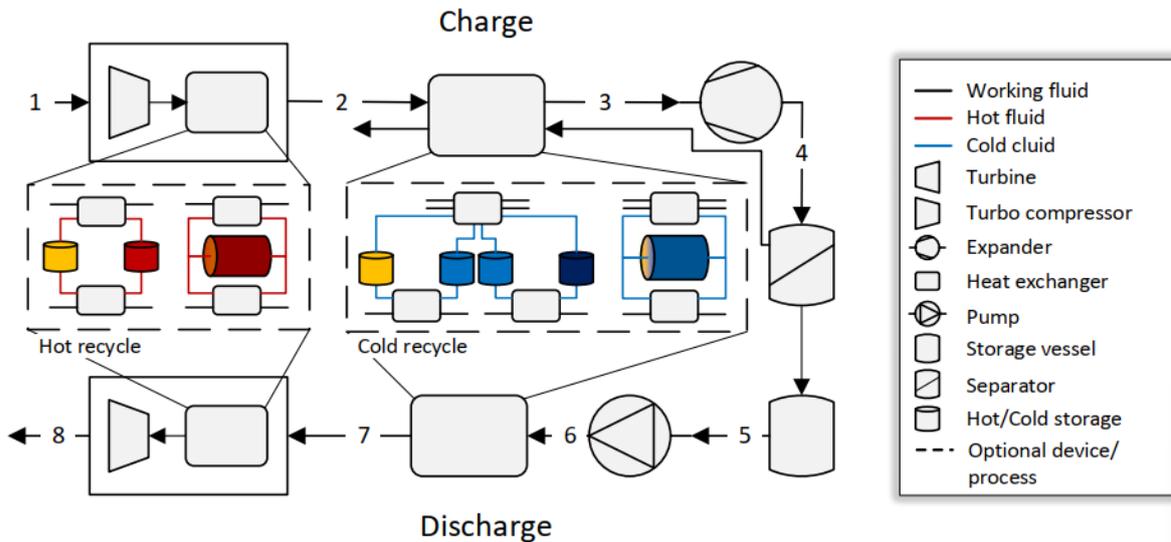
Figura 3.4. Diagrama de um Rankine PTES [14]

O PTES baseado em Rankine inclui ciclos de Rankine a vapor[28], ciclos de Rankine orgânicos (ORC)[18] e ciclos de  $\text{CO}_2$  transcíticos[29]. Os ciclos de amônia e vapor de água em cascata[28], bem como os ciclos de  $\text{CO}_2$  transcítico em cascata e  $\text{NH}_3$  subcrítico[25] também foram propostos e estudados. A eficiência global (RTE) do ciclo PTES baseado em Rankine está normalmente na faixa de 40% a 70%, podendo ser aumentada para mais de 100% com base na entrada de eletricidade quando são utilizadas fontes de calor residuais (geotérmico por exemplo) [30].

### 3.1.3. Armazenamento de Energia de Ar Líquido (LAES)

O armazenamento de energia de ar líquido é um sistema que opera através de um ciclo fechado como pode ser visto na figura 3.5. Durante o carregamento do sistema, ocorre um processo de liquefação do ar: o ar ambiente é comprimido (1-2), arrefecido a temperaturas criogênicas por: i) fluxo de gás de ar de retorno; ii) uma porção de ar que se expande externamente; e iii) frio recuperado da evaporação do ar (2-3). O ar é então parcialmente liquefeito com um dispositivo de expansão (3-4) e a fração de gás sofre recirculação para

fornecer arrefecimento no processo. O ar líquido é armazenado quase à pressão ambiente num recipiente isolado a vácuo. Durante a descarga, o ar líquido é bombeado a alta pressão (5-6), evaporado (6-7) e finalmente expandido numa turbina (7-8), para gerar a potência necessária[14].



**Figura 3.5.** Diagrama de um LAES autónomo, incluindo configurações alternativas para os processos opcionais de recuperação de calor [14]

Devido as temperaturas muito baixas do ar líquido, o ambiente pode atuar como o reservatório quente que alimenta o processo de expansão, mas foi prevista uma eficiência baixa do sistema para este caso[31]. Portanto, o calor de compressão liberado durante a carga do LAES é armazenado e reciclado para fornecer energia térmica quente para a expansão e, da mesma forma, o frio de evaporação é usado para fornecer arrefecimento extra durante a liquefação do ar. Para LAES autónomo, as pressões de carga ideais estão na faixa dos 10-18 MPa e as pressões de descarga recomendadas de 7 a 12 MPa. As temperaturas variam de -196 °C (o ponto de saturação do ar à pressão ambiente) a 400 °C.

Nestes tipos de sistemas de armazenamento de energia, o fluido de trabalho é também o próprio meio de armazenamento, que é armazenado na forma líquida a temperaturas criogénicas. Embora tenha sido estudada a aplicação de outros fluidos criogénicos, como nitrogénio ou metano, o ar é ainda preferível pela sua abundância e custo zero. Entretanto, para as operações de carregamento e descarga são usados ciclos termodinâmicos individuais, pois os subsistemas são independentes. No caso de uma planta autónoma, os ciclos Claude ou Kapitza são escolhidos para liquefação[32], enquanto a unidade de recuperação de energia usa um ciclo Rankine supercrítico[33].

### 3.1.4. Outros conceitos – Lamm-Honigmann

Alguns conceitos de BC além de PTES e LAES também foram discutidos na literatura, como o armazenamento Lamm-Honigmann. Este tipo de sistema de armazenamento de energia, usa uma reação de absorção reversível para armazenar calor por meio de um armazenamento de energia termoquímica, separando a água de um absorvente. Durante o processo de carregamento, a água é dissolvida usando calor e condensada num tanque separado. Essa entrada térmica pode vir de compressão de vapor ou calor residual. Durante a descarga, devido a diferença de pressão entre a água e o absorvente, é acionado um dispositivo de expansão para gerar eletricidade. Assim, de forma geral a configuração do sistema consiste em dois permutadores de calor/reatores (sendo um absorvedor e o outro atuando como evaporador ou condensador) combinado com uma máquina de expansão. O absorvente pode ser NaOH ou LiBr[34]. A temperatura da fonte de calor, as propriedades do par de fluidos de trabalho e a entalpia de reação podem ter uma grande influência na eficiência do sistema, com valores entre 10% e 40%.

## 3.2. Projetos no Âmbito das Baterias De Carnot

Como referido no capítulo 3, nos últimos anos tem se desenvolvido vários projetos científicos e comerciais no âmbito das BCs.

O. Dumont[23], desenvolveu um sistema integrado de armazenamento de energia a baixo custo baseada em uma bateria de Carnot usando um sistema HP/ORC reversível; foi utilizado a água como meio de armazenamento a alta temperatura e o R1233zd como fluido de trabalho. Através desta configuração, se obteve uma eficiência global de 72,5%, com a eficiência do ORC de 5% (elevação igual a 49 K) e COP da HP de 14,4 (elevação igual a 8 K).

Smallbone A[35], construiu uma BC baseada no ciclo de Brayton que consiste em uma bomba de calor de Brayton e um motor térmico de Brayton para armazenar calor em um leito compactado. A temperatura de armazenamento de calor era de 500 °C e a eficiência global do sistema era de 72%.

Chester[36], usou bombas de calor e ORC para construir uma BC com uma temperatura de armazenamento de 180 °C, e o meio de armazenamento tinha tanto calor latente como sensível.

Zamengo M[37], propuseram uma BC usando armazenamento/bomba de calor químico e ciclo de Brayton. A eficiência global do sistema pode chegar a 37,4%-41,7%, que é basicamente a mesma do sistema de armazenamento de calor sensível de sal fundido de alta temperatura. No entanto, em comparação com o sistema de armazenamento de calor sensível de sal fundido de alta temperatura, a capacidade total de armazenamento necessária pode ser reduzida em cerca de 66%.

Jockenhöfer[38], introduziram uma BC subcrítica termicamente integrada usando o buteno como fluido de trabalho, com uma taxa máxima de potência líquida de carga-descarga de 125% e uma eficiência exergética máxima de 59%.

Jintao Niu[39], otimizaram uma BC comparando a eficiência e custo nivelado do sistema (LCOS) de armazenamento de energia com e sem regeneração de energia, usando três combinações diferentes do fluido de trabalho, respectivamente. Assim sendo, verificou-se que a eficiência global da BC básica é ligeiramente inferior à da BC com regeneradores. No entanto, devido à redução de regeneradores, o investimento total diminuiu 36,18%. Ao mesmo tempo, a potência líquida de saída diminuiu apenas 1,71%, portanto o LCOS é significativamente reduzido. Mas quando a combinação de fluido de trabalho de R245fa-R601 é usada na BC básica e na com regeneradores, nesta última todos os parâmetros de otimização preestabelecidos são mais eficientes, obtendo-se uma redução de investimento de 2,29%, uma eficiência global de 68,56% e um LCOS do sistema 10,46% menor que o da BC básica.

## 4. MODELAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para estudar a Bateria de Carnot foi implementado diferentes configurações num modelo construído no MATLAB devido a sua ampla integridade e flexibilidade. O software COOLPROP foi integrado no MATLAB para determinar as propriedades dos fluidos.

Por intermedio deste modelo foi estudado a performance e os parâmetros que influenciam nos ciclos termodinâmicos da Bomba de calor (HP) e do Ciclo orgânico de Rankine (ORC), que são os modos utilizados para a carga e descarga da Bateria de Carnot, respetivamente. Finalmente, por meio de um modelo transiente foi simulado o comportamento do armazenamento térmico de energia (TES) em cada ciclo.

### 4.1. Ciclo de Carnot

O ciclo de Carnot é definido como um ciclo termodinâmico ideal fechado, no qual o fluido de trabalho passa por 4 estágios consecutivos, isto é, dois (2) processos isotérmicos e dois (2) processos adiabáticos. Este ciclo permite determinar a máxima eficiência possível de uma máquina térmica em função das temperaturas das fontes.

O parâmetro que permite determinar a performance de Carnot para uma bomba de calor é o seu COP; já para uma máquina térmica este parâmetro é dado pela sua eficiência. Porém, ambos dependem respetivamente das temperaturas das fontes quentes e frias em cada um dos ciclos, como podem ser vistos nas equações 4.1 e 4.2.

$$COP = \frac{T_Q}{T_Q - T_F} \quad (4.1)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad (4.2)$$

onde,  $COP$  é o coeficiente de performance da bomba de calor,  $\eta$  é a eficiência da máquina térmica,  $T_Q$  e  $T_F$  são as temperaturas das fontes quente e fria em Kelvin, respetivamente.

O parâmetro que determina a eficiência de uma Bateria de Carnot é a eficiência global (*roundtrip efficiency*), dado pelo produto do  $COP$  e  $\eta$ , i.e:

$$P2P = COP \cdot \eta \quad (4.3)$$

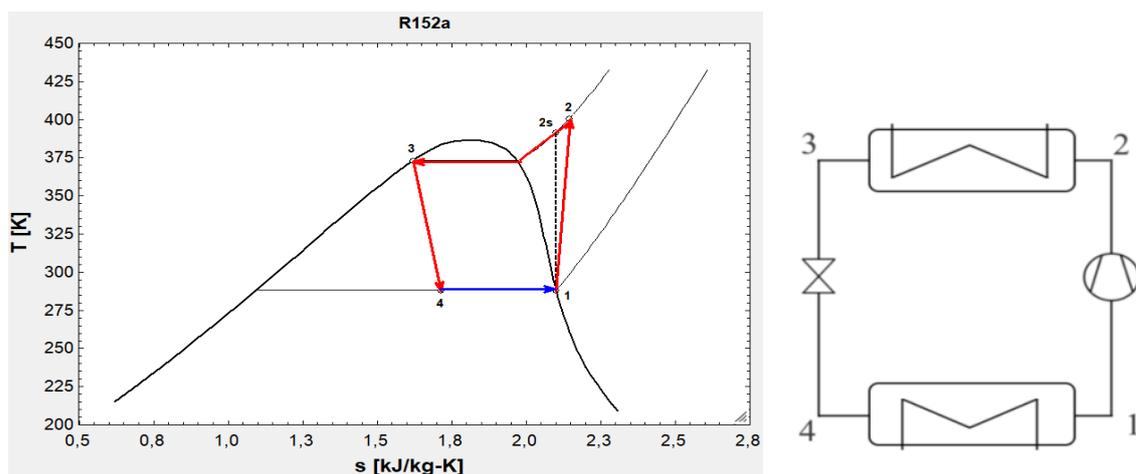
Assim sendo, este será o máximo *roundtrip efficiency* possível para uma Bateria de Carnot ideal de acordo com a natureza dos ciclos termodinâmicos usados. No entanto, esse modelo é significativamente muito simples no âmbito prático, mas é ainda uma referência para determinar o nível de otimização para uma bomba de calor ou de uma máquina térmica.

## 4.2. Ciclo Convencional da Bomba de Calor e Orgânico de Rankine

Estes ciclos termodinâmicos são geralmente constituídos por 4 processos, isto é, dois permutadores de calor a pressão constante e dois processos de compressão/expansão. Deste modo, de uma maneira preliminar, foi simulado uma Bateria de Carnot utilizando os processos convencionais dos ciclos da Bomba de Calor e Orgânico de Rankine.

### 4.2.1. Bomba de Calor

Uma bomba de calor é uma máquina que opera retirando energia térmica de uma fonte fria e com objetivo de bombear para uma fonte quente. O seu funcionamento tem como base o processo termodinâmico natural que ocorre em sentido único, determinado pela Segunda Lei da Termodinâmica. Na figura 4.1 é apresentado o sistema convencional de uma bomba de calor.



**Figura 4.1.** Diagrama T-s de uma bomba de calor genérica com compressão não isentrópica (à esquerda), representação esquemática da bomba de calor simples (à direita) com pontos de estado correspondentes; R-152a

No diagrama T-s o processo ocorre no sentido anti-horário, onde partindo do ponto 1, tem-se:

- De 1-2 ocorre a compressão a vapor do fluido refrigerante, provocando o aumento da pressão e da entalpia. Assim sendo, o trabalho do compressor é dado pela variação da entalpia entre esses dois pontos.

$$w_c = h_2 - h_1 \quad (4.4)$$

- Do ponto 2-3 o fluido no estado de vapor comprimido atravessa o condensador, onde é arrefecido e condensado, simultaneamente, rejeitando calor para o reservatório quente a temperatura de condensação.

$$q_{cond} = h_2 - h_3 \quad (4.5)$$

- Entre o ponto 3 e 4, o fluido se expande na válvula de expansão, saindo na forma de mistura bifásica. Este processo é praticamente irreversível e ocorre a entalpia constante.

$$h_3 = h_4 \quad (4.6)$$

- Finalmente, o fluido atravessa o evaporador entre os pontos 4 e 1, onde evapora a pressão constante, removendo calor do reservatório frio a temperatura de evaporação, e assim o ciclo se repete.

$$q_{evap} = h_1 - h_4 \quad (4.7)$$

Portanto, a eficiência da bomba de calor, será dado pelo seu COP, que neste caso será dado pela razão entre o calor liberado no condensador e a energia em forma de trabalho consumida pelo compressor.

$$COP = \frac{q_{cond}}{w_c} \quad (4.8)$$

Importa referir que no ciclo real a compressão ocorre com um ligeiro aumento da entropia entre os pontos 1 e 2, ou seja, a compressão não é isentrópica. Além disso, geralmente na entrada do compressor o fluido é introduzido no estado de vapor sobreaquecido de modo a evitar a que o fluido esteja no estado da mistura bifásica, comprometendo a integridade do compressor. O fluido na saída do condensador, também pode estar no estado sobre-arrefecido no ponto 3.

De modo a aproximar o ciclo de compressão a vapor ideal da situação real, é utilizada a eficiência isentrópica do compressor. Este parâmetro é definido pela razão entre o trabalho específico do compressor na situação isentrópica e real.

$$\eta_{s,c} = \frac{w_{s,c}}{w_c} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4.9)$$

Onde,  $\eta_{s,c}$  é a eficiência isentrópica do compressor,  $w$  é o trabalho específico do compressor,  $h$  é a entalpia do fluido de refrigerante em cada ponto e o índice  $s$  indica o processo isentrópico.

#### 4.2.2. Ciclo Orgânico de Rankine

O ciclo orgânico de Rankine (“Organic Rankine cycle” – ORC) é um processo de conversão de energia térmica de baixa e média temperatura em eletricidade. O princípio de funcionamento é semelhante ao do ciclo fechado de Clausius-Rankine a vapor, ou seja, utiliza-se os mesmos componentes (bomba, evaporador, expensor/turbina e condensador), mas invés de usar água como fluido de trabalho, aqui usa-se fluido orgânico. A descrição detalhada dos processos que ocorrem neste ciclo estão dispostas na figura 4.2, ou seja:

- Inicialmente, de 1-2 o fluido de trabalho na saída do condensador no estado líquido é comprimido pela bomba, provocando o aumento a sua pressão.

$$w_{bomba} = h_2 - h_1 \quad (4.10)$$

- De 2-3, o fluido de trabalho no estado líquido e pressurizado recebe calor do reservatório quente, onde é vaporizado.

$$q_{evap} = h_3 - h_2 \quad (4.11)$$

- Entre o ponto 3-4 ocorre a expansão do fluido de trabalho, provocando a variação da entalpia que produz trabalho mecânico. Este trabalho mecânico é responsável por acionar um motor elétrico acoplado ao sistema para gerar eletricidade.

$$w_{exp} = h_3 - h_4 \quad (4.12)$$

- Finalmente, de 4-1 o fluido de trabalho é condensado, rejeitando calor para o reservatório de baixa temperatura e deste modo o ciclo é repetido.

$$q_{cond} = h_4 - h_1 \quad (4.13)$$

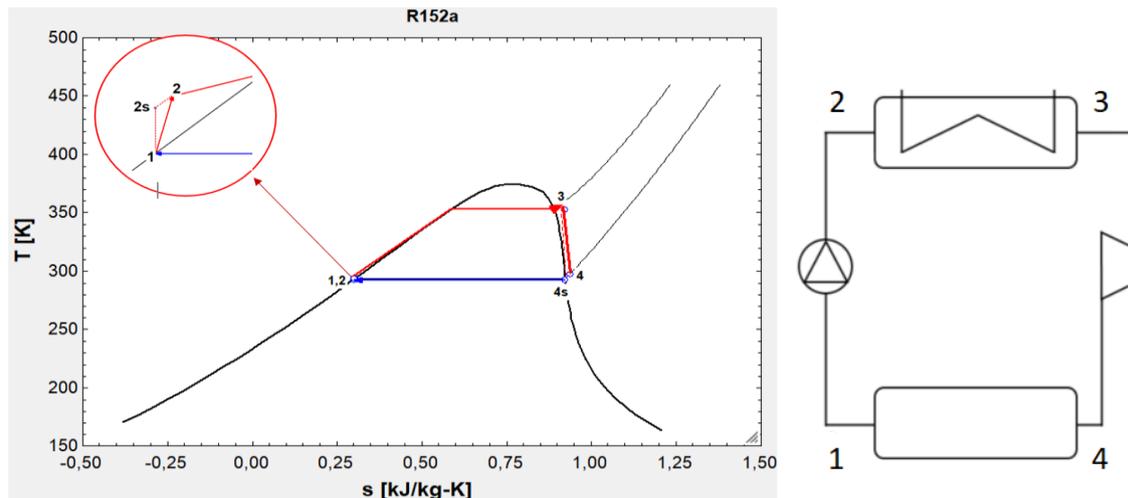
Portanto, a eficiência do ciclo será dada pela razão entre o trabalho produzido pelo sistema e o calor absorvido do reservatório quente.

$$\eta = \frac{w_{exp} - w_{bomba}}{q_{evap}} \quad (4.14)$$

É importante referir que, em condições reais ocorrem irreversibilidades no ciclo de Rankine, sendo os mais relevantes no expensor e na bomba. Assim sendo, define-se a eficiência isentrópica desses componentes em função das entalpias.

$$\eta_{s,exp} = \frac{w_{exp}}{w_{s,exp}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (4.15)$$

$$\eta_{s,bomba} = \frac{w_{s,bomba}}{w_{bomba}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4.16)$$



**Figura 4.2.** Diagrama T-s de um ORC genérico com expansão e bombeamento não isentrópico, sobreaquecimento e sub-arrefecimento do fluido de trabalho R-152a

### 4.2.3. Ciclos Termodinâmicos Transcríticos

Os ciclos termodinâmicos da bomba de calor e orgânico de Rankine descritos nos pontos 4.1.1 e 4.1.2, são também chamados de ciclos subcríticos, pois operam abaixo do ponto crítico da curva de saturação. Para além destes, existem ainda os ciclos que operam acima do ponto crítico, nomeadamente os transcíticos e supercríticos, conforme é ilustrado na figura 4.3.

- Ciclo transcítico – é uma configuração termodinâmica em que o processo ocorre simultaneamente abaixo e acima do ponto crítico. Abaixo do ponto crítico o sistema opera a baixa temperatura e pressão, ao passo que acima do ponto crítico opera a zona de alta temperatura e pressão, respetivamente.

- Ciclo supercrítico – é um ciclo termodinâmico em que as zonas de alta e baixa pressão, com as suas respetivas temperaturas, operam acima do ponto crítico.

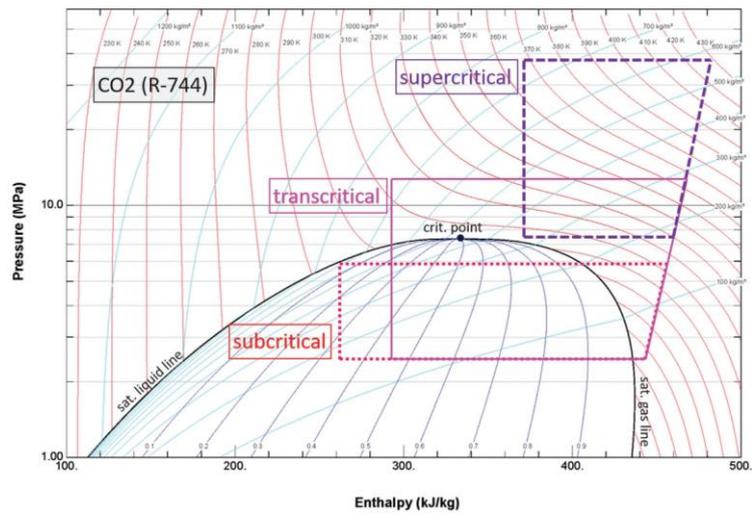


Figura 4.3. Diagrama P-h para processos de CO2 super, trans e subcrítico [39]

Nos ciclos transcíticos não há mudança de fase no processo de condensação tal como ocorre nos ciclos convencionais de refrigeração; ocorre apenas um arrefecimento do fluido a pressão constante. Como não existe condensação, o arrefecimento no ciclo transcítico é realizado não por um condensador, mas por um arrefecedor de gás tratado vulgarmente pelo termo em inglês, *gas-cooler*. Por conseguinte, as operações no lado de baixa pressão nestes ciclos ocorrem tal como nos ciclos subcríticos, tanto para bomba de calor como no ciclo de Rankine. Já na zona de alta pressão (supercrítica) não existem condições de saturação e a pressão é independente da temperatura. Devido a este facto surge a necessidade de controlar e otimizar a pressão do lado da alta pressão uma vez que isso influencia na eficiência do sistema, figura 4.4.

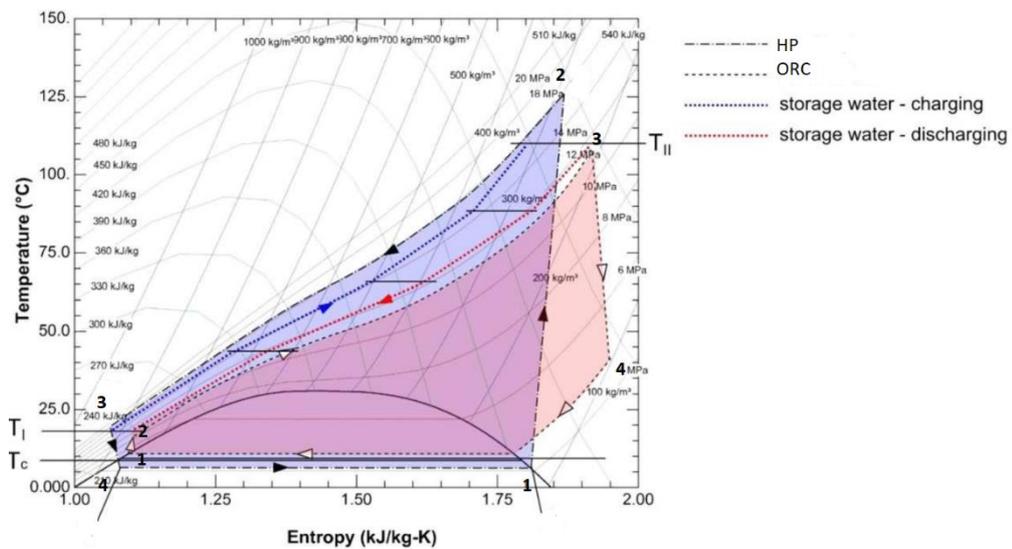


Figura 4.4. Diagrama T-s dos ciclos transcíticos do HP e ORC [28]

O dióxido de carbono como fluido de trabalho apresenta propriedades termodinâmicas adequadas para Bomba de calor e Ciclo Orgânico de Rankine em uma ampla gama de condições em processos termodinâmicos. O CO<sub>2</sub> beneficia de ótimas propriedades de transferência de calor em uma ampla faixa de pressão e temperatura, tornando-o um fluido adequado para projetos de sistemas de armazenamento térmico. Além disso, CO<sub>2</sub> é um gás natural, não tóxico e não inflamável disponível em todo o mundo com custos de produção reduzidos. Finalmente, tem um baixo índice de aquecimento global em caso de vazamento do sistema no qual está a ser aplicado.

### 4.3. Análise Preliminar da Bateria de Carnot

Antes de se validar uma configuração definitiva para a Bateria de Carnot retratada nesta dissertação, fez-se um estudo preliminar considerando duas configurações que operam em diferentes zonas (subcrítica e transcítica) do ciclo termodinâmico de modo a obter os parâmetros iniciais relacionados com a eficiência do ciclo de carga e descarga, desprezando as perdas do sistema de armazenamento. Para essas duas configurações selecionaram-se os fluidos de trabalho R152a e CO<sub>2</sub> para os ciclos subcríticos e transcítico, respectivamente. Os parâmetros iniciais para esta simulação estão dispostos na tabela 4.1.

**Tabela 4.1.** Parâmetros iniciais de simulação para a análise preliminar do ciclo subcrítico

<b>BOMBA DE CALOR</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Temperatura do condensador	50-110	° C
Temperatura do evaporador	15	° C
Eficiência isentrópica do compressor	0.8	-
Potência do compressor	1000	W
Sobreaquecimento	0	° C
Sobreaquecimento	0	° C
<b>CICLO ORGÂNICO DE RANKINE</b>		
Temperatura do evaporador	40-100	° C
Temperatura do condensador	25	° C
Eficiência isentrópica da bomba	0.8	-
Eficiência isentrópica do expensor	0.85	-

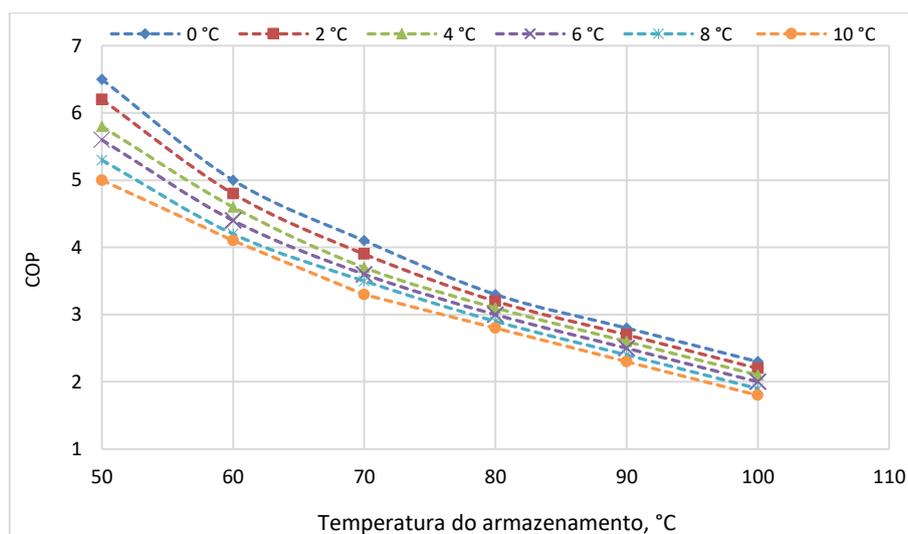
Parâmetro	Valor	Unidade
Potencia do expansor	1000	W
Sobreaquecimento	0	° C
Sobrarrefecimento	0	° C

**OUTROS**

Temperatura ambiente	20	° C
Pinch Point nos Permutadores	0 – 10	° C

**4.3.1. Configuração Subcrítica**

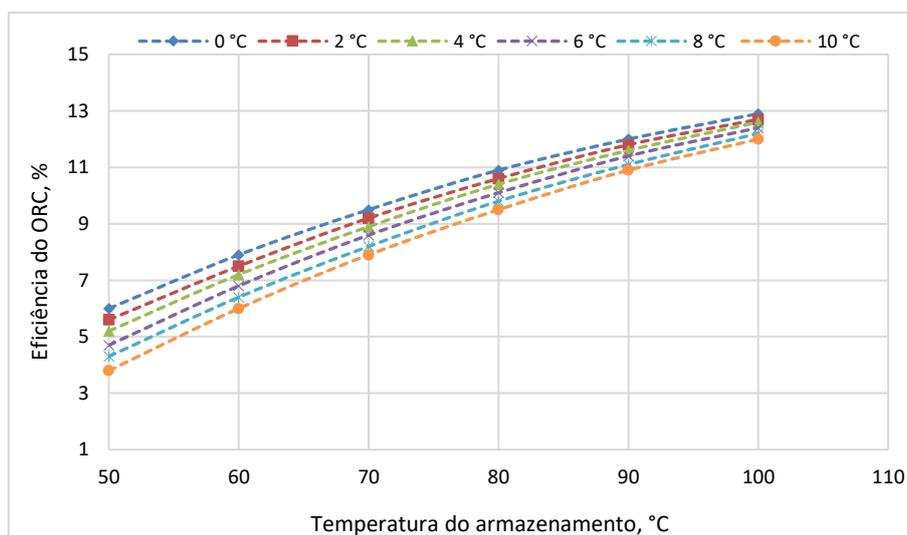
Para este tipo de configuração, fez-se uma análise dos ciclos de carga e descarga que constituem a BC, começando pela bomba de calor. No ciclo da bomba de calor tomou-se seis (6) temperaturas nominais da fonte quente compreendidas entre 50 °C e 100 °C, mantendo constante a temperatura da fonte fria, ou seja, a temperatura ambiente. Deste modo, variando a diferença da temperatura (*pinch point*) no permutador de calor, determinou-se o COP do ciclo, como pode ser visto na figura 4.5. A partir do gráfico, é perceptível que o COP da bomba de calor decresce com o aumento da diferença de temperatura no permutador de calor, ao passo o mesmo aumenta com a redução da temperatura da fonte quente, atingindo um COP máximo de 6,5 para uma temperatura de 50 °C com uma variação de temperatura de 0 °C no permutador de calor, como esperado.



**Figura 4.5.** Variação do COP com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point

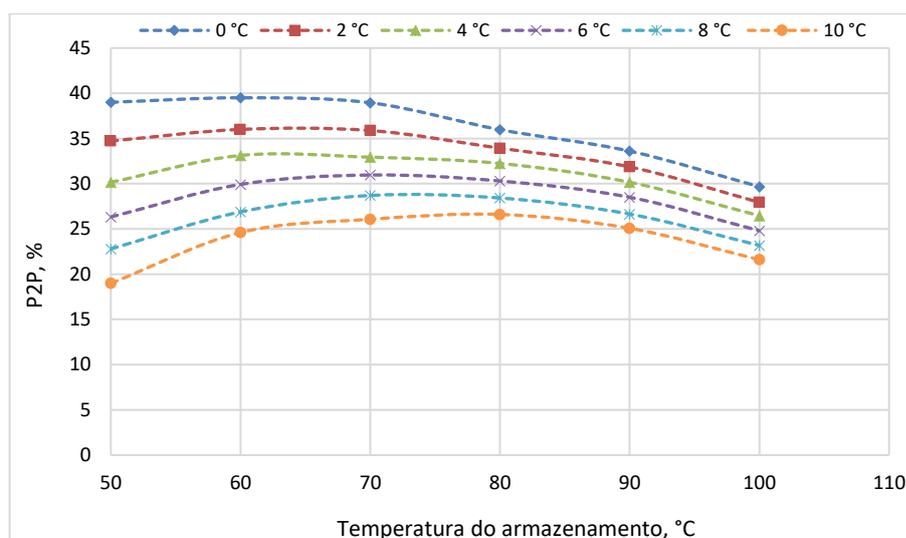
Já no caso do ciclo orgânico de Rankine que está associado ao processo de descarga, tomou-se considerações semelhantes ao da bomba de calor, fazendo variar a temperatura do

armazenamento (fonte quente) em relação a diferença de temperatura no permutador de calor, de modo a determinar o comportamento do ciclo. A eficiência do ciclo Rankine está associada a diferença de temperatura entre a fonte fria e quente. Assim sendo, quanto maior for esta diferença de temperatura, maior será a eficiência do ciclo. Na figura 4.6, mantendo como temperatura da fonte fria a temperatura ambiente, determinou-se a eficiência do ORC da BC para diferentes temperaturas do armazenamnto em função da variação da temperatura no permutador de calor. Portanto, como pode ser visto, a eficiência do ciclo aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura de armazenamento, atingindo um valor máximo de aproximadamente 13% com uma temperatura de 100 °C da fonte quente e com uma variação de temperatura no permutador de calor de 0 °C. Posteriormente decresce com o aumento da diferença de temperatura no permutador



**Figura 4.6.** Variação da eficiência do ORC com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point

Finalmente, a eficiência global do sistema (P2P/roundtrip efficiency) que é dado pelo produto do COP da bomba de calor pela eficiência do ciclo de Rankine cresce exponencialmente com o aumento da temperatura da fonte quente até atingir o seu valor máximo de aproximadamente 40% entre as temperaturas de armazenamentos compreendidas entre 50 – 70 °C; em seguida decresce, como pode ser visto na figura 4.7.

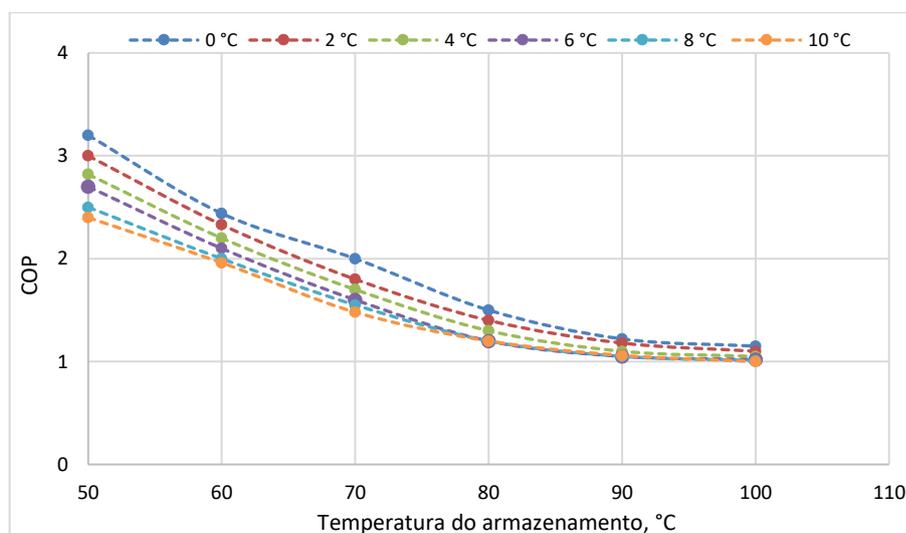


**Figura 4.7.** Variação da eficiência global do sistema com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point

### 4.3.2. Configuração Transcrítica com CO<sub>2</sub>

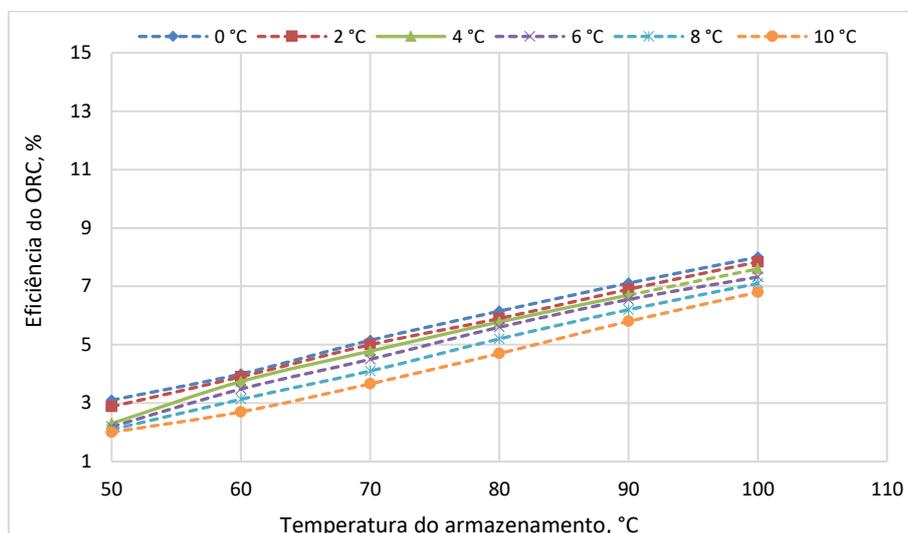
A configuração transcritical em geral, opera do mesmo modo que a configuração subcritical na região de baixa temperatura e pressão. Tal como já referido no ponto 4.2.3, a maior particularidade desses ciclos procede em controlar e otimizar a região de alta pressão já que a pressão é independente da temperatura nessa região.

Na figura 4.8 é analisada o comportamento do COP para situações adversas, tomando os mesmos parâmetros iniciais da configuração subcritical. Assim sendo, o COP decresce o seu valor máximo atingido de 3,2 a 50 °C com o aumento da temperatura da fonte quente e da diferença de temperatura no permutador de calor, respetivamente.



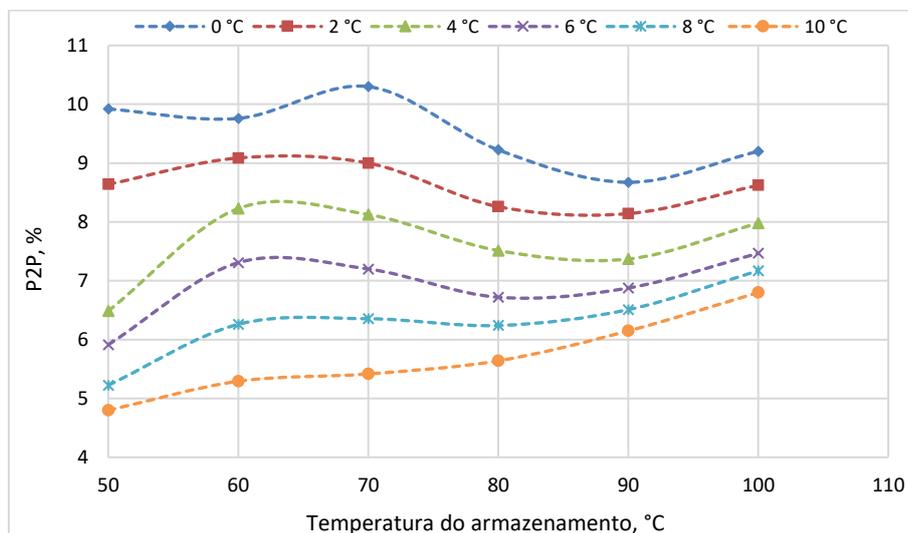
**Figura 4.8.** Variação do COP com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point do ciclo transcritical

No caso da eficiência do ORC nestas mesmas condições e nas melhores hipóteses de funcionalidade é alcançado uma eficiência de aproximadamente 8%, tal como pode ser visto na figura 4.9.



**Figura 4.9.** Variação da eficiência do ORC com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point do ciclo transcrito

Na figura 4.10 é mostrado a máxima eficiência global possível do sistema com T-CO<sub>2</sub>, obtendo-se um valor máximo de aproximadamente 10%.



**Figura 4.10.** Variação da eficiência global do sistema com a temperatura de armazenamento para diferentes pinch point do ciclo transcrito

Contudo, através dessas análises gráficas pode se tirar algumas conclusões de que o ciclo T-CO<sub>2</sub> é menos interessante para sistemas de operam a temperaturas bastante altas da fonte quente, nomeadamente a temperatura de saída do fluido de trabalho no arrefecedor de

gás. Nas bombas de calor por exemplo, quanto maior for a temperatura na saída do *gascooler* mais a direita da curva de saturação tenderá o ciclo termodinâmico, o que reduz drasticamente o COP. Isso porque a variação da entalpia entre os pontos adjacentes tanto no condensador como no evaporador é bastante baixa ou até mesmo negativa. Por isso, para se elevar o COP é necessário que a temperatura na entrada da válvula de expansão seja relativamente baixa, resultando em uma alta diferença de entalpia no condensador. Por essa razão, nessa dissertação optou-se pela configuração subcrítica para a BC.

#### 4.4. Seleção de fluidos de trabalho para a Bateria de Carnot

Neste capítulo será analisado a eficiência da BC para diferentes fluidos de trabalho, operando em configurações subcríticas. Para esta análise selecionou-se quatro (4) fluidos orgânicos de trabalho que comprovaram apresentar ótimos parâmetros de desempenho termodinâmico, bem como baixo ou quase nulo índice de emissão de gases de efeito de estufa, nomeadamente R152a, R1234ze, R1233zd e o Butano.

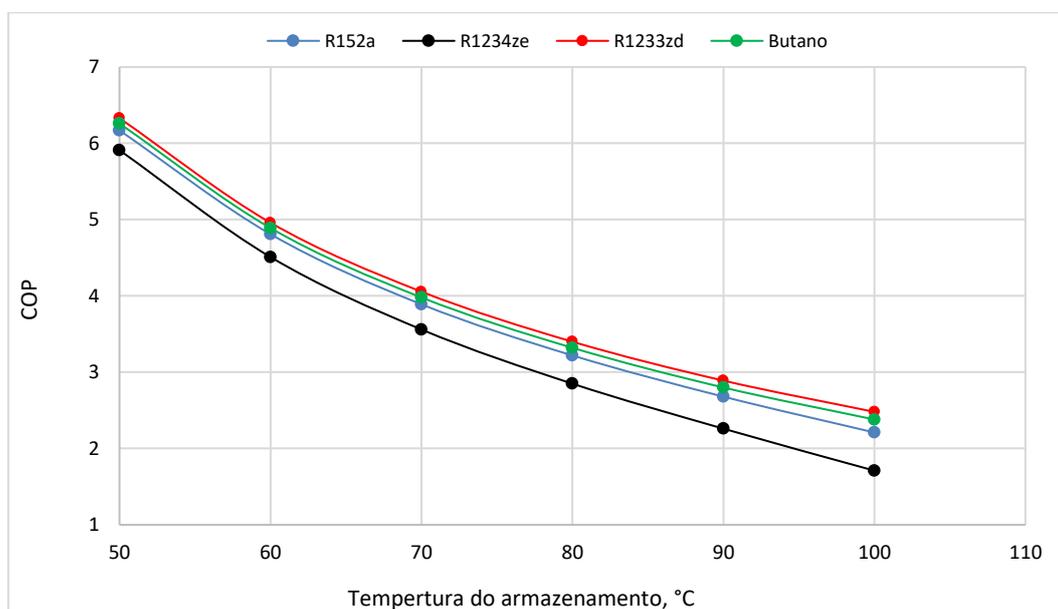
A produção de energia será realiza a partir de fontes térmicas que são consideradas de baixa escala de temperatura (<100°C) propriamente dita, quando comparada com a máquina térmica clássica de Rankine que opera a temperaturas acima dos ciclos orgânicos (>125°C). Por isso, a escolha do fluido de trabalho adequado em ciclos orgânicos desempenha um importante para a performance do sistema. Na tabela 4.2 destacam-se as propriedades gerais dos fluidos usados nesse estudo.

**Tabela 4.2.** Propriedades dos fluidos selecionados

<b>Propriedades</b>	<b>R152a</b>	<b>R1234ze(E)</b>	<b>R1233zd(E)</b>	<b>Butano</b>
Temperatura crítica °C	113.3	109.4	166.5	134.7
Pressão crítica, bar	45.1	36.4	36.2	36.4
Massa molar, kg/mol	0.066	0.114	0.130	0.056
Ponto de ebulição, °C	-24.0	-19.0	18.3	-159.4
ODP	0	0	0	0
GWP	124	4	7	3

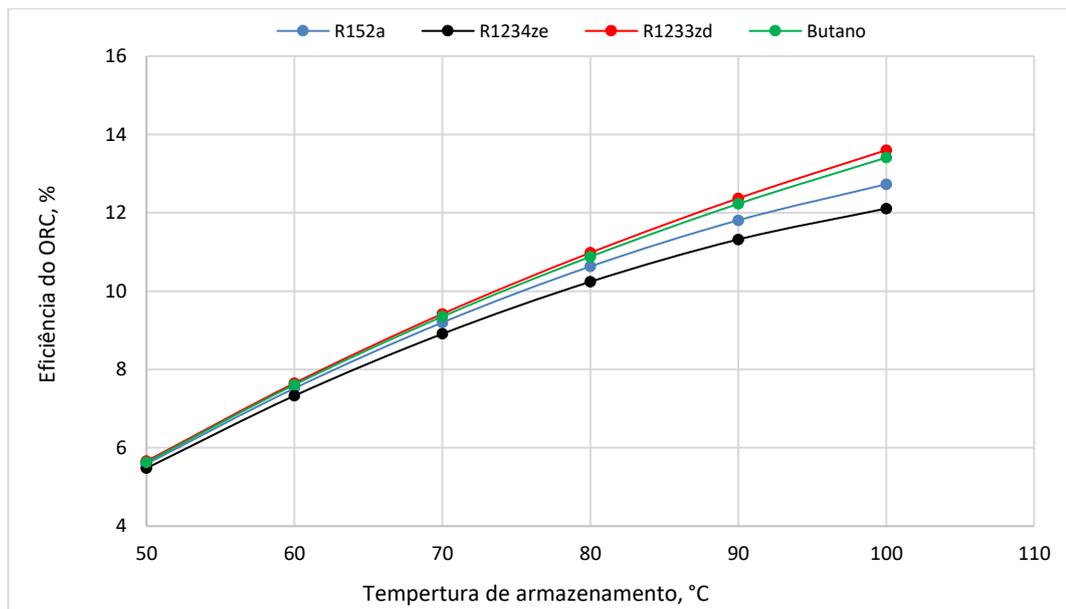
Com base nos resultados obtidos através do modelo construído no MATLAB é possível notar o comportamento subsequente dos parâmetros de desempenho da Bateria de

Carnot para os diferentes fluidos de trabalho, considerando os pinch point de 2°C e 5°C no evaporador/condensador, respetivamente. Na figura 4.11 é representado o comportamento do COP da bomba de calor em função da variação da temperatura do condensador, sendo a temperatura do evaporador mantida constante, ou seja, a temperatura ambiente. Nota-se que para todos os fluidos o comportamento do COP é praticamente decrescente com o aumento da temperatura no condensador nessas condições de funcionamento, alcançando um valor máximo de 6,33 quando se usa o fluido R1233zd.



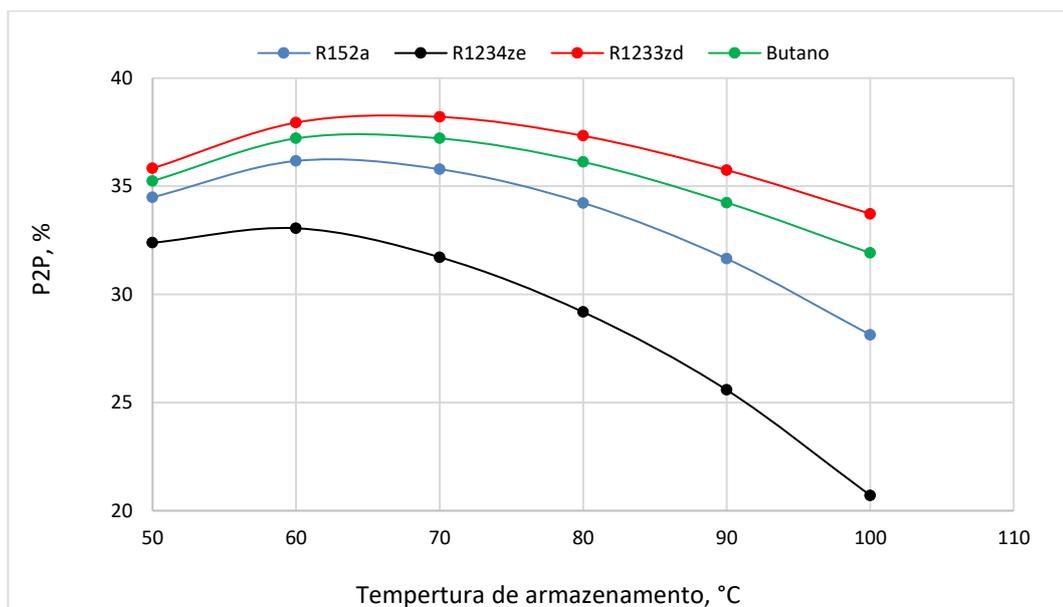
**Figura 4.11.** Variação do COP dos fluidos selecionados com a temperatura de armazenamento

Diferente da bomba de calor, a eficiência do ciclo de Rankine aumenta com o aumento progressivo da diferença de temperatura entre a fonte quente e fria. Através do gráfico representado na figura 4.12, vê-se que o fluido R1233zd sobrepõe-se sobre os outros, alcançando uma eficiência de 13.6 % a temperatura de 100°C da fonte quente.



**Figura 4.12.** Variação da eficiência do ORC dos fluidos selecionados com a temperatura de armazenamento

Finalmente, a *roundtrip efficiency* que é frequentemente estimado através do produto do COP pela eficiência de Rankine pode ser representado na figura 4.13, embora que quando são consideradas as perdas de carga na bateria essa simplificação não é totalmente válida. Assim sendo, pode ser visto que quando se usa o fluido R1233zd em todo sistema é alcançando um *roundtrip efficiency* máximo possível de aproximadamente 38,2% a uma temperatura de armazenamento de 70°C, dentro das condições impostas.



**Figura 4.13.** Variação da eficiência global dos fluidos selecionados com a temperatura de armazenamento

Deste modo, surge sempre a necessidade de selecionar o fluido de trabalho mais adequado para o ciclo da bomba de calor e Rankine de modo a se obter a maior eficiência global possível para a Bateria de Carnot.

#### 4.5. Simulação do TES-Sensível

Conforme foi referido no subcapítulo 2.2.2, os armazenamentos térmicos podem ser na forma sensível ou latente. Portanto, a escolha do meio de armazenamento depende de vários fatores tais como económicos, de projeto e também ambientais. Neste trabalho selecionou-se a água como TES-sensível, por ser um fluido abundante, sem impactos ambientais negativos, barato e por apresentar um elevado valor de calor específico.

Para simular o sistema de armazenamento, foi desenvolvido um modelo dinâmico que considera a energia contida num tanque com configuração cilíndrica e isolado, tomando em consideração vários pontos num determinado intervalo de tempo na qual se fez um balanço energético considerando as potências de carregamento e descarga.

Inicialmente, são considerados vários parâmetros iniciais para a simulação da Bomba de Calor e do ORC. A partir desses parâmetros, são determinados os caudais mássicos, as potências dos condensadores e evaporadores da bomba de calor/ORC, respetivamente, que serão posteriormente usados para projetar as áreas dos permutadores desses componentes.

Posteriormente, iniciam-se os ciclos iterativos – cada interação começa com a simulação dinâmica da bomba de calor e do ciclo orgânico de Rankine, através da variação da temperatura do condensador e do evaporador em função da temperatura do armazenamento até que a taxa de transferência de calor iguala a potência térmica associada a esses componentes.

A potência térmica de condensação como de evaporação, é calculada através da equação:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (4.19)$$

Onde  $\Delta h$  é variação da entalpia da água e  $\dot{m}$  o caudal mássico.

A taxa de transferência de calor, pode ser determinada através de:

$$\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T \quad (4.20)$$

Onde  $\dot{Q}$  é a taxa de transferência de calor em,  $U$  é o coeficiente de transferência de calor,  $A$  é a área de transferência de calor e o  $\Delta T$  é a diferença de temperatura.

No condensador da Bomba de Calor e no evaporador do ORC a diferença de temperatura é estabelecida entre o armazenamento térmico e o fluido de trabalho desses sistemas; enquanto no evaporador da Bomba de Calor e no condensador do ORC é estabelecido entre o fluido de trabalho e o ambiente.

A área de transferência de calor é previamente determinada para cada componente, através das condições iniciais previstas, e o coeficiente  $U$  de transferência de calor é modelado através de um valor médio do processo de mudança de fase, pois é a zona predominante.

Assim que os ciclos termodinâmicos convergirem, é calculado o balanço energético:

$$E_t = E_{t-1} + (\dot{Q}_{carga} \times \Delta t) - (\dot{Q}_{desc} \times \Delta t) \quad (4.21)$$

Onde o  $t$  é o passo de tempo,  $E$  é a energia térmica contida na massa de água,  $\Delta t$  é a variação do tempo,  $\dot{Q}_{carga}$  e  $\dot{Q}_{desc}$  são as taxas de transferência de calor calculadas previamente em cada interação, que representam a potência de carga e descarga, respectivamente.

Contudo, o novo valor da energia é usado para atualizar a temperatura do armazenamento, que neste caso é considerada que esteja no estado líquido, através da equação 4.20.

$$T_t = \frac{E_t}{m \cdot c_p} \quad (4.20)$$

Finalmente, as variáveis calculadas (temperatura, taxa de transferência de calor, etc) são armazenadas em cada interação, de modo que cada ciclo começa com um novo valor da temperatura. O ciclo é dado como terminado depois de um intervalo de tempo específico ou quando um critério de paragem é alcançado. O algoritmo deste processo dinâmico está representado na figura 4.14.

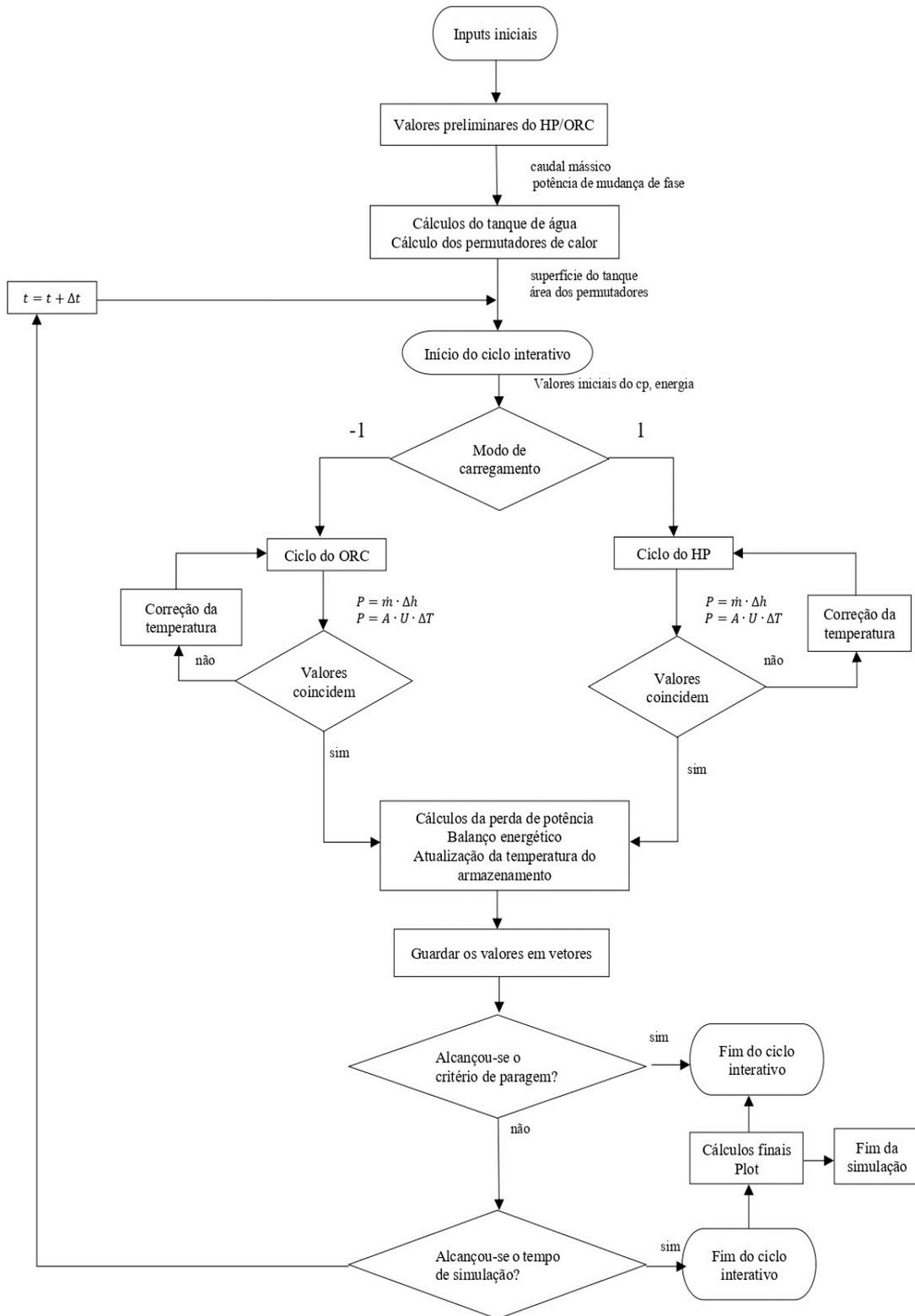


Figura 4.14. Fluxograma do algoritmo usado no Matlab

Seguindo a configuração do fluxograma na figura acima, fez-se a simulação dinâmica da configuração simples da BC, tendo em conta os parâmetros iniciais fixados na tabela 4.3.

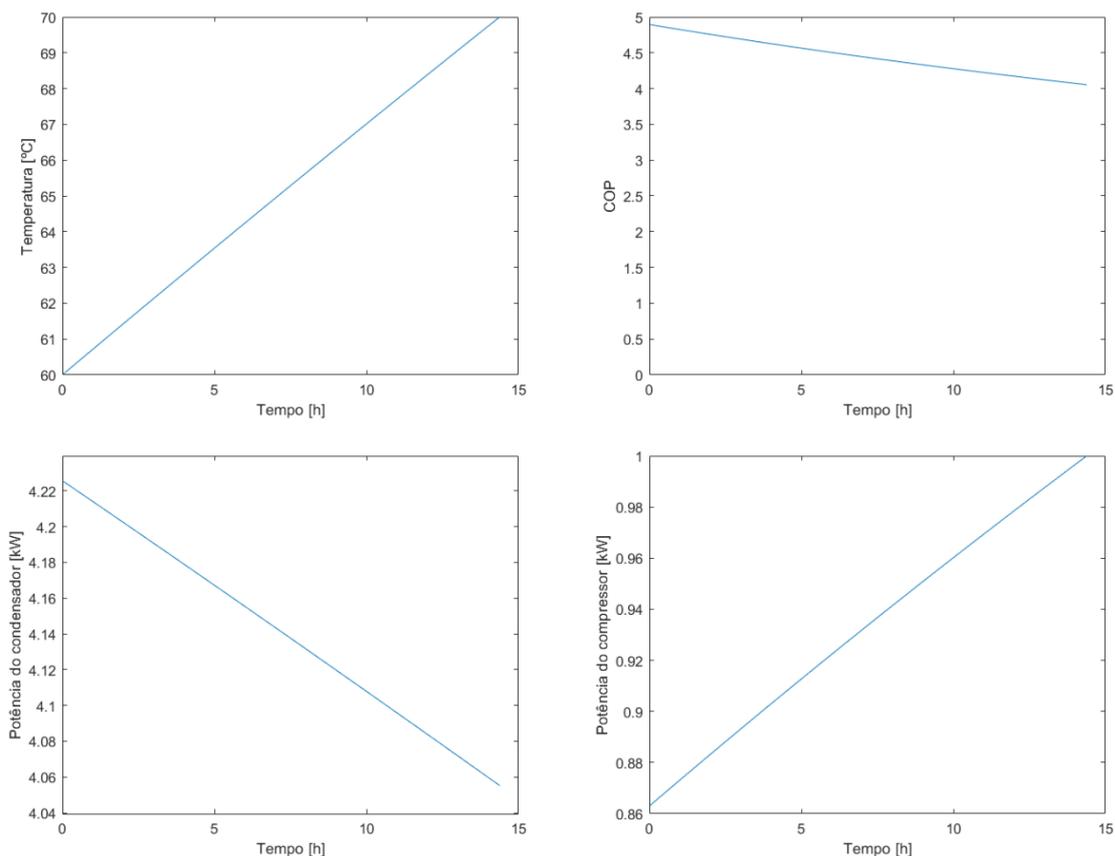
**Tabela 4.3.** Parâmetros iniciais de simulação

<b>TANQUE DE ÁGUA</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Volume	8	m <sup>3</sup>
Diâmetro	2	m
Pressão (absoluta)	101.103	kPa
<b>BOMBA DE CALOR</b>		
Temperatura do evaporador (valor de projeto)	70	° C
Temperatura do condensador (valor de projeto)	15	° C
Eficiência isentrópica do compressor	0.8	-
Potência do compressor	1000	W
Super-arrefecimento	0	° C
Sobreaquecimento	0	° C
Coefficiente de transferência de calor do condensador	1000	W/(m <sup>2</sup> K)
<b>ORC</b>		
Temperatura do evaporador (valor de projeto)	60	° C
Temperatura do condensador (valor de projeto)	25	° C
Eficiência isentrópica da bomba	0.8	-
Eficiência isentrópica do expansor	0.85	-
Potencia do expansor	1000	W
Sobreaquecimento	0	° C
Super-arrefecimento	0	° C
Coefficiente de transferência de calor do evaporador	1000	W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Outros</b>		
Temperatura ambiente	20	° C
Passo de tempo	30	s
Coefficiente convectivo do ambiente	10	W/(m <sup>2</sup> K)
Eficiência do gerador elétrico	0.95	-
Pinch point (valor de projeto)	2	° C

Tal como foi visto no subcapítulo 4.4, a eficiência global mais elevada do sistema obtém-se com uma temperatura de armazenamento que varia entre 60-70 °C, assim sendo, procedeu-se a simulação dinâmica do armazenamento térmico sensível, de modo a analisar a variação da temperatura do depósito ao longo do tempo na situação de carga e descarga.

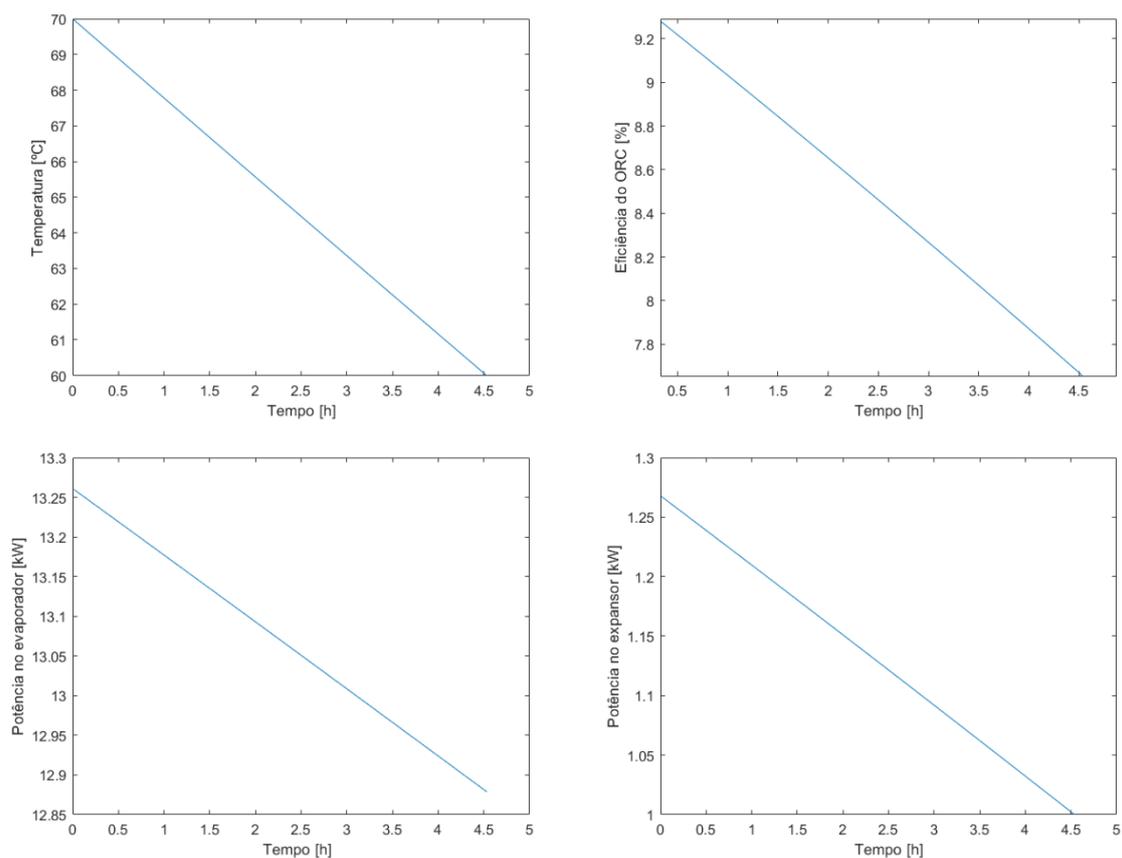
Para um volume de depósito de 5 m<sup>3</sup>, a fase de carga levou o armazenamento a uma temperatura de 70°C em cerca de 14 horas e 23 minutos, com uma variação de energia térmica

na água de 59,56 kWh. Com um consumo elétrico total de 14,12 kWh, isso corresponde a um COP global de 4,21. No entanto, os valores do COP, da potência no compressor e no condensador mudam ao longo do processo de carregamento, conforme mostrado na Figura 4.15. Observa-se que o tempo de carregamento depende principalmente da relação entre a capacidade total do armazenamento e da potência de carga da bomba de calor.



**Figura 4.15.** Parâmetros principais da fase de carga

Portanto, a fase de descarga levou de volta a temperatura do armazenamento a 60 °C em aproximadamente 4 horas e 32 minutos, com uma geração de energia elétrica de 4,81 kWh, o que traduz a uma eficiência global de Rankine de 8,12%. Contudo, como pode ser visto na figura 4.16, com a diminuição da temperatura e pressão do evaporador, ocorre uma diminuição no consumo de energia térmica do evaporador, bem como na geração de energia no expensor e no consumo de energia da bomba, o que provoca a diminuição da eficiência global.



**Figura 4.16.** Parâmetros principais da fase de descarga

Finalmente, a *roundtrip efficiency* pode ser estimado de uma maneira mais precisa através deste modelo dinâmico, alcançando um valor de aproximadamente 34,2%.

Por outro lado, é possível analisar através desse modelo dinâmico como ocorre a variação do COP, da eficiência do ORC e do roundtrip efficiency em função da temperatura do armazenamento sensível. Assim sendo, tomou-se diferentes configurações de armazenamento para a BC, isto é:

- $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ : 50-60°C, 60-70°C, 70-80°C, 80-90°C, 90-100°C
- $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ : 50-70°C, 60-80°C, 70-90°C, 80-100°C
- $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ : 50-80°C, 60-90°C, 70-100°C
- $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ : 50-90°C, 60-100°C
- $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ : 50-100°C

Considerando os mesmos inputs da simulação do TES-sensível, analisou-se o comportamento dos parâmetros de eficiência (COP/ORC/P2P) da BC, em função da

variação da temperatura do armazenamento e da diferença de temperatura de operação entre a Bomba de Calor e o ORC, como pode ser visto na figura 4.17.

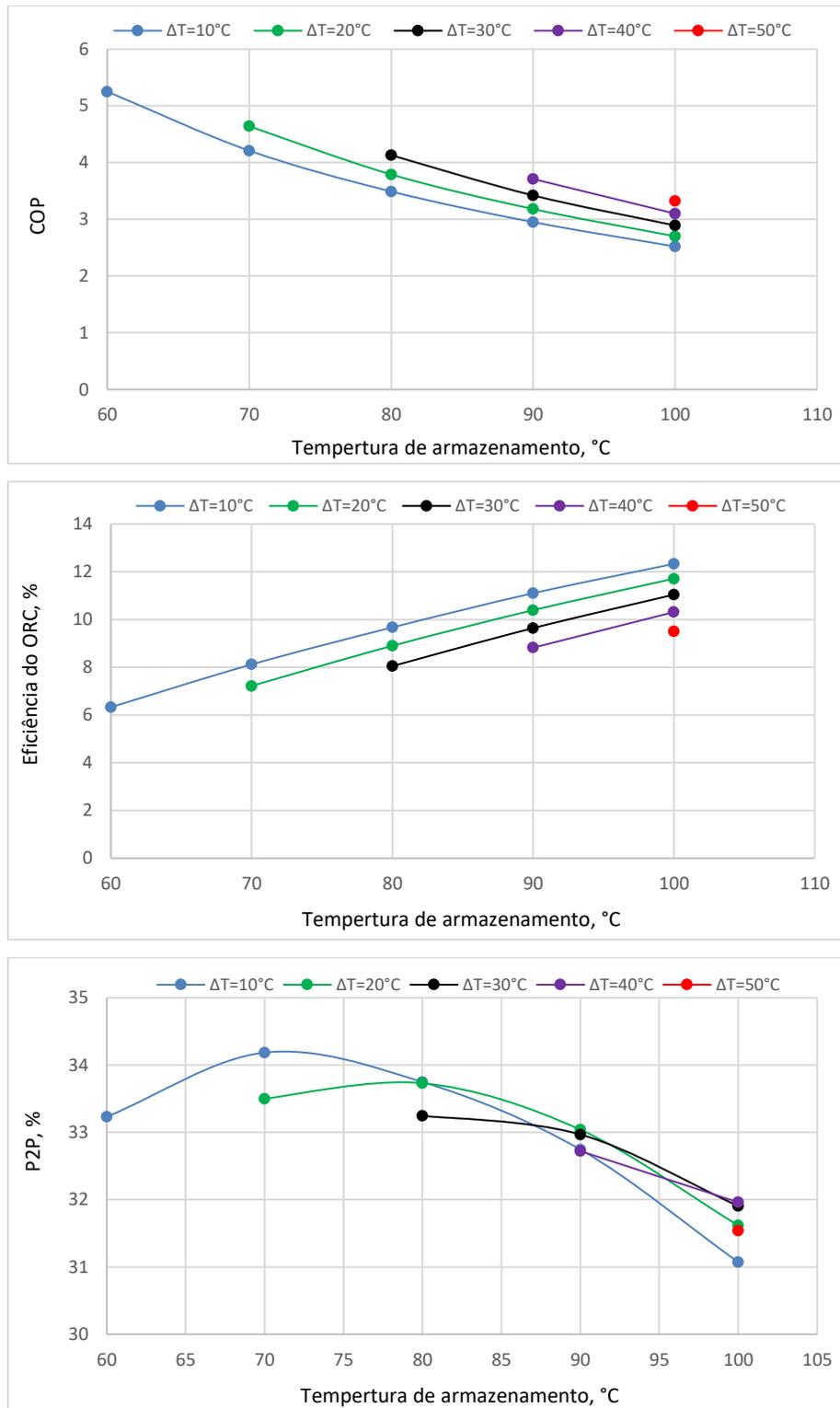
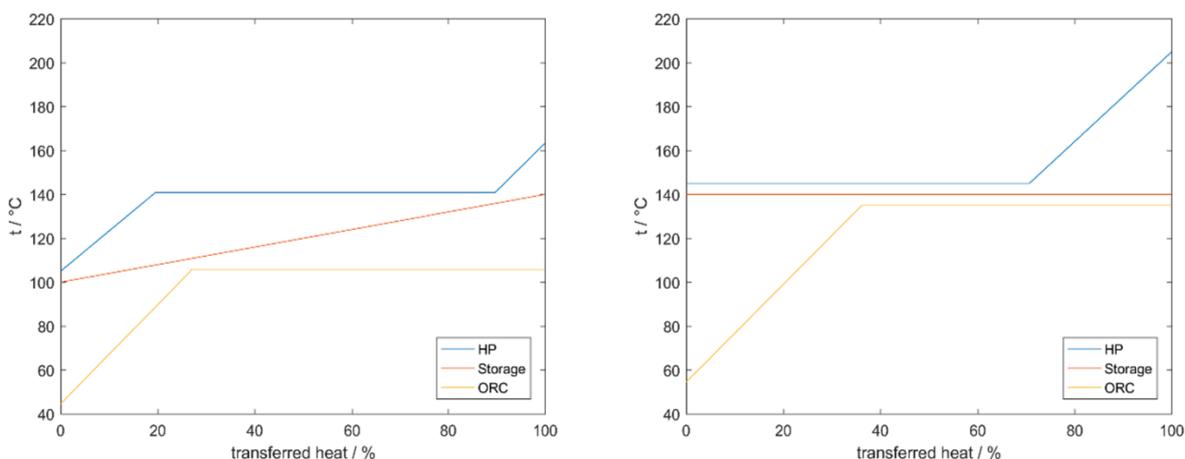


Figura 4.17. Variação dos parâmetros de eficiência com a temperatura do armazenamento

## 4.6. Comparação entre o TES-Sensível e TES-Latente

A diferença na utilização de um armazenamento sensível ou latente pode ser vista nos diagramas T-Q dos três subprocessos da BC, ver Figura 4.18. Como o seu perfil de temperatura é aproximadamente isotérmico, o armazenamento latente permite uma diferença de temperatura significativamente mais baixa no condensador da bomba de calor e no evaporador do ORC.



**Figura 4.18.** Diagrama T-Q dos subprocessos da BC com armazenamento sensível (esquerda) e latente (direita)[40]

A influência da temperatura de armazenamento varia dependendo do tipo de armazenamento. O armazenamento latente apresenta apenas temperatura constante de operação, portanto, não fornece nenhuma faixa de temperatura sensível. Neste caso, a densidade de energia elétrica depende apenas da eficiência do ORC ou indiretamente da temperatura de armazenamento latente. Já no armazenamento sensível, a temperatura não é constante, ou seja, varia entre uma margem de temperatura máxima e mínima de armazenamento. Portanto, para esta situação, essa variação de temperatura é responsável pela densidade de energia elétrica.

Seguindo, na figura 4.19 que segue fez-se uma comparação simplificada do uso do armazenamento sensível ou latente para a BC. Para o TES-sensível usou-se a água como meio de armazenamento (em mesmas condições como no subcapítulo 4.5); para o TES-latente não se escolheu nenhum PCM específico, ou seja, aqui assumiu-se apenas um armazenamento latente ideal capaz de armazenar energia numa determinada temperatura específica.

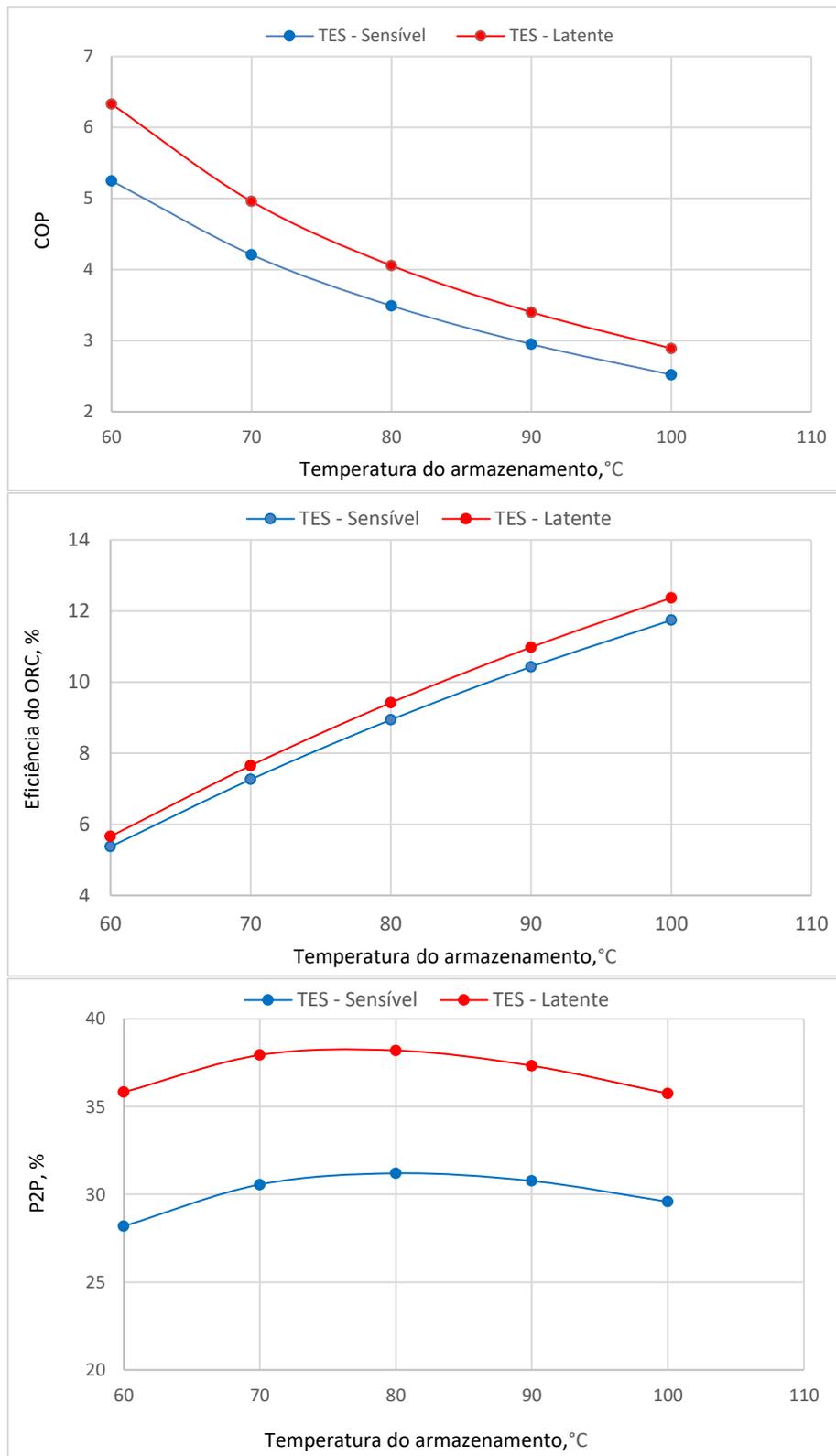


Figura 4.19. Comparação dos parâmetros principais da BC com um TES latente e sensível

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se um estudo sobre as soluções de armazenamentos térmicos de energia e ciclos de potência, com ênfase nas Baterias de Carnot. Através dos modelos construídos no MATLAB que permitem efetuar análises das Baterias de Carnot operando em ciclos transcíticos de CO<sub>2</sub> e subcríticos foi possível extrair várias conclusões. Dentre estas conclusões se destacam:

- O ciclo transcítico de CO<sub>2</sub> é mais interessante para baixas temperaturas de armazenamento, pois altas temperaturas da fonte quente leva a piores valores do COP da bomba de calor.
- No lado de alta pressão do ciclo transcítico da bomba de calor, a pressão e a temperatura do fluido refrigerante são parâmetros independentes. Portanto, a otimização da alta pressão e da temperatura do fluido refrigerante na saída do gascooler constituem os principais parâmetros que permitem melhorar a eficiência do sistema; ou seja, uma mudança na pressão ao longo da curva isotérmica a medida que se aproxima do ponto crítico, existe um COP ótimo a uma temperatura constante do fluido refrigerante na saída do gascooler.
- Na escala de temperatura de armazenamento quente compreendido entre 50-100 °C, os sistemas subcríticos apresentam melhores desempenhos do que os transcíticos tanto no ciclo da Bomba de Calor como no Ciclo Orgânico de Rankine, o que traduz a valores mais altos de eficiência global do sistema.
- Dentre os fluidos de trabalho R152a, R1234ze, R1233zd e o Butano, os melhores parâmetros de desempenho dos subprocessos da Bateria de Carnot são obtidos quando se usa o R1233zd.
- A eficiência global possível do sistema (*P2P*) depende do tipo de armazenamento, do fluido de trabalho e do *pinch point*.
- A maior eficiência global possível do sistema (*P2P*) é obtido no intervalo de temperatura de armazenamento compreendido entre 60-70°C; nessas condições é possível obter uma eficiência global de até 42% para o fluido R1233zd, com um *pinch point* de 0°C.

- Os armazenamentos térmicos latentes permitem obter melhores resultados que os sensíveis porque durante a carga não apresentam perdas de energia, o que permite que a temperatura seja constante ao longo de todo volume de armazenamento.

Contudo, existem muitos parâmetros que podem ser otimizados para elevar a eficiência do sistema, como a eficiência isentrópica da bomba, do compressor e do expensor. A inclusão de um permutador interno no ciclo da bomba de calor também elevaria o valor do COP e permitiria que o fluido na entrada do compressor estivesse no estado sobreaquecido, o que evitaria a entrada de um percentual de líquido nesse equipamento.

Outras configurações da bomba de calor/ORC de calor também podem ser estudadas, como ciclos em cascatas. Um sistema de painéis solares térmicos para aquecimento de água ou geotérmico poderia também ser anexado ao sistema de modo a fornecer calor adicional ao evaporador da bomba de calor, o que elevaria significativamente a eficiência global do sistema para valores de P2P que poderiam ultrapassar os 100%.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby, and M. Milligan, “The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation,” 2010. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [2] J. Kondoh *et al.*, “Electrical energy storage systems for energy networks.” [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/enconman](http://www.elsevier.com/locate/enconman)
- [3] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7. pp. 1513–1522, Aug. 2009. doi: 10.1016/j.rser.2008.09.028.
- [4] E. Hossain, H. M. R. Faruque, M. S. H. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, “A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparison, current scenario, applications, barriers, and potential solutions, policies, and future prospects,” *Energies*, vol. 13, no. 14. MDPI AG, Jul. 01, 2020. doi: 10.3390/en13143651.
- [5] F. Nadeem, S. M. S. Hussain, P. K. Tiwari, A. K. Goswami, and T. S. Ustun, “Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems,” *IEEE Access*, vol. 7. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 4555–4585, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2888497.
- [6] Paul Breeze, “Power Generation Technologies,” *ELSEVIER*, vol. 462, pp. 219–249, Feb. 2019.
- [7] “Schematic of pumped storage hydropower system. | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-pumped-storage-hydropower-system\\_fig4\\_318469208](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-pumped-storage-hydropower-system_fig4_318469208) (accessed Jul. 27, 2023).
- [8] R. Peña-Alzola, R. Sebastián, J. Quesada, and A. Colmenar, “Review of flywheel based energy storage systems,” in *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2011. doi: 10.1109/PowerEng.2011.6036455.
- [9] A. Nourai, B. P. Martin, and D. R. Fitchett, “Testing the limits,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 2. pp. 40–46, Mar. 2005. doi: 10.1109/MPAE.2005.1405869.
- [10] F. J. M. Thoolen, “Development of an advanced high speed flywheel energy storage system,” *Technische Universiteit Eindhoven*, vol. 220, Dec. 1993, doi: 10.6100/IR406829.
- [11] S. Bankston and C. Mo, “Geometry Modification of Flywheels and its Effect on Energy Storage,” *Energy Research Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 54–63, Feb. 2015, doi: 10.3844/erjsp.2015.54.63.
- [12] I. Dinçer and M. A. Rosen, “Thermal Energy Storage,” Ontario, Canada, 2021.
- [13] A. Shkatulov and Y. Aristov, “Modification of magnesium and calcium hydroxides with salts: An efficient way to advanced materials for storage of middle-temperature heat,” *Energy*, vol. 85, pp. 667–676, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.04.004.
- [14] A. Vecchi *et al.*, “Carnot Battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art,” *Journal of Energy Storage*, vol. 55. Elsevier Ltd, Nov. 30, 2022. doi: 10.1016/j.est.2022.105782.

- [15] T. Liang *et al.*, “Key components for Carnot Battery: Technology review, technical barriers and selection criteria,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 163. Elsevier Ltd, Jul. 01, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112478.
- [16] T. Desrues, J. Ruer, P. Marty, and J. F. Fourmigué, “A thermal energy storage process for large scale electric applications,” *Appl Therm Eng*, vol. 30, no. 5, pp. 425–432, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.10.002.
- [17] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, “An overview of thermal energy storage systems,” *Energy*, vol. 144. Elsevier Ltd, pp. 341–378, Feb. 01, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.
- [18] A. Benato, “Performance and cost evaluation of an innovative Pumped Thermal Electricity Storage power system,” *Energy*, vol. 138, pp. 419–436, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.066.
- [19] F. Marguerre, “THERMODYNAMIC ENERGY STORAGE,” *United States Patent Office*, Dec. 29, 1936.
- [20] “Chemical energy storage.” [https://netl.doe.gov/sites/default/files/2021-02/Chemical\\_Storage.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/2021-02/Chemical_Storage.pdf) (accessed Jul. 26, 2023).
- [21] A. A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, and M. Berecibar, “A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159. Elsevier Ltd, May 01, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112213.
- [22] A. B. Gallo, J. R. Simões-Moreira, H. K. M. Costa, M. M. Santos, and E. Moutinho dos Santos, “Energy storage in the energy transition context: A technology review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65. Elsevier Ltd, pp. 800–822, Nov. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.07.028.
- [23] O. Dumont, A. Charalampidis, V. Lemort, and S. Karellas, “Experimental Investigation of a Thermally Integrated Carnot Battery Using a Reversible Heat Pump/Organic Rankine Cycle,” 2021. [Online]. Available: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc>
- [24] T. Bauer, W. D. Steinmann, D. Laing, and R. Tamme, “THERMAL ENERGY STORAGE MATERIALS AND SYSTEMS,” in *Annual Review of Heat Transfer*, Begell House Inc., 2012, pp. 131–177. doi: 10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2012004651.
- [25] G. B. Wang and X. R. Zhang, “Thermodynamic analysis of a novel pumped thermal energy storage system utilizing ambient thermal energy and LNG cold energy,” *Energy Convers Manag*, vol. 148, pp. 1248–1264, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.044.
- [26] O. Dumont, A. Parthoens, R. Dickes, and V. Lemort, “Experimental investigation and optimal performance assessment of four volumetric expanders (scroll, screw, piston and roots) tested in a small-scale organic Rankine cycle system,” *Energy*, vol. 165, pp. 1119–1127, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.182.
- [27] O. Dumont, G. F. Frate, A. Pillai, S. Lecompte, M. De paepe, and V. Lemort, “Carnot battery technology: A state-of-the-art review,” *J Energy Storage*, vol. 32, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101756.
- [28] W. D. Steinmann, “The CHEST (Compressed Heat Energy Storage) concept for facility scale thermo mechanical energy storage,” *Energy*, vol. 69, pp. 543–552, May 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.03.049.

- 
- [29] M. Mercangöz, J. Hemrle, L. Kaufmann, A. Z'Graggen, and C. Ohler, "Electrothermal energy storage with transcritical CO<sub>2</sub> cycles," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 407–415, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.03.013.
- [30] M. Abarr, B. Geels, J. Hertzberg, and L. D. Montoya, "Pumped thermal energy storage and bottoming system part A: Concept and model," *Energy*, vol. 120, pp. 320–331, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.089.
- [31] J. Pátek and J. Klomfar, "A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr-H<sub>2</sub>O solutions from 273 to 500 K over full composition range," *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 4, pp. 566–578, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2005.10.007.
- [32] T. R. Davenne, S. D. Garvey, B. Cardenas, and M. C. Simpson, "The cold store for a pumped thermal energy storage system," *J Energy Storage*, vol. 14, pp. 295–310, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.03.009.
- [33] G. F. Frate, M. Antonelli, and U. Desideri, "A novel Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) system with thermal integration," *Appl Therm Eng*, vol. 121, pp. 1051–1058, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.127.
- [34] A. Benato and A. Stoppato, "Heat transfer fluid and material selection for an innovative Pumped Thermal Electricity Storage system," *Energy*, vol. 147, pp. 155–168, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.045.
- [35] A. Smallbone, V. Jülch, R. Wardle, and A. P. Roskilly, "Levelised Cost of Storage for Pumped Heat Energy Storage in comparison with other energy storage technologies," *Energy Convers Manag*, vol. 152, pp. 221–228, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.047.
- [36] "Chester Project." <https://www.chester-project.eu/> (accessed May 01, 2023).
- [37] M. Zamengo, K. Yoshida, and J. Morikawa, "Numerical evaluation of a Carnot battery system comprising a chemical heat storage/pump and a Brayton cycle," *J Energy Storage*, vol. 41, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102955.
- [38] H. Jockenhöfer, W. D. Steinmann, and D. Bauer, "Detailed numerical investigation of a pumped thermal energy storage with low temperature heat integration," *Energy*, vol. 145, pp. 665–676, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.087.
- [39] J. Niu, J. Wang, X. Liu, and L. Dong, "Optimal integration of solar collectors to Carnot battery system with regenerators," *Energy Convers Manag*, vol. 277, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116625.
- [40] B. Eppinger, L. Zigan, J. Karl, and S. Will, "Pumped thermal energy storage with heat pump-ORC-systems: Comparison of latent and sensible thermal storages for various fluids," *Appl Energy*, vol. 280, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115940.

## APÊNDICE - CÓDIGO DO MATLAB

```

-----BATERIA DE CARNOT-----
Parâmetros gerais (1=carga; -1=descarga; 0=nada)
carga=-1
Tinicial=60          %[°C]
Tquente_C=50; %[°C]
Tamb_C=20; %[°C]
Ef_comp=0.8;
Ef_bomba=0.8;
Ef_exp=0.85;
Ef_ele=0.95;
Sobreaquecimento=2;
Sobrefrefecimento=2;
Pot_comp=1000; %[W]
Pot_exp=1000; %[W]
Diferenca_temp_quente=2; %[°C]
Diferenca_temp_fria=5; %[°C]
periodo_estudo=24 %[h]
deltat=30          %[s]

%----STOPPING CRITERIA | CARGA----
%Max. Carga (% of Temperature Range)
stopcriterion_charge=0 %Criterion On/Off
maxcharge=95
%Max. Perda/Charge Ratio (Ploss/Pch)
stopcriterion_loss=0 %Criterion On/Off
maxlossratio=0.5
%Max. Temperatura
stopcriterion_Tmax=1
Tmax=Tquente_C

%----STOPPING CRITERIA | DISCARGA----
%T<Tevap_RC - stop if water temperature < RC Evap. temperature
stopcriterion_tevaprc=1 %Criterion On/Off
%Min. Temperature
stopcriterion_Tmin=1
Tmin=Tquente_C

Temperaturas absolutas
Tquente=Tquente_C + 273.15; %[K]
Tfria=Tamb_C + 273.15; %[K]
BOMBA DE CALOR /HP
fluido_hp='R1233ZD';
Tevap_hp=Tfria - Diferenca_temp_fria
Tcond_hp=Tquente + Diferenca_temp_quente

Pressões absolutas
Pevap_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tevap_hp,'Q',0,fluido_hp);          %[Pa]
Pcond_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tcond_hp,'Q',0,fluido_hp);          %[Pa]

```

**Ponto 1(vapor saturado)**

```
P1_hp=Pevap_hp
T1_hp=Tevap_hp
q1_hp=1
h1_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|gas',P1_hp,'T',T1_hp,fluido_hp)
s1_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|gas',P1_hp,'T',T1_hp,fluido_hp)
```

**Ponto 2(vapor sobreaquecido)**

```
P2_hp=Pcond_hp
s2s_hp=s1_hp
h2s_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',P2_hp,'S',s2s_hp,fluido_hp)
T2s_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P2_hp,'S',s2s_hp,fluido_hp)
h2_hp=h1_hp + ((h2s_hp - h1_hp)/Ef_comp)
s2_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','H',h2_hp,'P',P2_hp,fluido_hp)
T2_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','H',h2_hp,'P',P2_hp,fluido_hp)
```

**Ponto 3(Líquido saturado)**

```
P3_hp=Pcond_hp
q3_hp=0
T3_hp=Tcond_hp
h3_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|liquid',P3_hp,'T',T3_hp,fluido_hp)
s3_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|liquid',P3_hp,'T',T3_hp,fluido_hp)
```

**Ponto 4(mistura bifásica)**

```
P4_hp=Pevap_hp
h4_hp=h3_hp
T4_hp=Tevap_hp
s4_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P',P4_hp,'H',h4_hp,fluido_hp)
q4_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('Q','P',P4_hp,'H',h4_hp,fluido_hp)
```

**Trabalho do compressor [J/kg]**

```
wcomp_hp=h2_hp - h1_hp
```

**Calor liberado no condensador [J/kg]**

```
Qcond_hp=h2_hp - h3_hp
```

**Calor absorvido no evaporador [J/kg]**

```
Qevap_hp=h1_hp - h4_hp
```

**Caudal mássico do sistema [kg/s]**

```
mflow_hp=Pot_comp/wcomp_hp
```

**Potência do condensador [W]**

```
Pot_cond_hp=Qcond_hp*mflow_hp
```

**Potência do evaporador [W]**

```
Pot_evap_hp=Qevap_hp*mflow_hp
```

**COP da bomba de calor**

```
COP_hp=Qcond_hp/wcomp_hp
```

**2. CICLO ORGÂNICO DE RANKINE //ORC**

```
fluido_rc='R1233ZD';
Tevap_rc=Tquente - Diferenca_temp_quente;
Tcond_rc=Tfria + Diferenca_temp_fria;
```

**Pressões absolutas**

```
Pevap_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tevap_rc,'Q',0,fluido_rc);      %[Pa]
Pcond_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tcond_rc,'Q',0,fluido_rc);    %[Pa]
```

**Ponto 1(líquido saturado)**

```

P1_rc=Pcond_rc
T1_rc=Tcond_rc
h1_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|liquid',P1_rc,'T',T1_rc,fluido_rc)
s1_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|liquid',P1_rc,'T',T1_rc,fluido_rc)

Ponto 2(Líquido comprimido)
P2_rc=Pevap_rc
s2s_rc=s1_rc
h2s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',P2_rc,'S',s2s_rc,fluido_rc)
T2s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P2_rc,'S',s2s_rc,fluido_rc)
h2_rc=h1_rc + ((h2s_rc - h1_rc)/Ef_bomba)
T2_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P2_rc,'H',h2_rc,fluido_rc)
s2_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P',P2_rc,'H',h2_rc,fluido_rc)

Ponto 3(vapor saturado)
P3_rc=Pevap_rc
T3_rc=Tevap_rc
q3_rc=1
h3_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|gas',P3_rc,'T',T3_rc,fluido_rc)
s3_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|gas',P3_rc,'T',T3_rc,fluido_rc)

Ponto 4
s4s_rc=s3_rc
P4_rc=Pcond_rc
h4s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',P4_rc,'S',s4s_rc,fluido_rc)
T4s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P4_rc,'S',s4s_rc,fluido_rc)
h4_rc=h3_rc + ((h4s_rc - h3_rc)*Ef_exp)
s4_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P',P4_rc,'H',h4_rc,fluido_rc)
T4_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P4_rc,'H',h4_rc,fluido_rc)
q4_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('Q','P',P4_rc,'H',h4_rc,fluido_rc)

Trabalho da bomba [J/kg]
wbomba_rc=h2_rc - h1_rc

Trabalho do expansor [J/kg]
wexp_rc=h3_rc - h4_rc

Calor liberado no condensador [J/kg]
Qcond_rc=h4_rc - h1_rc

Calor absorvido no evaporador [J/kg]
Qevap_rc=h3_rc - h2_rc

Caudal mássico do sistema [kg/s]
mflow_rc=Pot_exp/wexp_rc

Potência do condensador [W]
Pot_cond_rc=Qcond_rc*mflow_rc

Potência do evaporador [W]
Pot_evap_rc=Qevap_rc*mflow_rc

Potência da bomba [W]
Pot_bomba_rc=mflow_rc*wbomba_rc

Eficiência do ORC
Eff_orc=(wexp_rc - wbomba_rc)/Qevap_rc

Eficiência de Carnot
Eff_Carnot_orc=1 - (Tcond_rc/Tevap_rc)

```

```

Eficiência global do sistema
P_2_P=COP_hp*Eff_orc

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
Vol_arm=5
cylratio=2

Coeffiente de transfereência de calor//Perda [W/m^2.K]
Dimensão interna do cilindro [m]
    di_arm=((4*Vol_arm)/(cylratio*pi))^(1/3)
    Li_arm=cylratio*di_arm

Trocador de calor - Condensador do HP
    U_hp_cond=1000    %[W/m^2.K]
    A_hp_cond=Pot_cond_hp/(U_hp_cond*(Diferenca_temp_quente))

Trocador de calor - Evaporador do HP
    U_hp_evap=1000
    A_hp_evap=Pot_evap_hp/(U_hp_evap*(Diferenca_temp_fria))

Trocador de calor - Evaporador do ORC
    U_rc_evap=1000
    A_rc_evap=Pot_evap_rc/(U_rc_evap*(Diferenca_temp_quente))

Trocador de calor - Condensador do ORC
    U_rc_cond=1000
    A_rc_cond=Pot_cond_rc/(U_rc_cond*(Diferenca_temp_fria))

Fluido de armazenamento
fluido_arm='water'
T=Tinicial + 273.15    %Temperatura inicial do fluido de armazenameto
pressao=101325
densidade=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('D','P',pressao,'T',T,fluido_arm)
m_arm=densidade*Vol_arm

Potência de carga e descarga [W]
Pcarga=0
Pdes=0

Quantidade de energia inicial
cp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','P',pressao,'T',T,fluido_arm)
E=m_arm*cp*(T)
E_inicial=E

Ciclo iterativo
i=1
for t=0:deltat:(3600*periodo_estudo)
if t==0
    %(do nothing)
else
    if carga==1
        error_bottom=1;
        while abs(error_bottom)>0.01 %check for power convergence HP evaporator
            error=1;
            while abs(error)>0.01 %check for power convergence HP condenser

Bomba de calor
Temperatuas absolutas
Tevap_hp=Tfria - Diferenca_temp_fria;

```

```

Tcond_hp=T + Diferenca_temp_quente;

Pressões absolutas
Pevap_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tevap_hp,'Q',0,fluido_hp);      %[Pa]
Pcond_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tcond_hp,'Q',0,fluido_hp);      %[Pa]

Ponto 1(vapor saturado)
P1_hp=Pevap_hp;
T1_hp=Tevap_hp;
h1_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|gas',P1_hp,'T',T1_hp,fluido_hp);
s1_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|gas',P1_hp,'T',T1_hp,fluido_hp);

Ponto 2(vapor sobreaquecido)
P2_hp=Pcond_hp;
s2s_hp=s1_hp;
h2s_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',P2_hp,'S',s2s_hp,fluido_hp);
T2s_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P2_hp,'S',s2s_hp,fluido_hp);
h2_hp=h1_hp + ((h2s_hp - h1_hp)/Ef_comp);
s2_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','H',h2_hp,'P',P2_hp,fluido_hp);
T2_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','H',h2_hp,'P',P2_hp,fluido_hp);

Ponto 3(Líquido saturado)
P3_hp=Pcond_hp;
T3_hp=Tcond_hp;
h3_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|liquid',P3_hp,'T',T3_hp,fluido_hp);
s3_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|liquid',P3_hp,'T',T3_hp,fluido_hp);

Ponto 4(mistura bifásica)
P4_hp=Pevap_hp;
h4_hp=h3_hp;
T4_hp=Tevap_hp;
s4_hp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P',P4_hp,'H',h4_hp,fluido_hp);
wcomp_hp=h2_hp - h1_hp;
Qcond_hp=h2_hp - h3_hp;
Qevap_hp=h1_hp - h4_hp;

Potência de carregamento
Pcarga=(Tcond_hp - T)*U_hp_cond*A_hp_cond;

Potência do condensador
Pot_cond_hp=mflow_hp*Qcond_hp;
Tcond_hp=T + (Pot_cond_hp/(A_hp_cond*U_hp_cond));
error=Pcarga - Pot_cond_hp;
Diferenca_temp_quente=Tcond_hp - T;
    end

Potência do evaporador
Pot_evap_hp=mflow_hp*Qevap_hp;

Potência do permutador do evaporador // HEX
Pot_evap_hp_hex=(Tfria - Tevap_hp)*U_hp_evap*A_hp_evap;
Tevap_hp=Tfria - (Pot_evap_hp/(A_hp_evap*U_hp_evap));

error_bottom=Pot_evap_hp_hex - Pot_evap_hp;
Diferenca_temp_fria=Tfria - Tevap_hp;
    end

Potência do compressor

```

```

Pot_comp=mflow_hp*wcomp_hp;

Trabalho elétrico
ele_carga=Pot_comp*deltat/Ef_ele;

Consumo de energia no evaporador
Eevapcons_hp=Pot_evap_hp*deltat;

Consumo de energia no condensador
Eliberada_cond_hp=Pot_cond_hp*deltat;
COP_hp=Qcond_hp/wcomp_hp;
    end
if carga== -1
    error_bottom=-1;
    while abs(error_bottom)>0.01 %check for power convergence - ORC Condenser
        error=1;
        while abs(error)>0.01 %%check for power convergence - ORC evaporator

Ciclo Orgânico de Rankine

Temperaturas absolutas
Tcond_rc=Tfria + Diferenca_temp_fria;
Tevap_rc=T - Diferenca_temp_quente;

Pressões absolutas
Pevap_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tevap_rc,'Q',0,fluido_rc);    %[Pa]
Pcond_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('P','T',Tcond_rc,'Q',0,fluido_rc);    %[Pa]

Ponto 1(líquido saturado)
P1_rc=Pcond_rc;
T1_rc=Tcond_rc;
h1_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|liquid',P1_rc,'T',T1_rc,fluido_rc);
s1_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|liquid',P1_rc,'T',T1_rc,fluido_rc);

Ponto 2(Líquido comprimido)
P2_rc=Pevap_rc;
s2s_rc=s1_rc;
h2s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',P2_rc,'S',s2s_rc,fluido_rc);
T2s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P2_rc,'S',s2s_rc,fluido_rc);
h2_rc=h1_rc + ((h2s_rc - h1_rc)/Ef_bomba);
T2_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P2_rc,'H',h2_rc,fluido_rc);
s2_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P',P2_rc,'H',h2_rc,fluido_rc);

Ponto 3(vapor saturado)
P3_rc=Pevap_rc;
T3_rc=Tevap_rc;
h3_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P|gas',P3_rc,'T',T3_rc,fluido_rc);
s3_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P|gas',P3_rc,'T',T3_rc,fluido_rc);

Ponto 4
s4s_rc=s3_rc;
P4_rc=Pcond_rc;
h4s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',P4_rc,'S',s4s_rc,fluido_rc);
T4s_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P4_rc,'S',s4s_rc,fluido_rc);
h4_rc=h3_rc + ((h4s_rc - h3_rc)*Ef_exp);
s4_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('S','P',P4_rc,'H',h4_rc,fluido_rc);
T4_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',P4_rc,'H',h4_rc,fluido_rc);
q4_rc=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('Q','P',P4_rc,'H',h4_rc,fluido_rc);
Wbomba_rc=h2_rc - h1_rc;

```

```

Wexp_rc=h3_rc - h4_rc;
Qcond_rc=h4_rc - h1_rc;
Qevap_rc=h3_rc - h2_rc;

Potência de descarga
Pdes=(T - Tevap_rc)*Urc_evap*Arc_evap;
Potevap_rc=mflow_rc*Qevap_rc;
Tevap_rc=T - (Potevap_rc/(Arc_evap*Urc_evap));
error=Pdes - Potevap_rc;
Diferencatemp_quente=T - Tevap_rc;
    end

Potência do condensador
Potcond_rc=mflow_rc*Qcond_rc;
Potcond_rc_hex=(Tcond_rc - Tfria)*Arc_cond*Urc_cond;
Tcond_rc=Tfria + (Potcond_rc/(Arc_cond*Urc_cond));
errorbottom=Potcond_rc_hex - Potcond_rc;
Diferencatemp_fria=Tcond_rc - Tfria;
    end

Potexp=mflow_rc*Wexp_rc;
Potbomba_rc=mflow_rc*Wbomba_rc;
eledis=(Potexp - Potbomba_rc)*deltat*Ef_ele;
Eevapcons_rc=Potevap_rc*deltat;
Efforc=(Wexp_rc - Wbomba_rc)/Qevap_rc;
    end
cp=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','T',T,'P',pressao,fluido_arm);

Balanco de energia
E=E + (Pcarga*deltat) - (Pdes*deltat);

Temperatura
T=E/(marm*cp);
Tc=T - 273.15;
tlog(i)=t;
Tclog(i)=Tc;
Elog(i)=E;
cplog(i)=cp;
Diferencatemp_quentelog(i)=Diferencatemp_quente;
Diferencatemp_frialog(i)=Diferencatemp_fria;
if carga==1
Pcargalog(i)=Pcarga;
elecargalog(i)=elecarga;
Potcomplog(i)=Potcomp;
Ecomplog(i)=Potcomp*deltat;
COPhplog(i)=COPhp;
Potcond_hplog(i)=Potcond_hp;
tempercentlog(i)=((T - (Tinicial + 273.15))/(Tcond_hp - (Tinicial + 273.15)))*100;
Potevap_hplog(i)=Potevap_hp;
Eliberada_cond_hplog(i)=Eliberada_cond_hp;
Eevapcons_hplog(i)=Eevapcons_hp;
Tevap_rclog(i)=Tevap_rc;
    end
if carga==-1

```

```

Pdeslog(i)=Pdes;
ele_dislog(i)=ele_dis;
Pot_explog(i)=Pot_exp;
Pot_bomba_rclog(i)=Pot_bomba_rc;
Pot_evap_rclog(i)=Pot_evap_rc;
Pot_cond_rclog(i)=Pot_cond_rc;
Eff_orclog(i)=Eff_orc;
Eevapcons_rclog(i)=Eevapcons_rc;
temppercentlog(i)=((T-Tevap_rc)/((Tinicial + 273.15) - Tevap_rc))*100;
Ebombalog(i)=Pot_bomba_rc*deltat;
Eexplog(i)=Pot_exp*deltat;
Tcond_hplog(i)=Tcond_hp;
end

Critério de paragem - Carga
if carga==1
if stopcriterion_loss==1
if Pperda/Pcarga>maxlossratio
break
end
end
if stopcriterion_charge==1
if temppercentlog(t)>maxcharge
break
end
end
end
if stopcriterion_Tmax==1
if T>(Tmax + 273.15)
break
end
end
end

Critério de paragem - Descarga
if carga==-1
if stopcriterion_tevaprc==1
if T<Tevap_rc
break
end
end
if stopcriterion_Tmin==1
if T<(Tmin + 273.15)
break
end
end
end

Atualização do índice de interação
i=i + 1;
end
end
i=i-1;

%----FIM DO CICLO INTERATIVO-----

```

```

%True storage spread[K]
Diferenca=abs(T_clog(1) - T_clog(length(T_clog)));
%Capacidade térmica de difereça [KWh]
heatcap=abs(Elog(i) - E_inicial)/(3600*1000);

Energia térmica total do HP
if carga==1
Econdreleasehp_total=sum(Eliberada_cond_hplog)/(3600*1000);
Eevapconshp_total=sum(Eevapcons_hplog)/(3600*1000);
Ecomp_total=sum(Ecomplog)/(3600*1000);
else
Econdreleasehp_total=0;
Eevapconshp_total=0;
Ecomp_total=0;
end

Energia térmica total do ORC
if carga== -1
Eevapconsrc_total=sum(Eevapcons_rclog)/(3600*1000);
Epump_total=sum(Ebombalog)/(3600*1000);
Eexp_total=sum(Eexplog)/(3600*1000);
else
Eevapconsrc_total=0;
Epump_total=0;
Eexp_total=0;
end

Valor elétrico total
if carga==1
ele_charge_total=sum(ele_cargalog)/(3600*1000);
ele_discharge_total=0;
end
if carga== -1
ele_discharge_total=sum(ele_dislog)/(3600*1000);
ele_charge_total=0;
end
if carga==0
ele_discharge_total=0;
ele_charge_total=0;
end

Potência media [KWh]
%BC
if carga==1
power_avg_comp=mean(Pot_complog)/1000
power_avg_el=ele_charge_total/(t/3600)
power_avg_cond=mean(Pot_cond_hplog)/1000
power_avg_evap=mean(Pot_evap_hplog)/1000
end
%ORC
if carga== -1
power_avg_pump=mean(Pot_bomba_rclog)/1000
power_avg_exp=mean(Pot_explog)/1000
end

```

```

power_avg_el=ele_discharge_total/(t/3600)
end

Resultados
isentropicdebug=["ISENTROPIC EFFICIENCY DEBUG" "VALUES MUST MATCH INITIAL INPUT";"ORC EXPANDER"
(h3_rc-h4_rc)/(h3_rc-h4s_rc);"ORC PUMP" (h2s_rc-h1_rc)/(h2_rc-h1_rc);"BC COMPRESSOR" (h2s_hp-
h1_hp)/(h2_hp-h1_hp)]
results_hex=["HP Condenser Power[W]" Pot_cond_hp;"HP Condenser U [W/(m^2.K)]" U_hp_cond;"HP
Cond.Heat Transfer Area [m^2]" A_hp_cond;"RC Evaporator Power[W]" Pot_evap_rc;"RC Evaporator U
[W/(m^2.K)]" U_rc_evap;"RC Evap. Heat Transfer Area [m^2]" A_rc_evap])
results_storage=["Storage Spread [C]" Diferenca;"Min.Temperature [C]" min(T_clog);"Max. Temperature
[C]" max(T_clog); "Approx. Energy Contained in Spread [kWh]" heatcap]
results_el=["El. Energy in Charge [kWh]" ele_charge_total;"El. Energy in Discharge [kWh]"
ele_discharge_total]
if carga==1
    results_hp=["HP Cond. Energy Release [kWh]" Econdreleasehp_total;"HP COP"
Econdreleasehp_total/ele_charge_total]
end
if carga==-1
    results_orc=["ORC Evaporator Consumption [kWh]" Eevapconsrc_total;"ORC Efficiency"
ele_discharge_total/Eevapconsrc_total]
end

STOP
if carga==1
    if stopcriterion_charge==1
        if temppercentlog(t)>maxcharge
            criteriadiisp_charge=["STOP CRITERION - " "Storage charged to" maxcharge "%"]
        end
    end
    if stopcriterion_Tmax==1
        if T>(Tmax+273.15)
            criteriadiisp_Tmax=["STOPPING CRITERION -" "Max. Temperature of" T_c "reached after"
t/3600 "hours"]
        end
    end
end
end
%Stopping Criteria Results - Discharge
if carga==-1
    if stopcriterion_tevaprc==1
        if T<Tevap_rc
            criteriadiisp_tevaprc=["STOPPING CRITERION -" "Storage Temperature below ORC Evaporator
Temperature"]
        end
    end
    if stopcriterion_Tmin==1
        if T<(Tmin+273.15)
            criteriadiisp_Tmin=["STOPPING CRITERION -" "Minimum Temperature of" T_c "reached after"
t/3600 "hours"]
        end
    end
end
end
plot(tlog/3600, 100*Eff_orclog)

```