



# Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

## Sistemas de Armazenamento de Energia para Integração Eficiente de Energias Renováveis

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica

Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas  
Térmicos

Autor

**Simão Pedro Correia Magalhães**

Orientador

**Gilberto Cordeiro Vaz**

Co-Orientador

**Anabela Duarte Carvalho**

Coimbra, março de 2026



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento aos meus pais e ao meu irmão, por todo o amor, carinho, paciência e confiança que sempre me transmitiram. Graças ao vosso exemplo e encorajamento, eu fui capaz de alcançar este objetivo.

De seguida gostaria manifestar a minha mais sincera gratidão à minha namorada, quero agradecer pelo constante incentivo, apoio e compreensão demonstrados por ela ao longo de todo o meu percurso de desenvolvimento da tese. O seu apoio emocional foi bastante importante.

Agradeço igualmente aos meus orientadores, a professora Anabela Duarte Carvalho e ao professor Gilberto Cordeiro Vaz, por toda a orientação científica fornecida pelos mesmos, e por toda a disponibilidade e contribuições que foram prestadas ao longo deste processo. A vossa experiência e acompanhamento foi determinante para o sucesso desta tese.

## **RESUMO**

O aumento da integração de fontes de energia renovável variável, tal como é o exemplo da energia solar e da energia eólica, tem elevado a importância dos sistemas de armazenamento de energia para que seja possível garantir a estabilidade e a fiabilidade das redes elétricas. Nesta dissertação serão abordadas, de forma abrangente, algumas das tecnologias de armazenamento existentes na atualidade, incluindo as baterias de iões de lítio, o armazenamento térmico e o armazenamento híbrido. O foco principal da tese será, no entanto, as baterias de Carnot, que se apresentam cada vez mais como uma solução inovadora, capaz de combinar armazenamento térmico e conversão elétrica, com elevado potencial para aplicações de longa duração.

São analisados alguns dos princípios de funcionamento das baterias de Carnot, incluindo o ciclo de Brayton e o ciclo de Rankine e são apresentadas vantagens e desvantagens face a tecnologias convencionais, como é o exemplo da bateria eletroquímica de iões de lítio, nomeadamente em termos do custo nivelado de armazenamento, flexibilidade geográfica, possibilidade e capacidade de fornecimento simultâneo de eletricidade e calor.

## **ABSTRACT**

The increased integration of variable renewable energy sources, such as solar and wind energy, has heightened the importance of energy storage systems in order to ensure the stability and reliability of electricity grids. This dissertation will comprehensively address the different forms or some of the storage technologies currently available, including lithium-ion batteries, thermal storage, hybrid storage, and the thesis will have a main focus, which is Carnot batteries, which are increasingly being presented as an innovative solution that has the ability to combine thermal storage and electrical conversion, with high potential for long-term applications.

Some of the operating principles of Carnot batteries are analysed, including the Brayton cycle and the Rankine cycle, and the advantages and disadvantages compared to conventional technologies, such as lithium-ion electrochemical batteries, are presented, particularly in terms of levelised storage cost, geographical flexibility, and the possibility and capacity for simultaneous supply of electricity and heat.

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Índice de figuras.....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Siglas e acrónimos .....	ix
Símbolos .....	x
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização do documento.....	3
2 Estado da Arte .....	4
2.1 Armazenamento de energia .....	4
2.2 Armazenamento de energia mecânica .....	8
2.2.1 Armazenamento de energia por bombagem.....	8
2.2.2 Armazenamento de energia por volante de inércia.....	11
2.2.3 Sistema de armazenamento de energia de ar comprimido .....	13
2.3 Armazenamento de energia térmica .....	18
2.3.1 Armazenamento de energia por calor sensível .....	19
2.3.2 Armazenamento de energia por calor latente .....	23
2.3.3 Sistema de armazenamento de energia térmica bombeada .....	27
2.4 Breve comparação entre sistemas .....	28
3 Bateria de Carnot .....	34
3.1 Definição do ciclo de bateria de Carnot.....	35
3.2 Diferentes tecnologias de aplicação das baterias de Carnot .....	38
3.2.1 Sistemas PTES de ciclo de Brayton .....	38
3.2.2 Sistema PTES do ciclo de Rankine .....	43
3.3 Bateria convencional vs Bateria de Carnot .....	55
4 Perspetivas e desafios futuros .....	57
4.1 Baterias de Carnot.....	57
4.2 Sistemas PHS.....	58

*Sistemas de armazenamento de energia para integração eficiente de energias renováveis*

4.3	Sistemas CAES.....	59
4.4	Baterias de íões de lítio .....	60
4.5	Sistemas FES .....	61
4.6	Apreciação global.....	61
5	Conclusões.....	62
	Referências bibliográficas .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Sistema de armazenamento PHS.....	9
Figura 2.2 – Distribuição da potência instalada em sistemas de armazenamento a nível mundial, destacando a predominância do PHS [14].....	10
Figura 2.3- Esquema geral de um Sistema FES [17].....	12
Figura 2.4 – Esquema de um sistema de armazenamento de ar comprimido [23].	14
Figura 2.5 – Representação esquemática de um sistema CAES adiabático. M-Motor; C-Compressor; T-Turbina;G-Gerador;R-Reservatório/H- Tanque térmico. ....	16
Figura 2.6 – Representação esquemática de um sistema de armazenamento LAES [27].....	17
Figura 2.7- Formas de armazenamento de energia térmica.....	19
Figura 2.8 – Exemplo de um sistema SHS [30]. ....	21
Figura 2.9 – Imagem ilustrativo de um leito de seixos ou de rochas [31]. ....	23
Figura 2.10 – Gráfico de transição de fase de um material de armazenamento quando lhe é adicionado ou removido calor [3]. ....	26
Figura 2.11 – Esquema geral de um sistema PTES. M/G-Motor-gerador; Turb-Turbina;Comp- Compressor [34]. ....	27
Figura 3.1 - Esquema de uma bateria de Carnot [12].....	36
Figura 3.2 - Esquema de funcionamento do ciclo PTES-Brayton [46]. ....	39
Figura 3.3 – Diagrama T-s de um sistema PTES-Brayton. ....	41
Figura 3.4 – Diagrama T-s de um ciclo real (azul) de carga e descarga de um sistema PTES-Brayton [48]. ....	42
Figura 3.5-Esquema do ciclo PTES-Rankine [46].....	43
Figura 3.6 – Diagrama T-s para o ciclo de compressão de vapor num sistema PTES-Rankine convencional [49]. ....	44
Figura 3.7 - Diagrama T-s para a fase de descarga [50]. ....	45
Figura 3.8 – Diagrama T-s para o ciclo de compressão da amónia num sistema PTES-Rankine convencional [49].....	46
Figura 3.9 – Diagrama de princípio de um sistema PTES-Rankine ORC. M-Motor; ST-reservatório de armazenamento; HP-Bomba de calor; G – Gerador.....	46
Figura 3.10- Diagrama T-s de um sistema Rankine Orgânico [49]. ....	48
Figura 3.11 – Diagrama do ciclo ORC regenerativo: (a) Diagrama de princípio dos processos de regeneração; (b) Diagrama T-s [54].....	49

Figura 3.12 – Diagrama de processo de um sistema PTES-Rankine transcrito. AHX: permutador de calor auxiliar; HHX/CHX: permutador de calor quente/frio. .... 51

Figura 3.13 - Diagrama T-s de um sistema PTES-Rankine transcrito. .... 52

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. - Exemplos de projetos de sistemas de armazenamento de energia utilizados na atualidade [8]. .....	5
Tabela 2.2 - Parâmetros energéticos e de potência das tecnologias de armazenamento de energia [34,35]. .....	29
Tabela 2.3.- Desempenho e durabilidade das tecnologias de armazenamento de energia [34,35]. .....	29
Tabela 2.4. – Custos, maturidade e tempo de operação das tecnologias de armazenamento de energia [34,35]. .....	30
Tabela 3.1 - Características das diferentes propriedades das configurações de um sistema PTES [49]. .....	54

## **SIGLAS E ACRÓNIMOS**

Tabela de siglas:

ESS	Energy storage system
PHS	Pumped storage system
FES	Flywheel energy storage system
CAES	Compressed air energy storage system
LAES	Liquid air energy storage system
TES	Thermal energy storage system
PCM	Phase change material
SHS	Sensible heat storage system
LHS	Latent heat storage system
PTES	Pumped thermal energy storage
PTES- Brayton	Brayton cycle pumped thermal energy storage
PTES- Rankine	Rankine cycle pumped thermal energy storage
$\eta_{RTE}$	Roundtrip efficiency
$\eta_{UE}$	Useful energy efficiency

## SÍMBOLOS

### Alfabeto latino

$T1$	Temperatura inicial do material armazenado...( $^{\circ}\text{C}$ )
$T2$	Temperatura final do material armazenado...( $^{\circ}\text{C}$ )
$m$	Massa total do material...(kg)
$cp$	Calor específico do material...(J/(kg.K))
$Q$	Quantidade de calor sensível armazenado...(J)
$Ql$	Capacidade de calor latente armazenado...(J)
$cps$	Calor específico do sólido...(J/(kg.K))
$cpl$	Calor específico do líquido...(J/(kg.K))
$h$	Entalpia de mudança de estado...(J/kg)
$Tm$	Temperatura de fusão do material...( $^{\circ}\text{C}$ )
$Tl$	Temperatura no estado líquido...( $^{\circ}\text{C}$ )
$Ts$	Temperatura no estado sólido...( $^{\circ}\text{C}$ )

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Enquadramento**

Cada vez é de maior importância começar a adotar ideologias e tecnologias que possam tornar o planeta num local mais sustentável.

Desse modo, os sistemas de armazenamento de energia (ESS) apresentam-se como uma solução para estes constantes problemas que surgem. Cada vez mais as energias renováveis apresentam-se como uma solução para caminhar em direção à extinção da utilização de combustíveis fósseis.

Porém, não se trata apenas de utilizar energias renováveis de forma a ser possível armazená-las como meio de resposta para uma utilização futura em períodos de procura, mas sim de como se pode explorar estes recursos de forma que não ocorra uma exploração que afete a preservação dos locais e ao mesmo tempo seja possível atender a todas as necessidades [1].

A necessidade de começar a adotar fontes de energia renováveis tem vindo a aumentar de forma significativa, uma vez que o impacto ambiental que o consumo de combustíveis fósseis tem no planeta é algo que tem vindo a preocupar bastante tanto os políticos como os investigadores [2].

O constante crescimento da população e os constantes avanços tecnológicos foram os principais impulsionadores para o crescimento do consumo de combustíveis fósseis, e ao contrário das energias renováveis, os combustíveis fósseis não se regeneram nem existem com a abundância que as energias renováveis conseguem fazer.

Nos últimos anos, a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis tem registado um crescimento assinalável, acompanhada de um aumento da sua integração nos sistemas elétricos. Contudo, a intermitência destas fontes e o desfasamento entre a produção e a procura de energia representam desafios significativos para a estabilidade e eficiência do sistema.

Por exemplo, a geração solar pode apresentar reduzida eficiência em dias nublados, enquanto as turbinas eólicas podem ser pouco produtivas em períodos de vento fraco. Adicionalmente, a produção de energia renovável pode, por vezes, exceder a procura, o que vai originar sobrecargas no sistema.

Nesse contexto, os ESS assumem um papel central como solução eficaz para contornar estas limitações, assegurando um equilíbrio adequado entre a oferta e a procura de energia. Os ESS permitem a recolha de energia proveniente de múltiplas fontes, a sua transformação e armazenamento de acordo com as necessidades do

sistema, apresentando assim, um elevado potencial para otimizar a gestão energética e reduzir perdas e desperdícios [3,4].

Dado que cada vez existem mais pessoas, a procura e a necessidade de eletricidade também tem vindo a aumentar, visto que esse crescimento conseqüentemente aumenta a atividade económica e a eletrificação progressiva dos diversos setores. Paralelamente, as questões ambientais e as necessidades de redução de emissão de gases com efeito de estufa exigem que a produção de energia seja realizada cada vez mais a partir de fontes renováveis e de forma eficiente. Com o crescimento populacional, aumenta também a preocupação com a gestão do setor elétrico, devido ao seu elevado impacto ambiental. Nesse sentido, têm sido implementadas alterações significativas nos métodos de produção de eletricidade, privilegiando fontes que contribuem, de forma indireta, para a redução da dependência de combustíveis fósseis, que é um objetivo cada vez mais relevante.

No entanto, as energias renováveis apresentam um carácter intermitente e um carácter que vai depender diretamente dos fatores climáticos, como é o exemplo da produção eólica, que depende da presença e intensidade do vento em determinados períodos. Esta variabilidade que a produção eólica apresenta dificulta o equilíbrio imediato entre a produção e o consumo [5].

Nos últimos anos, a produção de eletricidade a partir de fontes de energia renováveis e a sua integração no sistema elétrico têm aumentado de forma significativa. No entanto, a intermitência inerente a estas fontes, bem como o desfasamento entre a produção e o consumo de energia, constituem desafios relevantes para o sistema elétrico. Neste contexto, os ESS surgem como uma solução eficaz e eficiente para a integração de fontes renováveis [3].

Perante este enquadramento, os sistemas de armazenamento de energia elétrica, permitem acumular a energia produzida em períodos de maior disponibilidade e utilizá-la em períodos onde a procura aumenta, contribuindo assim para a estabilidade, flexibilidade e fiabilidade do sistema elétrico, apoiando de certa forma a integração eficiente das fontes renováveis na rede [5,6].

O potencial que os ESS apresentam para conseguir minimizar os desperdícios de produção de energia e conseguir combater o desfasamento de produção é enorme, uma vez que eles são projetados com um único objetivo: captar e energia proveniente de várias fontes renováveis, transformar essa energia (seja na forma de energia potencial gravítica, energia cinética, etc) e armazená-la para que seja possível proceder à sua utilização nos momentos de maior necessidade [3].

## **1.2 Objetivos**

O objetivo da dissertação passa por fornecer uma visão integrada dos sistemas de armazenamento de energia com destaque especial nas baterias de Carnot. Estas tecnologias permitem converter eletricidade em calor, armazená-lo e reconvertê-lo

em eletricidade assim que necessário, oferecendo dessa forma flexibilidade à rede e potencial utilização de calor útil. O estudo visa ainda avaliar as vantagens, limitações e desafios destas tecnologias, enquadrando o seu papel na transição energética e na integração de fontes renováveis intermitentes.

### **1.3 Organização do documento**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

- No primeiro capítulo será feita uma apresentação aos objetivos do trabalho, o enquadramento teórico e será abordada a importância de transitar para sistemas de armazenamento de energias provenientes de fontes renováveis.
- No segundo capítulo será feita uma abordagem aos tipos de tecnologias de armazenamento de energia mais comuns, destacando as suas características, vantagens e limitações e no fim será feita uma breve comparação entre elas.
- No terceiro capítulo é onde se vai explicar os princípios de funcionamento das baterias de Carnot, potencialidades e diferentes configurações associadas a ciclos termodinâmicos como o ciclo de Brayton, Rankine convencional, orgânico, transcrito e subcrítico.
- No quarto capítulo, serão analisadas limitações tecnológicas, impactos ambientais, projetos em desenvolvimento e perspectivas de implementação.
- E por fim, a conclusão sintetiza os resultados do estudo, evidenciando o papel das baterias de Carnot na integração eficiente de fontes renováveis e na melhoria da flexibilidade e fiabilidade dos sistemas elétricos.

## **2 ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Armazenamento de energia**

Para que ocorra uma transição para uma economia e um planeta que tenha o objetivo de liquidar as emissões de carbono exige uma necessidade quase absoluta, que é a utilização e integração muito mais ampla de fontes de energia renováveis nos sistemas.

A substituição das fontes de energia convencionais por fontes de energia renováveis constitui um desafio relevante. As fontes convencionais permitem uma produção de eletricidade linear e contínua, enquanto as fontes de energia renováveis, devido à sua natureza intermitente, apresentam uma oferta de energia não contínua. Esta característica condiciona a produção, uma vez que esta varia em função de diversas condições.

O desfasamento entre a produção de energia que é disponibilizada por fontes renováveis e o respetivo consumo constitui um desafio significativo, uma vez que compromete a gestão e a estabilidade da rede elétrica. Tal decorre do facto de não ser possível assegurar condições meteorológicas constantes que garantam uma produção contínua, como sucede no caso das fontes eólicas e solares.

Os ESS surgem com o propósito de mitigar estas dificuldades e de assegurar um funcionamento fiável e eficiente da rede elétrica. Um ESS bem projetado revela-se, além disso, economicamente mais viável e mais eficiente do que os sistemas convencionais. Estas tecnologias permitem armazenar a energia produzida em excesso, isto é a energia produzida em períodos de elevada oferta e de procura reduzida. Quando ocorre uma interrupção na fonte de produção, ou quando esta deixa de ter capacidade para fornecer energia, a energia previamente armazenada é libertada, contribuindo para garantir a estabilidade e a segurança do fornecimento elétrico [7].

A Tabela 2.1 apresenta alguns dos principais projetos de grande escala a nível de ESS que existem.

*Sistemas de armazenamento de energia para integração eficiente de energias renováveis*

Tabela 2.1. - Exemplos de projetos de sistemas de armazenamento de energia utilizados na atualidade [8].

País	Nome do Projeto	Tecnologia utilizada	Potência nominal	Aplicação	Data de início
EUA	Central elétrica de armazenamento hidroelétrico por bombagem	Armazenamento por bombagem	1652000kW	Deslocamento temporal de energia elétrica Capacidade de fornecimento de energia	1978
EUA	Microrede UCI	Armazenamento térmico de água gelada	6590 kW	Gestão de faturas de eletricidade	1993
EUA	Distrito de Faculdades Comunitárias de Los Angeles - Calmac	Armazenamento térmico com gelo	4620kW	Gestão de faturas de eletricidade Deslocamento temporal de energia elétrica	2008
Japão	Volante de inércia de 200kW	Armazenamento de volante de inércia	100 kW	Redução da intermitência da energia eólica	2003
China	Estação de energia hidroelétrica de Huizhou	Armazenamento por bombagem	2448000kW	Deslocamento temporal de energia elétrica Capacidade de reserva de fornecimento elétrico Regulação de Frequência	2000
China	Estação de energia hidroelétrica de Guangzhou	Armazenamento por bombagem	2400MW	Deslocamento temporal de energia elétrica Capacidade de reserva de fornecimento elétrico Regulação de Frequência	2011

Reino Unido	Demonstrador de Armazenamento de energia de ar líquido de 5MW da Higview	Sistema LAES	5000kW	Capacidade de reserva de fornecimento elétrico Regulação da frequência Alívio de congestionamento em transmissão	2018
Alemanha	Central de ar comprimido de Huntorf	Sistema CAES	290MW	Redução de picos de carga Deslocamento de carga	1973
EUA	Norton	Sistema CAES	2700MW	Redução de picos de carga Deslocamento de carga	2013
EUA	McIntosh Central CAES	Sistema CAES	110MW	Gestão de carga Geração intermédia Seguimento de carga	1991
EUA	Texas Instruments Manufacturing Plant	Armazenamento térmico de água gelada	6400kW	Gestão de faturas de eletricidade Deslocamento temporal de energia elétrica	1989
EUA	Usina hidroelétrica de Bombagem de Ludington	Armazenamento hidroelétrico por bombagem	1872000kW	Deslocamento temporal de carga Capacidade de fornecimento de energia elétrica Seguimento de carga	1973
EUA	Estação de armazenamento hidroelétrico por bombagem de Bath County	Armazenamento hidroelétrico por bombagem	2772 MW	Nivelamento de carga Redução de picos	1985

Contrariamente a algumas percepções, a projeção de um ESS exige um planeamento cuidadoso. Apesar de os recursos serem renováveis, estes nem sempre se encontram disponíveis com a mesma abundância e qualidade. Assim, torna-se essencial projetar um sistema de armazenamento que permita maximizar a energia aproveitada, mesmo que tal implique a conjugação de diferentes métodos de armazenamento de energia [9].

Ao abordar um ESS, é fundamental considerar as suas principais características, que são apresentadas de seguida [10]:

- Capacidade – a capacidade define a energia que é armazenada no sistema, e que irá variar conforme o processo de armazenamento e o tamanho do sistema.
- Potência – a potência de um sistema de armazenamento basicamente define a rapidez com que a energia armazenada pode ser descarregada e carregada.
- Eficiência – a eficiência é a razão existente entre a energia que é fornecida ao utilizador e a energia necessária para carregar o sistema de armazenamento. É a eficiência que reflete as perdas de energia que ocorrem durante o período de armazenamento e o ciclo de carga/descarga.
- Período de armazenamento – o período de armazenamento define o tempo que decorre enquanto a energia é armazenada, podendo variar entre horas, ou até mesmo meses.
- Tempo de carga e descarga – este é o tempo necessário para que o sistema carregue ou descarregue.
- Custo – o custo refere-se a vários fatores do sistema de armazenamento, podendo-se referir à capacidade, em €/kWh, à potência, em €/kW. O custo vai também depender de quanto se gastou para implementar o sistema e de quanto dura a sua vida útil.

## **2.2 Armazenamento de energia mecânica**

Os sistemas de armazenamento de energia mecânica constituem uma das formas de armazenamento de energia mais antigas.

Quando há excesso de produção, a eletricidade é convertida e armazenada sob a forma de energia potencial ou cinética (energia mecânica). Por outro lado, quando a procura é elevada e há grande necessidade de fornecimento, a energia mecânica previamente armazenada é reconvertida em eletricidade.

Através destes sistemas é possível que se armazene energia de uma forma fácil e durante grandes períodos [11].

Os sistemas de armazenamento de energia mecânicos apresentam diversas vantagens face a outros tipos de sistemas. Estas vantagens podem ser observadas em vários aspetos: no custo de capital, visto que apresentam valores significativamente mais reduzidos; na potência e na vida útil, estes valores são mais elevados, atendendo aos objetivos típicos destes ESS [11].

### **2.2.1 Armazenamento de energia por bombagem**

Recentemente os sistemas de armazenamento de energia por bombagem (PHS) representam cerca de 3% da capacidade de produção mundial de energia elétrica e 99% da capacidade de armazenamento de eletricidade, o que de certa forma acaba por tornar este tipo de sistemas num dos sistemas de armazenamento de energia mais utilizados [12].

Os sistemas PHS acabam por ser um sistema de armazenamento relativamente simples e que é capaz de oferecer uma enorme capacidade de armazenamento de energia, que pode variar entre 1 e 3000 MWh. Este sistema oferece uma eficiência que pode ser considerada elevada, variando entre os 76% e os 85%, este sistema também consegue ter um ciclo de vida bastante longo.

Um sistema PHS acaba por ser um sistema que tem o funcionamento inverso de uma central hidroelétrica convencional. No fundo, num sistema convencional a água que é armazenada é utilizada uma vez, enquanto no sistema PHS a água é armazenada num dos reservatórios, onde mais tarde será libertada para uma turbina para que se possa produzir eletricidade através da conversão da energia potencial gravitacional da água [8].

Um PHS consiste num sistema onde são colocados dois reservatórios de dimensões distintas em dois locais com diferentes cotas altimétricas e para que seja possível que tal aconteça, este sistema de armazenamento deve ser colocado num local com um desnível topográfico. Na maior parte dos casos, o reservatório de maior dimensão é colocado no ponto mais baixo e o reservatório de menor dimensão é colocado no ponto mais elevado [1]. Neste sistema, a água armazenada no reservatório de maior altitude é libertada através da turbina, acionando o gerador e produzindo eletricidade. A principal ideia deste sistema é que este seja utilizado em rios ou em barragens, para

que a água seja armazenada no reservatório que está a uma menor altitude (o reservatório de maiores dimensões), e sempre que houver necessidade, ocorre uma bombagem de água do reservatório inferior para o reservatório superior através da ajuda de uma bomba. Uma vez chegando a altura de maior consumo, a água armazenada é libertada para que possa ocorrer uma maior produção de eletricidade [8]

Apesar de este tipo de sistemas ser de forma geral um sistema simples, a forma como o próprio é projetado acaba por fazer com que seja de uma aplicação mais limitada e desafiadora, uma vez que há a necessidade de haver formações geológicas adequadas para os reservatórios de armazenamento. Este sistema não tem um funcionamento tão otimizado se for utilizado em terrenos planos, uma vez que para que seja possível armazenar uma grande quantidade de água e de energia é necessário que haja diferenças significativas na altura dos reservatórios, para que seja possível existir variações significativas do nível da água [12].

Na Figura 2.1 é possível visualizar a representação esquemática de um sistema de armazenamento por bombagem.

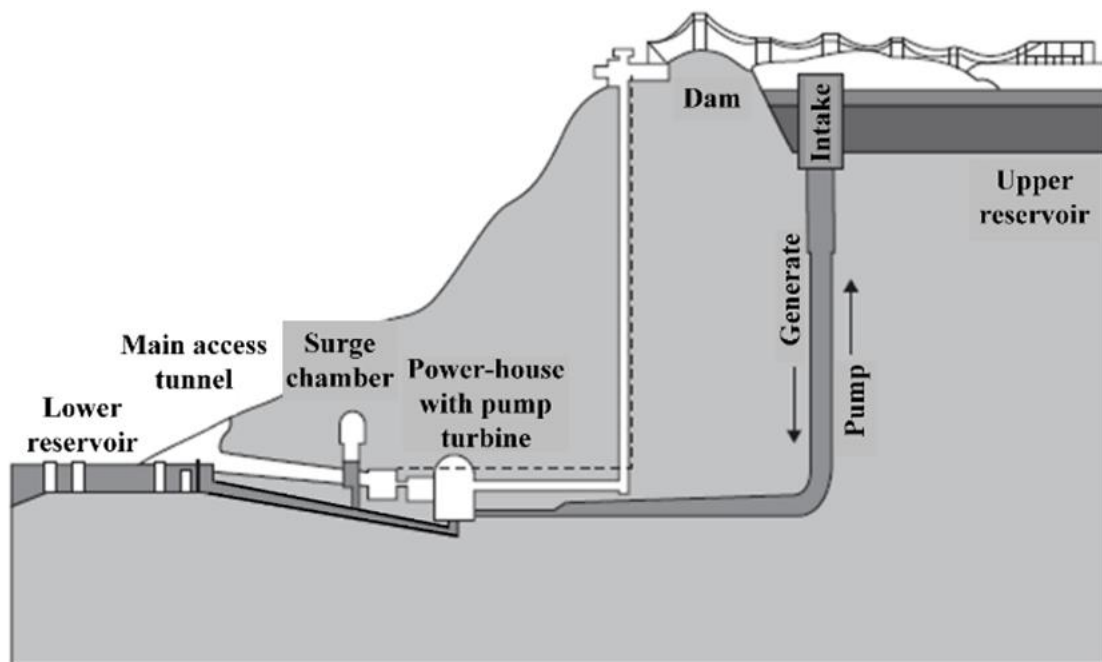


Figura 2.1- Sistema de armazenamento PHS [8].

O PHS apresenta-se como uma solução madura e altamente eficiente no que toca a armazenamento de energia em escalas mais elevadas. Tal como acontece com todos os sistemas de armazenamento de energia, o PHS não está isento de vantagens e limitações. Como principais desvantagens, este sistema apresenta o facto da capacidade instalada dos PHS se encontrar condicionada por diversos fatores físicos, nomeadamente o desnível entre os reservatórios e o volume de água que efetivamente se encontra disponível para o armazenamento, sendo que ambos dependem diretamente da morfologia do local de implementação. Adicionalmente, o elevado custo inicial de investimento e os longos prazos de construção constituem

limitações significativas. Acresce que a seleção do local de implementação é igualmente influenciada pela conceção do sistema, visto quem habitualmente, os reservatórios utilizados são os próprios reservatórios já existentes nas barragens.

Em contrapartida, este sistema apresenta uma elevada fiabilidade e uma vida útil substancialmente longa.

Para além disso, possui uma taxa de autodescarga muito reduzida, o que implica apenas uma perda gradual e limitada de energia armazenada. O sistema permite ainda o armazenamento de grandes quantidades de energia durante períodos prolongados.

Embora envolva um investimento inicial elevado, distingue-se por apresentar custos operacionais e custos de manutenção reduzidos. Adicionalmente, trata-se de um sistema com uma eficiência elevada.

O impacto ambiental associado à implementação de sistemas PHS constitui um entrave relevante. A infraestrutura necessária provoca perturbações na paisagem envolvente e altera o regime hidrológico natural. Isto significa que que, em vez de a água percorrer livremente o leito do rio, passa a ser retida ou desviada para um tanque ou reservatório.

Como consequência, ocorre uma alteração do volume, da velocidade e de outros parâmetros do fluxo original. Estas modificações podem, por sua vez, gerar impactos significativos nos ecossistemas locais.

A título de curiosidade, a energia hídrica proveniente da bombagem corresponde a cerca de 99% da capacidade de armazenamento de energia que está instalada a um nível global, isto é 98% da capacidade mundial de armazenamento elétrico (em termos de energia armazenável) é fornecida pelos sistemas PHS, o que pode ser comprovado pela Figura 2.2. [13].

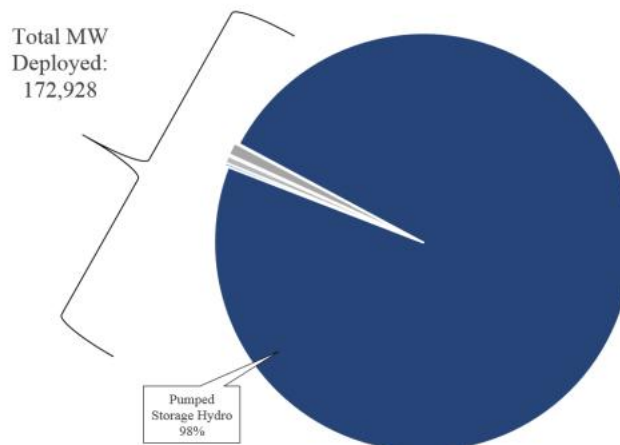


Figura 2.2 – Distribuição da potência instalada em sistemas de armazenamento a nível mundial, destacando a predominância do PHS [14].

### **2.2.2 Armazenamento de energia por volante de inércia**

Neste tipo de armazenamento, a energia será armazenada sob a forma de energia mecânica. Este sistema utiliza a energia rotacional de um cilindro maciço rotativo para conseguir armazenar energia, que é armazenada sob a forma de energia cinética.

De forma sucinta, a energia cinética pode ser descrita como a energia do movimento.

O sistema de armazenamento de energia por volante de inércia (FES), apresenta uma grande eficiência energética, uma elevada gama de potência, que pode ir de kW até GW e para além do mais apresenta uma capacidade de armazenamento até 500MJ [15].

Este tipo de sistemas de armazenamento de energia elétrica têm as suas aplicações mais voltadas para situações onde a energia não pode falhar e onde é importante garantir uma energia estável, sem oscilação.

Um dos principais componentes deste sistema é o volante de inércia. Esse volante consegue gerir os constantes distúrbios elétricos que ocorrem quando se fala de melhoria de qualidade de energia. Este sistema apresenta a qualidade de ter um ciclo de vida largamente grande e uma vida útil bastante elevada sendo mais de 20 anos, apresentam baixos impactos ambientais, uma resposta rápida e elevadas taxas de carga e descarga. Apesar destes sistemas apresentarem uma vida útil bastante elevada, o custo de manutenção deste sistema é bastante reduzido. A longa vida útil que os sistemas FES apresentam, resulta do facto de o volante de inércia armazenar energia mecanicamente, evitando processos eletroquímicos que degradam os materiais. Desse modo, mesmo com cargas e descargas rápidas, o desgaste é mínimo, permitindo um número muito elevado de ciclos

O ciclo de vida do sistema é elevado, o que significa que um ciclo completo de carga-descarga pode ultrapassar centenas de milhares de repetições.

A vantagem é que, mesmo com este elevado número de ciclos, o desempenho do sistema não sofre qualquer deterioração.

Um dos grandes pontos positivos deste sistema é o facto do próprio ser amigo do ambiente, uma vez que não ocorre nenhuma emissão para o ambiente, uma vez que os materiais que são utilizados durante todo o seu processo não são nocivos nem tóxicos [15].

Os cinco componentes principais de um sistema de armazenamento FES são um volante de inércia, rolamentos magnéticos, um motor ou gerador elétrico, uma unidade de condicionamento de potência e uma câmara de vácuo [16].

Neste sistema ocorre o modo de carga e o modo de descarga.

No modo de carga, a máquina elétrica reversível integrada vai funcionar como um motor e extrair a energia que está contida na rede para conseguir fazer com que o sistema de volante gire a altas velocidades e armazene a energia cinética criada através desta rotação.

Já no modo de descarga, na vez de a máquina reversível atuar como um motor, irá atuar como um gerador, uma vez que o rotor vai abrandar e com a máquina atuando como gerador, esta vai transformar em energia elétrica a energia cinética que estava contida no volante de inércia [16].

Como este sistema é um sistema onde as velocidades rotacionais são cruciais para o funcionamento do mesmo, pode-se classificar um sistema FES em dois grupos, o sistema FES de baixa velocidade e o sistema FES de alta velocidade.

No sistema FES de baixa velocidade, o volante é constituído por aço e roda sempre a velocidades inferiores a 6000rpm. Já no sistema FES de altas velocidades, o volante já não é constituído por aço, mas sim por materiais compósitos avançados e este já roda até 100000 rpm [16].

Na Figura 2.3 é possível visualizar de uma forma abrangente a constituição de um sistema de armazenamento FES.

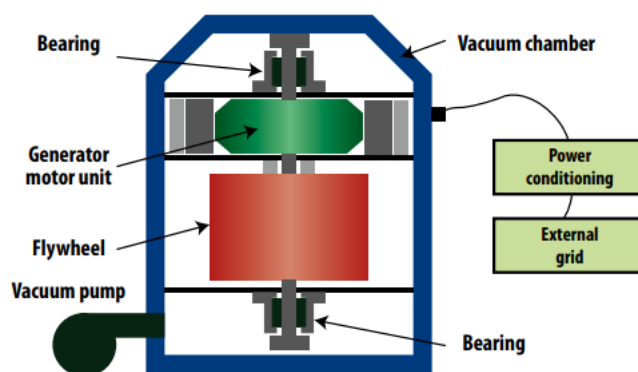


Figura 2.3- Esquema geral de um Sistema FES [17].

Um sistema FES distingue-se pela sua longa vida útil. Alguns volantes de inércia conseguem suportar mais de 100000 ciclos completos de carga e de descarga, o que constitui uma vantagem significativa. Outro aspeto positivo é a reduzida necessidade de manutenção deste tipo de sistemas.

Este sistema que é avançado destaca-se pela velocidade de resposta, permitindo transferir rapidamente grandes quantidades de energia em poucos segundos, atingindo picos de potência elevados.

A eficiência operacional é elevada, normalmente entre 90% e 95%, sendo especialmente eficaz em sistemas de armazenamento de curta duração.

Da mesma forma que este sistema apresenta vantagens, o mesmo também apresenta diversas desvantagens, sendo que uma das vantagens que este sistema apresenta está no facto de ter uma baixa densidade energética, que pode ir desde os 5 Wh/kg até aos 30 Wh/kg e uma perda de potência bastante elevada, esta perda de potência é derivada à elevada capacidade de autodescarga que estes sistemas apresentam [18,19,20,21].

Ao contrário de outros tipos de sistemas, os FES não conseguem fornecer energia de forma contínua. Um dos grandes benefícios deste sistema prende-se com o custo

operacional relativamente baixo. No entanto, o custo inicial de instalação de um sistema FES é elevado, dado que se trata de um sistema complexo.

Uma das maiores desvantagens está relacionada com o tamanho do volante de inércia, que tende a ser maior, especialmente quando existe a necessidade de armazenar grandes quantidades de energia.

Atualmente, quando se planeia montar um sistema FES, é possível escolher o material do qual o volante de alta velocidade é fabricado, sendo que as opções são um volante de compósitos de carbono ou um volante sólido. É de salientar que quanto mais leve for o aro, maior será a velocidade de rotação, e como foi explicado anteriormente, o princípio fundamental da produção de energia deste sistema está diretamente relacionado com a rotação do volante de inércia, logo quanto maior for a velocidade de rotação do volante, maior será a quantidade de energia armazenada, sendo que é de maior interesse escolher matérias compósitos, que são os mais leves e vão conferir uma velocidade maior. [18,19,20,21]

Segundo as aplicações da atualidade, os volantes de alta potência estão mais voltados para sistemas UPS e para aplicações aeroespaciais. [18,21]

### **2.2.3 Sistema de armazenamento de energia de ar comprimido**

Como já foi referido anteriormente, um dos principais motivos que levou à necessidade de implementar sistemas de armazenamento de energia foi o acentuado desfasamento entre a produção e o consumo [11].

A primeira central de armazenamento de energia de ar comprimido (CAES) foi construída em 1978 em Huntorf, situada na Alemanha e possui uma capacidade de potência 290 MW e passados 13 anos, em 1991, foi construída uma outra central CAES, mas desta vez em McIntosh, nos Estados Unidos da América, sendo que esta central já possui menos potência que a primeira, possuindo cerca de 110 MW e é de salientar que ambas as centrais ainda se encontram em funcionamento [22].

Quando se pretendem utilizações de sistemas de energia a larga escala, apenas existem duas respostas possíveis, os sistemas CAES e os sistemas PHS, que foram anteriormente abordados.

Já foi possível entender que um sistema CAES possui uma grande capacidade de armazenamento de energia, a qual se situa, de forma típica entre 35 MWh e 300 MWh [8].

Na Figura 2.4 é possível observar um esquema de um sistema CAES.

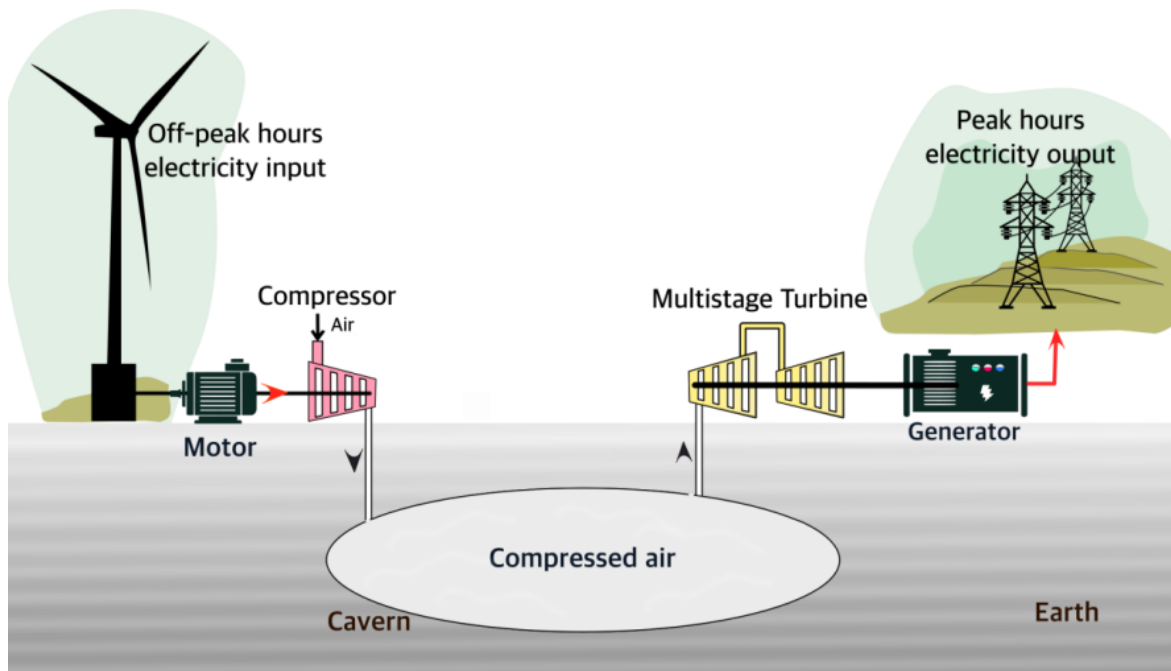


Figura 2.4 – Esquema de um sistema de armazenamento de ar comprimido [23].

O sistema CAES compreende dois subsistemas: um que corresponde ao reservatório de armazenamento e outro à zona de compressão/expansão. Este sistema divide-se em três processos: carregamento, armazenamento e descarregamento

Numa das possíveis formas de arbitragem energética, o sistema CAES recorre à eletricidade excedente produzida nas horas de vazio ou fora de ponta (carregamento). Esta eletricidade é utilizada para comprimir ar a alta pressão, o qual é armazenado num reservatório, sendo este processo determinante para o funcionamento do sistema (armazenamento). Uma vez atingida a hora de ponta e com o ar comprimido já armazenado, o expansor atua, promovendo assim a expansão do ar e possibilitando a recuperação de energia previamente armazenada (descarregamento) [8].

No ciclo de carregamento a energia elétrica excedente da rede é utilizada para ativar o motor, que converte essa energia em movimento mecânico e aciona o compressor multinível. O ar atmosférico, após ser comprimido, é guardado na cavidade subterrânea. Durante o ciclo de descarga, o ar previamente armazenado é libertado para movimentar as turbinas de pressão, cuja rotação transmite energia ao gerador, permitindo assim a produção de eletricidade necessária [23].

De forma a maximizar a qualidade no armazenamento de energia, o reservatório de armazenamento deve e costuma estar situado em locais herméticos, como caves ou grutas, ou então em recipientes artificiais ao nível do solo.

Como é possível visualizar na Figura 2.4, o sistema integra um motor acoplado a um compressor, sendo este responsável por utilizar a energia excedente disponível em períodos do vazio ou fora de ponta para comprimir o ar atmosférico. Após a compressão, o ar é armazenado no respetivo reservatório de armazenamento, o qual

opera tipicamente sob pressões elevadas, situando-se por norma entre os 4.0 e os 8.2 MPa [11].

Para assegurar a estanquidade e o correto funcionamento do sistema, os reservatórios de armazenamento devem operar dentro de um intervalo de pressão pré-definido, garantindo a estabilidade do ar comprimido e prevenindo variações que possam comprometer o desempenho ou a segurança do sistema.

Este intervalo de pressão é necessário dado que o ar comprimido, como fluido de trabalho, exerce tensões constantes sobre os reservatórios. Este intervalo de pressão consegue controlar as tensões induzidas pela variação da temperatura e da pressão de ar que vão ocorrendo ao longo do ciclo de trabalho, ou seja, é um intervalo de segurança para manter o equilíbrio. A temperatura e as características mecânicas do material irão influenciar a tensão que é aplicada no reservatório de armazenamento e ao aplicar um intervalo de pressão de 4 a 8.2 MPa (em muitas simulações até se escolhem intervalos de 5 a 8 MPa), é uma forma de manter o sistema estável, evitando que as pressões aplicadas criem fissuras ou ruturas na estrutura do reservatório de armazenamento [24].

Quando se atinge a hora de ponta, é através do auxílio das turbinas que o ar será expandido. É na expansão realizada pela turbina que a energia que estava armazenada sob a forma de ar comprimido será extraída e é através do gerador que a eletricidade será produzida. Após este processo, será utilizado um recuperador, que vai ser o responsável por capturar e reter o calor residual presente nos gases de escape antes que este seja libertado para a atmosfera [11].

Os sistemas CAES apresentam diversas vantagens aquando comparadas com outros sistemas de armazenamento de energia.

Os sistemas CAES caracterizam-se pela elevada fiabilidade, capacidade de reduzir picos e de deslocar carga, suporte à gestão de carga e uma vantagem significativa é o reduzido impacto ambiental que apresentam.

Como seria de esperar, nenhum sistema é 100% perfeito, e o CAES apresenta algumas limitações. Entre estas destacam-se a exigência geográfica de possuir uma cave ao nível do subsolo ou uma gruta, flutuações na eficiência e determinados riscos de segurança [25].

Uma limitação significativa dos sistemas CAES convencionais é o seu impacto ambiental relativamente elevado. Durante o processo de compressão do ar, é gerada uma quantidade significativa de calor. Nos sistemas CAES convencionais, esse calor é geralmente dissipado para atmosfera através de sistemas de arrefecimento, como radiadores. Posteriormente, durante a fase de expansão, é necessário aquecer o ar comprimido antes da sua passagem pela turbina, sendo esse aquecimento normalmente realizado através da combustão de combustíveis fósseis, o que resulta na emissão de dióxido de carbono.

Para superar estas desvantagens, foram desenvolvidos sistemas CAES adiabáticos, que dispensam a combustão ao integrar um sistema de armazenamento térmico.

Estudos realizados indicam que estes sistemas podem atingir eficiências próximas de 70%, apresentando um elevado potencial para aplicações de pequena e média escala.

O calor gerado durante a compressão é armazenado num recipiente adiabático e reutilizado durante a expansão do ar. Um processo adiabático caracteriza-se por não envolver troca de calor ou massa com o ambiente exterior, libertando energia apenas na forma de trabalho. Antes de ser introduzido no reservatório de ar, o fluido passa pelo sistema de armazenamento térmico, sendo aquecido para a fase seguinte do ciclo [8].

A Figura 2.5 apresenta a representação esquemática de um sistema CAES adiabático.

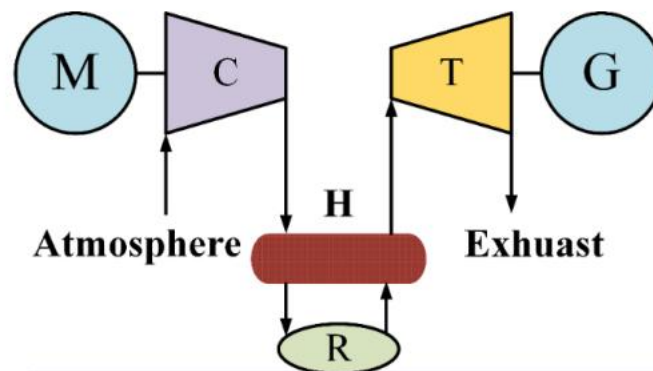


Figura 2.5 – Representação esquemática de um sistema CAES adiabático. M-Motor; C- Compressor; T-Turbina;G-Gerador;R-Reservatório/H- Tanque térmico [8].

### 2.2.3.1 Sistemas de armazenamento de ar líquido

O sistema de armazenamento de energia de ar líquido (LAES) acaba por se tornar numa adaptação do sistema CAES, uma vez que a principal diferença entre estes dois sistemas é o facto de que no sistema CAES o fluido de trabalho é o ar comprimido, e no sistema LAES o fluido de operação será o ar líquido [26].

Tal como o nome indica, neste sistema o ar será liquefeito. Semelhante ao CAES, o LAES envolve dois processos principais: o carregamento e a descarga.

Um dos principais objetivos de um sistema de armazenamento de energia consiste em aproveitar a energia produzida em excesso para alimentar os compressores no processo de carregamento. O ar comprimido é liquefeito com recurso à tecnologia de liquefação criogénica, atingindo temperaturas extremamente baixas, e é posteriormente armazenado num tanque de baixa temperatura (armazenamento).

Durante a hora de pico, quando se exige resposta energética, o ar liquefeito armazenado é bombeado através da bomba para a zona de evaporação/aquecimento. Neste processo, o ar absorve calor do reservatório quente (Hot Storage), aumentando assim a sua temperatura antes de entrar no expansor de

alta temperatura. O expensor irá converter a energia do ar em trabalho mecânico, acionando os motores para gerar eletricidade (descarregamento).

O processo de liquefação criogénica é o processo onde o ar será comprimido até que se torne um líquido.

Na Figura 2.6 é possível visualizar uma representação esquemática de um sistema de armazenamento LAES.

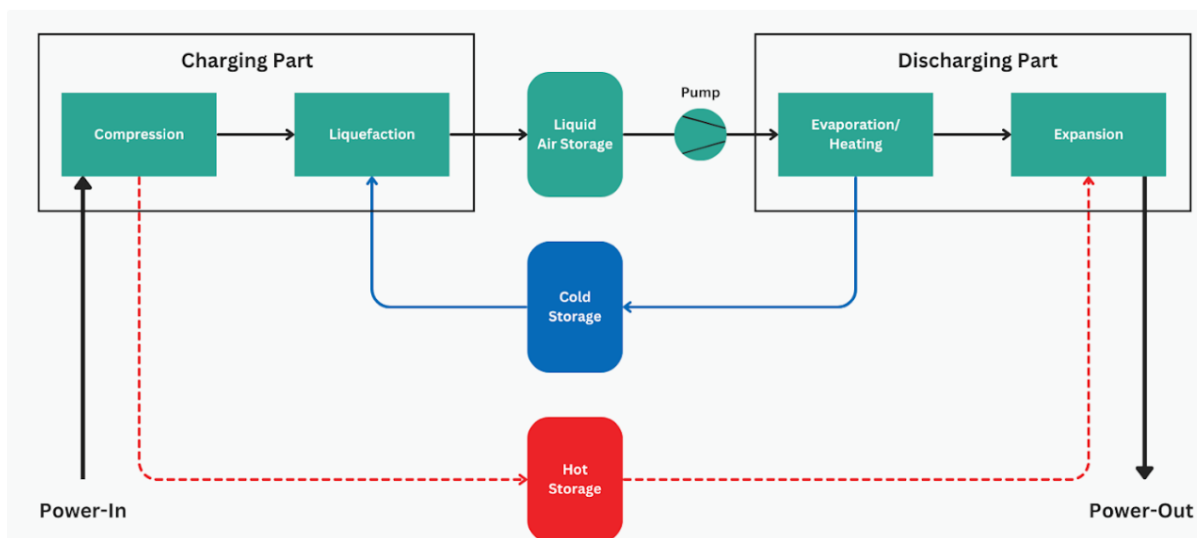


Figura 2.6 – Representação esquemática de um sistema de armazenamento LAES [27].

Este sistema apresenta diversas vantagens relativamente ao sistema de armazenamento CAES.

Uma das vantagens do sistema LAES refere-se à sua elevada densidade de armazenamento. Como o ar é liquefeito, a sua densidade torna-se significativamente superior à do ar simplesmente comprimido, o que permite ocupar menos espaço [7]. Outra vantagem bastante importante é a capacidade de armazenamento de energia durante longos períodos, o que contribui para mitigar o problema central de todos os sistemas de armazenamento de energia que são o desfasamento entre o fornecimento de energias renováveis e a sua utilização, dado que fontes como a eólica e a solar não apresentam um nível de produção constante.

O processo que envolve este sistema é considerado um processo amigo do ambiente, visto que de todo o processo não resulta uma única emissão de carbono para a atmosfera, o que a nível ambiental tem um peso significativamente elevado e consequentemente, direta ou indiretamente, apoia a que se terminem com todas as dependências dos combustíveis fósseis [27].

## 2.3 Armazenamento de energia térmica

Os sistemas de armazenamento de energia térmica (TES) são projetados de forma a ser possível armazenar energia térmica através de vários processos, sejam eles arrefecimento, aquecimento, condensação, entre outros.

Os materiais utilizados serão armazenados consoante a temperatura de utilização.

Os sistemas TES possuem uma gama de temperatura muito diversificada, dependendo da sua aplicação. No arrefecimento industrial, por exemplo, os sistemas são projetados para trabalhar com temperaturas abaixo de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Para o arrefecimento de edifícios, as temperaturas situam-se entre  $0$  e  $12^{\circ}\text{C}$ . No aquecimento de edifícios, os sistemas operam entre os  $25$  e  $50^{\circ}\text{C}$ , enquanto o armazenamento de calor a nível industrial envolve temperaturas significativamente mais elevadas, geralmente acima de  $175^{\circ}\text{C}$  [3].

Com a implementação dos sistemas TES, é possível que os sistemas energéticos e de armazenamento apresentem maior eficiência global e mais fiabilidade o que afeta de forma direta os níveis de poupança e reduções no investimento. Estes sistemas apresentam uma taxa de emissões nula [1].

O armazenamento de energia térmica tem a capacidade de armazenar energia térmica através de duas opções, sendo através do aquecimento ou através do arrefecimento. Este armazenamento de energia é conseguido aquecendo ou arrefecendo um certo espaço de armazenamento para que mais tarde essa energia possa ser usada para efetivamente aquecer ou arrefecer um espaço, ou em alguns casos mais específicos, é possível até que ocorra a geração de energia, produzindo eletricidade [10].

Através de diversos estudos chegou-se à conclusão de que na Europa se pode poupar cerca de 1,4 milhões de GWh/ano e 400 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2$  emitidas evitadas, através de uma melhor utilização de sistemas de armazenamento de calor e frio [10].

É possível classificar os sistemas TES através da sua temperatura de funcionamento.

Para aplicações que exigem temperaturas de funcionamento mais elevadas, é importante compreender que este tipo de sistema permite armazenar a água quente proveniente dos coletores solares [10].

Os dois métodos de armazenamento de energia térmica apresentados são os métodos mais comuns, porém ao se aprofundar o modo como o calor é armazenado nos sistemas TES, é possível verificar que existem 3 formas possíveis de classificação, sendo elas [28]:

- Calor sensível – quando se verificam líquidos e sólidos aquecidos
- Calor latente – em fusões e vapores
- Calor químico – quando o calor é armazenado sob a forma de compostos químicos

Através da Figura 2.7 é possível observar a diferente classificação dos sistemas TES consoante a forma como o calor é armazenado.

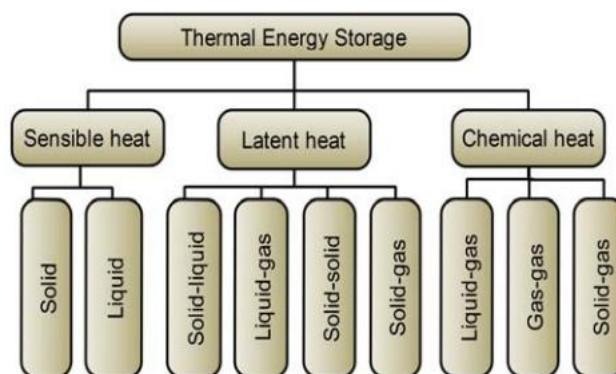


Figura 2.7- Formas de armazenamento de energia térmica [28].

O armazenamento por calor sensível deve-se à variação da temperatura do material, mas sem que ocorra mudança de fase, enquanto o armazenamento por calor latente apenas ocorre porque há uma alteração de fase, como por exemplo o material passar do estado sólido para o estado líquido [29].

A quantidade de energia térmica que pode ser armazenada depende do calor específico e da capacidade de aquecimento do material utilizado. No armazenamento de energia por calor latente, a quantidade de energia depende do material que sofre alterações de fase. Já no armazenamento por calor sensível, depende do material que fornece a energia ao ser aquecido ou arrefecido [16].

Os materiais de mudança de fase PCM, são materiais capazes de aprimorar os TES dada à sua grande capacidade de calor latente de fusão quando ocorre a mudança de fase. Tal como nos sistemas de armazenamento de energia, os PCM também possuem a fase de carregamento e a fase de descarregamento, que é identificada como fusão e solidificação, respetivamente.

### **2.3.1 Armazenamento de energia por calor sensível**

O sistema de armazenamento de energia por calor sensível (SHS) é considerado o sistema TES mais utilizado.

Os sistemas de armazenamento por calor sensível vão utilizar a energia que foi armazenada ou a energia que foi extraída de um sólido ou de um líquido através do seu aquecimento ou arrefecimento, e é de realçar que durante este processo o estado físico do sólido ou do líquido em questão não sofreu nenhuma alteração.

Os materiais que passam pelo processo de armazenamento de energia por calor sensível nunca sofrem uma alteração da sua fase, ou seja, a única reação que vai acontecer neste processo é uma variação de temperatura, mas sempre dentro da mesma fase, sem que ocorra alteração da mesma.

É de realçar que nos materiais sólidos, todos irão acabar por ser materiais porosos, e é através destes poros que a extração ou armazenamento do calor será feita [28].

Pela análise científica do processo, a equação (2.1), utilizada para o cálculo do armazenamento de calor sensível, pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m * cp * dT \quad (2.1)$$

Caracterizando a equação obtém-se que:

- T1 – é a temperatura inicial do material armazenado
- T2 – é a temperatura final do material armazenado
- m – é a massa total do material
- cp - é o calor específico do material em questão

Ou seja, deste modo é possível verificar que a quantidade de calor armazenado dependerá sempre de 3 fatores, que são o calor específico, a quantidade de material e a variação da temperatura que irá ocorrer no material armazenado [28].

O calor específico, cp, é utilizado em função da temperatura, e quando existem temperaturas elevadas pode calcular o calor sensível através da equação (2.1), porém quando o intervalo de temperatura, ou a diferença de temperatura não é consideravelmente elevado, a expressão pode ser escrita como se pode visualizar na equação (2.2) [28] :

$$Q = m * cp. avg * (T2 - T1) \quad (2.2)$$

Onde neste caso, o cp.avg será o valor média do calor específico entre as duas temperaturas T1 e T2.

Após a análise previamente feita, é possível verificar que para que exista um armazenamento de calor sensível eficaz, é necessário que o material de armazenamento de energia possua quatro características fulcrais, sendo elas:

1. Baixo custo
2. Estabilidade a longo prazo durante os ciclos
3. Alta capacidade calorífica específica
4. Boa compatibilidade com o material de contenção

A Figura 2.8 ilustra um exemplo de um sistema SHS típico, permitindo compreender o seu modo de funcionamento.

O sistema capta a radiação solar através de coletores solares, transferindo o calor para um reservatório de hematite, onde a energia térmica é armazenada.

Durante a noite, essa energia é libertada para aquecimento de depósitos de água domésticos ou para produção de eletricidade, através da transformação da energia térmica em energia mecânica pelas turbinas, que são responsáveis por este processo. [30]

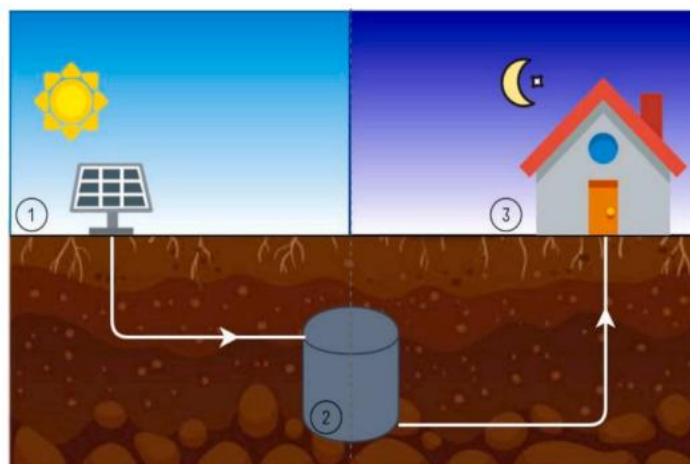


Figura 2.8 – Exemplo de um sistema SHS [30].

Em comparação com os sistemas de armazenamento por calor latente, os sistemas de armazenamento por calor sensível apresentam uma estrutura mais simples. Uma das principais vantagens destes sistemas é que o processo de carregamento e descarregamento do material é totalmente reversível, permitindo um número de ciclos de vida praticamente ilimitado. Contudo, apresentam algumas limitações, sendo que exigem volumes de armazenamento elevados, não permitem manter a energia a uma temperatura constante, requerem um investimento inicial significativo e possuem uma densidade energética relativamente reduzida, que pode ser influenciada pelo material selecionado [3,25,28].

O armazenamento de calor sensível pode ser classificado de acordo com o tipo de meio (material) utilizado. Nos meios líquidos destacam-se a água, os óleos térmicos, os sais fundidos, entre outros. Enquanto nos meios sólidos, incluem-se materiais como rochas, metais e outros sólidos adequados para a acumulação de energia [33].

### **2.3.1.1 Armazenamento em meios líquidos**

Os sistemas TES em meios líquidos constituem uma das soluções mais utilizadas para armazenamento de calor sensível, devido à ampla disponibilidade dos líquidos e à sua competitividade económica. Entre os diversos meios possíveis, a água destaca-se como uma das melhores opções para aplicações a baixas e médias temperaturas. Isto deve-se à sua elevada capacidade térmica específica (ou seja, possui um elevado calor específico), baixo custo e à sua disponibilidade generalizada.

No entanto, para operações a altas temperaturas, a água apresenta diversas limitações devido à sua elevada pressão de vapor, exigindo consequentemente tanques com

isolamento eficiente e contenção resistente. Os tanques de água podem ser construídos em materiais variados, como aço, alumínio, betão armado ou fibra de vidro, sendo frequentemente isolados com lã de vidro, lã mineral ou poliuretano, e apresentando volumes que variam desde algumas centenas de litros até vários milhares de metros cúbicos.

Além da água, as lagoas solares configuram um método simples e económico para a recolha e armazenamento de grandes quantidades de energia térmica a baixa temperatura, que tipicamente se encontra entre os 50°C e os 95°C. Para temperaturas mais elevadas, os óleos térmicos e os sais fundidos constituem os substitutos mais utilizados da água. Estes materiais apresentam capacidades térmicas específicas mais baixas, correspondendo a cerca de 35-40% da capacidade da água a nível de massa, no entanto, oferecem a vantagem de suportar temperaturas superiores a 300°C. Os óleos térmicos são geralmente limitados a 350°C, apenas por razões de estabilidade e de segurança, e apresentam custos mais elevados, enquanto os sais fundidos permitem operar em faixas térmicas mais amplas, sendo utilizados em aplicações industriais e em sistemas solares de grande escala [30,31].

Deste modo, conclui-se que o armazenamento em meios líquidos combina elevada flexibilidade, adaptabilidade a diferentes faixas de temperatura e viabilidade económica, constituindo um elemento fundamental na gestão eficiente de energia térmica em sistemas SHS.

### **2.3.1.2 Armazenamento em meios sólidos**

Os materiais sólidos, como rochas, betão, tijolos, areia ou metais, podem ser utilizados para o armazenamento de energia térmica tanto a baixas temperaturas, como a elevadas.

Neste tipo de casos, a energia térmica pode ser acumulada sem que ocorram fenómenos ebulição, visto que estes materiais permanecem estáveis ao longo da ampla gama de temperaturas.

Ao se armazenar a energia sob a forma de calor sensível em materiais sólidos, evitam-se as limitações associadas à elevada pressão de vapor de água e às restrições que são impostas por outro tipo de fluidos. Entre os meios sólidos mais comuns encontram-se os leitos de seixos ou conjuntos de rochas, que são amplamente utilizados devido ao seu reduzido custo.

Um leito de seixos ou de rochas consiste numa massa de partículas soltas através do qual circula o fluido de transporte de calor.

A acumulação de energia ocorre quando o ar aquecido é forçado a atravessar o leito, ficando a energia térmica armazenada na estrutura porosa. Posteriormente, essa energia pode ser recuperada através da recirculação de ar ambiente pelo leito previamente aquecido.

A Figura 2.9 apresenta o esquema de um leito de seixos.

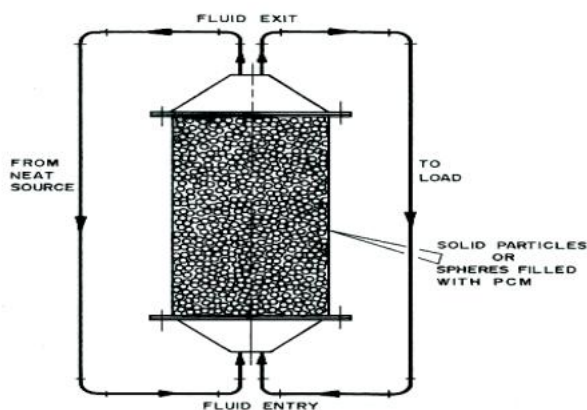


Figura 2.9 – Imagem ilustrativo de um leito de seixos ou de rochas [31].

A quantidade de energia armazenada num sistema de leito fixo depende de diversos parâmetros, entre os quais se destacam o tamanho e a forma das rochas, a porosidade do leito, assim como as propriedades termofísicas do fluido de transferência de calor e do próprio material sólido.

A energia solar pode ser armazenada em reservatórios isolados e constituídos por rochas ou seixos, sendo esta solução empregue com frequência em aplicações térmicas em edifícios. Este tipo de armazenamento é comum para temperaturas até cerca de 100°C, principalmente em conjunto com coletores solares de ar.

Normalmente, as dimensões características das rochas utilizadas situam-se entre 1 e 5 cm. Para uma variação de temperatura de 50°C, materiais como rochas e/ou betão conseguem armazenar até 36 kJ/kg. Os materiais mais sugeridos para o armazenamento de energia a temperaturas elevadas, na ordem de 120-1400°C, incluem os sais inorgânicos e diversos metais. [31]

Entre os metais, realçam-se o alumínio, o magnésio e o zinco. A utilização de metais como meio de armazenamento apresenta benefícios quando se pretende uma elevada condutividade térmica, sendo o custo um fator secundário na escolha do material, não se revelando muito importante [31].

Em suma, o armazenamento de energia térmica em sólidos, como rochas, betão, metais ou areia, permite uma acumulação eficiente a diferentes faixas de temperatura, evitando assim limitações de fluidos, sendo a condutividade térmica um fator determinante na escolha do material.

### **2.3.2 Armazenamento de energia por calor latente**

A principal diferença que existe do armazenamento de energia por calor latente para o armazenamento de energia por calor sensível é o facto de que o calor latente está intrinsecamente associado a mudanças de estado/fase. Estes sistemas são, de forma geral, mais viáveis uma vez que possuem uma alta capacidade de energia volumétrica acumulada [32].

Mas o que é que significa verdadeiramente o conceito de calor latente? Calor latente define-se como a quantidade de energia térmica que uma substância precisa de receber ou de perder para que seja possível que este altere o seu estado físico, no entanto a temperatura dessa mesma substância não se vai alterar durante este processo [33].

Um sistema de armazenamento de energia por calor latente, tal como o armazenamento por calor sensível, funciona de forma semelhante a uma bateria de calor. Este sistema inclui um reservatório com um material PCM, acoplado a um circuito de transferência de calor e, tal como todos os outros ESS, apresenta uma fase de carregamento e uma fase de descarregamento.

A primeira etapa corresponde à fase de carregamento, também denominada fase de carga, durante a qual o sistema recebe o calor proveniente dos equipamentos de aquecimento. O calor é totalmente absorvido pelo material PCM, que procede à mudança de fase. Durante esta transformação, o material recebe energia, que é armazenada, enquanto a sua temperatura permanece constante ao longo do tempo.

Já na segunda etapa, a fase de descarregamento ou de descarga, é a etapa em que se vai utilizar o calor que foi previamente armazenado pelo PCM, fazendo com que o material retorne ao seu estado inicial. A energia que foi armazenada pode ser aproveitada em diversas aplicações, desde sistemas de aquecimento até processos industriais [33].

Podem existir 3 tipos de PCM:

- Sólido-sólido
- Sólido-líquido
- Líquido-gás

Os materiais PCM possuem diversas composições, podendo ser inorgânicos, como os sais hidratados ou sais metálicos, podem também ser constituídos de forma orgânica, como é o exemplo dos ácidos orgânicos, ou ainda misturas de materiais orgânicos e inorgânicos, e podem apenas possuir um ponto de fusão bastante reduzido [8].

Para o exemplo de um material PCM do tipo sólido-líquido, é possível calcular a sua capacidade de calor total armazenado através da equação (2.3).

$$Ql = m[cps(Tm - Ts) + h + cpl(Tl - Tm)] \quad (2.3)$$

Onde o cps e o cpl correspondem ao calor específico do sólido e do líquido, h corresponde à entalpia de mudança de estado, ou seja, é a quantidade de calor necessária para mudar o estado físico de uma substância sem que ela altere a sua temperatura, o Tm corresponde à temperatura de fusão do material, o Ts a temperatura do material no estado sólido e o Tl a temperatura no estado líquido.

Os sistemas de armazenamento de energia por calor latente apresentam diversas vantagens comparativamente aos sistemas de calor sensível, sendo que o primeiro ponto positivo se deve ao facto de no sistema por calor latente ocorrer de forma isotérmica, também possuem um sistema mais eficiente que o sistema de armazenamento por calor sensível [8].

Os sistemas de armazenamento de energia por calor latente apresentam uma densidade de armazenamento elevada, uma vez que utilizam materiais PCM, que possuem uma grande capacidade de armazenar energia térmica por unidade de volume, em comparação com materiais convencionais, como rochas ou água.

Além disso, estes sistemas permitem estabilizar a temperatura, mantendo-a praticamente constante enquanto os materiais PCM absorvem ou libertam energia durante a mudança de fase. Outra vantagem traduz-se no aproveitamento eficiente da energia, uma vez que os PCM capturam o calor excedente e armazenam-no para utilização posterior, aumentando a eficiência energética e contribuindo para a redução do consumo global da energia.

Este tipo de sistemas de armazenamento tem aplicação sobretudo em sistemas de aquecimento e arrefecimento de edifícios. Durante o dia (na fase de carregamento), podem aproveitar a energia solar para aquecer os materiais PCM e, à noite (na fase de descarga), libertar o calor armazenado.

Possuem também aplicação industrial, pois permitem armazenar o calor residual proveniente de processos fabris, evitando o desperdício de energia.

Além disso, são utilizados em sistemas de energias renováveis, armazenando energia quando a oferta é elevada e libertando-a quando a oferta é reduzida. Desta forma, contribuem para reduzir o desfasamento entre a oferta e o consumo de energia, que motivou a criação destes sistemas [33].

A Figura 2.10 mostra a representação esquemática do modo de funcionamento de um sistema de armazenamento de calor latente.

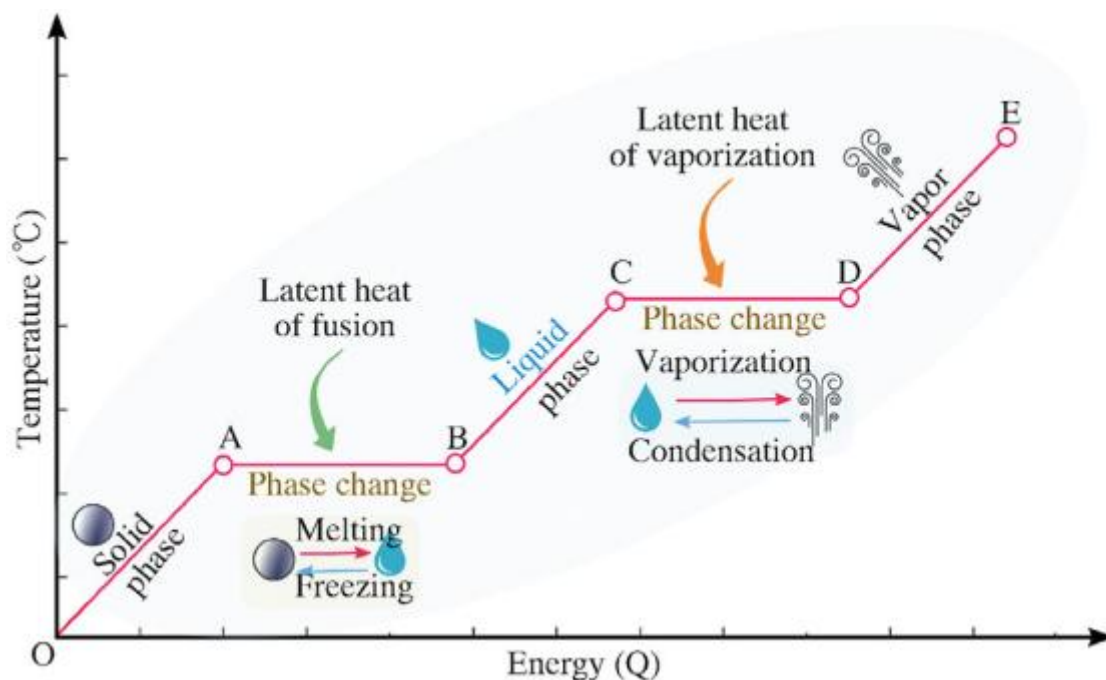


Figura 2.10 – Gráfico de transição de fase de um material de armazenamento quando lhe é adicionado ou removido calor [3].

Através do auxílio da Figura 2.10 é possível visualizar tudo o que foi explicado anteriormente.

Quando o material está no estado sólido (O) e se começa a adicionar calor, o material vai aquecer de uma forma gradual. A transição da zona O para a zona A é chamado de aquecimento sensível, e isso deve-se ao facto de a temperatura subir sem que o estado se altere.

Devido ao constante aquecimento a que o material está sujeito, este vai chegar a um certo limite, e dar-se-á a mudança do estado sólido para o estado líquido (A para B), o calor que estava a entrar no material será utilizado para provocar a mudança de fase (o chamado calor latente de fusão), uma vez que durante este estado (A e B), a temperatura vai permanecer praticamente constante.

Concluída a mudança do estado sólido para o estado líquido (aquecimento sensível do líquido), a entrada de mais calor fará com que o material que atualmente se encontra no estado líquido aumente, que é o que acontece de B para C.

Entre C e D acontece a transformação do estado líquido para o estado gasoso, e isso acontece devido à continuidade do aquecimento (calor latente de vaporização), que faz com o que o líquido evapore e é de realçar que neste caso a temperatura também permanecerá constante, tal como aconteceu entre A e B.

Uma vez atingido o estado gasoso a temperatura do material deixa de permanecer constante, passando o calor fornecido a provocar o aquecimento sensível do gás (D para E). [3]

### 2.3.3 Sistema de armazenamento de energia térmica bombeada

Os sistemas de armazenamento de energia térmica bombeada (PTES) são a vertente dentro dos sistemas TES que possuem a capacidade de armazenar a energia elétrica que foi criada em excesso e posteriormente voltam a produzir eletricidade.

O sistema PTES constitui um dispositivo de gestão de energia em escala de rede, que permite armazenar eletricidade sob a forma de potencial térmico entre meios quentes e frios.

A Figura 2.11 representa um esquema ilustrativo do funcionamento de um sistema PTES, o qual servirá como referência para a descrição detalhada do modo de operação.

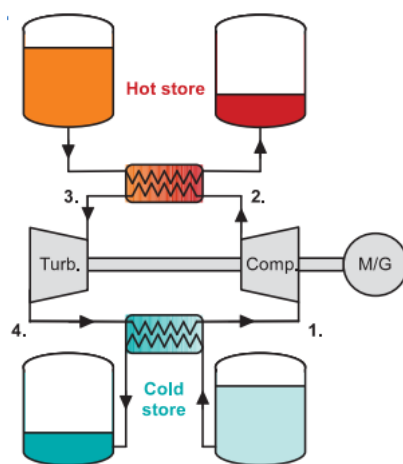


Figura 2.11 – Esquema geral de um sistema PTES. M/G-Motor-gerador; Turb-Turbina;Comp-Compressor [34].

O PTES consiste num sistema que capta a energia elétrica de baixo custo da rede e a converte em energia térmica, estabelecendo um gradiente de temperatura entre dois reservatórios distintos através de uma bomba de calor.

Posteriormente, este gradiente térmico é utilizado por um motor térmico para reconversão em eletricidade.

Durante a fase de carga, a energia elétrica proveniente da rede é utilizada para comprimir um fluido, elevando-o a estados onde a sua pressão e temperatura serão altas (de 1 para 2). O fluido que foi aquecido, transfere então, a sua energia para um meio de armazenamento térmico, tal como um leito de rochas compactadas ou sais fundidos (de 2 para 3). Em seguida, o fluido é expandido e vai sofrer um arrefecimento até que a sua pressão inicial seja atingida (de 3 para 4) antes de efetuar uma troca de calor com o reservatório frio (de 4 para 1).

A extração da energia armazenada ocorre na fase de descarga, invertendo-se o sentido do fluxo do fluido.

O fluido frio vai ser comprimido e receberá calor do reservatório quente, enquanto o fluido quente é expandido para gerar eletricidade, sendo posteriormente arrefecido no reservatório frio [34].

O PTES apresenta diversas vantagens em relação a outras tecnologias de armazenamento de energia elétrica. Entre estas destacam-se a ausência de restrições geográficas, a sua longa vida útil e a possibilidade de utilização de materiais mais baratos, abundantes e materiais que não são tóxicos como meios de armazenamento. Adicionalmente, este sistema é capaz de alcançar eficiências de ciclo completo elevadas, bastante próximas de 70%, bem como densidades de energia e potência competitivas, o que torna este sistema numa tecnologia de armazenamento viável e económica para aplicações em grande escala [34].

A título de curiosidade, se tanto a bomba de calor como o motor térmico operassem no limite da eficiência de Carnot, a eficiência de ciclo completo do sistema poderia atingir 100% em termos teóricos e ideais. Contudo, na prática, diversas irreversibilidades reduzem significativamente esta eficiência, nomeadamente perdas associadas à compressão e expansão do fluido, perdas de pressão ao longo do ciclo e diferenças de temperatura entre o ciclo energético e os meios de armazenamento. Como resultado, a eficiência de ciclo completo dos sistemas PTES situa-se tipicamente entre os 40 e 70% [34].

## **2.4 Breve comparação entre sistemas**

O presente subcapítulo realiza uma comparação centralizada na análise de várias tecnologias de armazenamento capazes de absorver excedentes de eletricidade e de os transformar esses excedentes novamente em eletricidade quando necessário.

Este enquadramento é fundamental, visto que o aumento da produção renovável intermitente, como é o caso da energia eólica e da energia solar, torna cada vez mais frequentes os períodos em que a produção de energia excede a procura. Neste tipo de casos, os sistemas de armazenamento permitem evitar desperdício energético, estabilizar a rede e disponibilizar eletricidade em momentos de maior necessidade.

Perante este contexto, será realizada uma análise comparativa dos principais sistemas de armazenamento abordados nesta dissertação, nomeadamente o armazenamento por bombagem (PHS), ar comprimido (CAES), volante de inércia (FES), energia térmica (TES) e, por fim, armazenamento por ar líquido (LAES).

Cada uma destas tecnologias apresenta características distintas em termos de eficiência, tempos de resposta, maturidade tecnológica, custos e adequação a diferentes escalas de aplicação, sendo que algumas são mais adequadas a sistemas de maior escala do que outras.

A Tabela 2.2., a Tabela 2.3 e a Tabela 2.4 apresentam os principais parâmetros técnicos relativos a cada tecnologia de armazenamento de energia. Estes dados

permitem realizar uma comparação detalhada, avaliando o desempenho, a eficiência dos ciclos e outras características relevantes que definem cada tecnologia.

A análise conjunta destes parâmetros possibilita uma compreensão mais profunda das vantagens, do potencial de aplicação e das limitações de cada sistema de armazenamento.

Ao enquadrar a comparação dentro desta lógica, a absorção de excedentes elétricos e a subsequente reconversão em eletricidade permite analisar de forma clara e consistente o papel de cada sistema na operação de uma rede elétrica. Desta forma, é possível compreender como cada sistema contribui para uma utilização mais eficiente da energia e para a integração mais eficaz de fontes renováveis.

Tabela 2.2 - Parâmetros energéticos e de potência das tecnologias de armazenamento de energia [34,35].

Tecnologia	Densidade de potência (W/L)	Densidade Energética (Wh/L)	Energia Específica (Wh/kg)	Capacidade de energia nominal (MWh)	Classificação de potência [MW]
PHS	0.5-1.5	0.5-2	0.5-1.5	180-8000	30-5000
CAES grande escala	0.5-2	2-6	30-60	580-2680	110-1000
FES	1000-5000	20-80	5-100	0.0052-5	0.25-20
TES	-	80-500	80-250	-	0.1-300
LAES	-	4 a 6 vezes maior que o CAES a 200 bar	210-220	2-3	0.3-200

Tabela 2.3.- Desempenho e durabilidade das tecnologias de armazenamento de energia [34,35].

Tecnologia	Autodescarga diária (%)	Vida útil (anos)	Número de ciclos de carga/descarga	Eficiência do ciclo (%)	Tempo de resposta
PHS	Muito baixa	40-60	10000-30000	70-87	Minutos
CAES grande escala	Muito baixa	20-40	8000-12000	42-54	Minutos
FES	>20% por hora	15-20	20000	90-95	Milissegundos

TES	>1	20-30	-	30-60	Minutos
LAES	Baixa	Mais de 25	-	55-80	Minutos

Tabela 2.4. – Custos, maturidade e tempo de operação das tecnologias de armazenamento de energia [34,35].

Tecnologia	Duração de armazenamento adequado	Tempo de descarga à potência nominal	Custo de capital por energia (\$/kWh)	Custo de capital por potência (\$/kW)	Maturidade
PHS	Horas-Meses; Prazo longo	1-24h	5-100	2000-4300	Maduro
CAES grande escala	Horas-Meses; Prazo longo	1-24h	2-120	400-1000	Desenvolvido
FES	Minutos-Segundos; Prazo Curto	8s-15min	1000-14000	250-350	Comercializado
TES	Minutos-Meses	1-24h	3-60	100-400	Fase inicial
LAES	Prazo longo	Várias horas	260-530	900-1900	Em desenvolvimento

Para que seja possível fazer uma análise comparativa a cada sistema, convém entender os parâmetros de cada um, e para que tal seja possível, deve-se compreender as tabelas e o propósito de cada parâmetro.

A análise será feita individualmente, tabela a tabela.

Simplificando a Tabela 2.2.[8]:

1. **Densidade de potência** – A densidade de potência caracteriza-se como a quantidade de energia que pode ser fornecida por unidade de volume do sistema.
2. **Densidade energética** – A densidade energética caracteriza-se como a quantidade de energia que um sistema pode armazenar sobre a unidade de volume do material responsável pelo armazenamento.

3. **Energia específica** – É a quantidade de energia que pode ser armazenada por unidade de massa, ou seja, de certa forma a energia específica mede a leveza do sistema em relação à energia de armazenamento.
4. **Capacidade de energia nominal** – Traduz-se como a quantidade total de energia que o sistema pode armazenar ou fornecer durante um ciclo completa da sua operação.
5. **Classificação de potência** – Classifica-se como a potência máxima contínua que o sistema consegue fornecer ou absorver durante o seu funcionamento.

A Tabela 2.3 já é referente a outros tipos de parâmetros, sendo eles [8]:

1. **Autodescarga diária (em %)** – Tal como o nome indica, a autodescarga diária em % corresponde à percentagem de energia que é perdida por dia devido às perdas internas do sistema, mesmo que este não esteja a fornecer energia.
2. **Vida útil (em anos)** – Corresponde ao tempo de vida esperado que o sistema possui antes que comece a perder a sua eficiência ou antes que necessite de ser substituído.
3. **Número de ciclos de carga/descarga** – Este parâmetro classifica-se como o número total de vezes que um sistema consegue ser carregado e descarregado ao longo de toda a sua vida.
4. **Eficiência do ciclo (em %)** – Define-se como a eficiência total que um ciclo completo possui, incluindo a carga completa, descarga completa e todas as perdas associadas.
5. **Tempo de resposta** – O tempo de resposta não é nada mais nada menos que o tempo que o sistema demora para que a energia seja fornecida após a receção de um sinal de ativação.

Por fim, descrevendo os parâmetros que estão a ser avaliados na Tabela 2.4 [8]:

1. **Duração de armazenamento** – A duração do armazenamento, tal como o nome indica, é o período em que o sistema consegue armazenar a energia de forma eficiente.
2. **Tempo de descarga à potência nominal** – Define-se como o tempo durante o qual o sistema consegue garantir o fornecimento de energia à potência nominal.
3. **Custo de capital por energia (\$/kWh)** – Já o custo de capital por energia é o custo de investimento inicial, relativo à quantidade de energia que o sistema consegue armazenar, ou seja, é o custo de armazenar 1kWh)

4. **Custo de capital por potência (\$/kW)** – Já o custo de capital por potência é o custo de investimento inicial, mas relativo à capacidade de potência do sistema, ou seja, é quanto custa instalar 1kW de potência.
5. **Maturidade** – A maturidade caracteriza-se como o estado de desenvolvimento da tecnologia em questão, podendo ir do experimental ao desenvolvido.

A observação detalhada destes parâmetros fornece informações fundamentais para uma melhor seleção da tecnologia de armazenamento de energia, de acordo com a aplicação pretendida. Para cada aplicação, existem parâmetros que permitem obter um sistema mais eficiente e organizado. As aplicações associadas aos ESS podem incluir suporte à rede elétrica, regulação de frequência, gestão de intermitência das fontes de energia renovável, gestão de carga, redução de picos de carga, entre outras aplicações.

Uma comparação entre os parâmetros de custos de capital, tanto de energia como de potência, e o nível de maturidade, são parâmetros importantes que permitem avaliar tanto a viabilidade técnica como a sustentabilidade económica e ambiental associada à implementação deste tipo de solução.

Atendendo às suas especificações o sistema FES apresenta-se como um grande candidato para aplicações como a regulação de frequência, uma vez que apresentam um tempo de resposta bastante reduzido, na ordem dos milissegundos, uma grande relação massa/potência e apresentam também uma vida útil [36].

O sistema PHS já é um sistema de armazenamento mais indicado para outro tipo de aplicação, este sistema já está mais direcionado para o armazenamento numa escala maior do excedente que advém de fontes de energia renováveis. Os fatores que tornam este sistema ideal para estas aplicações são diversos. A capacidade de potência do sistema situa-se numa gama de valores bastante elevada. O tempo de descarga à potência nominal permite que a energia seja armazenada durante horas ou até dias. Além disso, considerando a baixa taxa de autodescarga e a eficiência global do sistema, é possível manter a energia armazenada de forma consistente e eficiente [37].

Essas duas tecnologias de armazenamento de energia foram apenas dois exemplos práticos em como as análises destas tabelas e destes parâmetros de forma detalhada pode ajudar bastante na escolha mais eficiente, viável e sustentável de um ESS.

Ao fazer uma análise mais superficial e abrangente, percebe-se que os sistemas PHS e CAES são tecnologias consolidadas, adequadas para armazenamentos em grande escala, devido à sua elevada capacidade de energia nominal e à classificação de potência. No entanto, ambos apresentam limitações geográficas, sendo que o PHS exige desníveis específicos para a instalação dos tanques, enquanto o CAES depende de reservatórios de armazenamento, normalmente localizados no subsolo.

## *Sistemas de armazenamento de energia para integração eficiente de energias renováveis*

O sistema LAES mostra-se uma tecnologia promissora, visto que ainda se encontra em desenvolvimento e revela-se promissora devido à grande densidade energética, visto que é 4 a 6 vezes superior que o sistema CAES.

### **3 BATERIA DE CARNOT**

O controlo dos efeitos provocados pelas alterações climáticas constitui um dos principais desafios da atualidade. Apesar de se ter registado avanços significativos no setor da descarbonização de alguns setores, principalmente na geração de eletricidade, estes progressos ainda se revelam insuficientes. As áreas como a da indústria e dos transportes, acusam lacunas elevadas, uma vez que exigem investimentos consideráveis e políticas de suporte eficazes para que seja possível atingir os objetivos da neutralidade carbónica.

Adicionalmente, como já foi abordado ao longo desta dissertação, a substituição de tecnologias energéticas tradicionais, que dependem de combustíveis fósseis e de turbomáquinas, por soluções renováveis, como é o exemplo da energia eólica, tem-se demonstrado problemática, uma vez que surgem questões relativas à sua estabilidade e à sua fiabilidade da rede elétrica.

Para que seja possível executar esta transição, é necessário que se desenvolvam mecanismos capazes de fornecer energia de forma rápida e ajustável, assegurando simultaneamente serviços de auxiliares essenciais à operação da rede [38].

É muito importante resolver um dos principais problemas atuais no armazenamento de energia, que consiste no desfaseamento entre a produção e o consumo. Alguns sistemas produzem energia de forma contínua e constante, mas chega a um certo momento em que essa energia tem de ser armazenada até ser necessária. Isto acontece porque nem todos os sistemas fornecem energia exatamente quando ela é consumida.

Uma vez que diversas fontes de energia são intermitentes, nem sempre haverá um fornecimento constante de energia, e deste modo é importante que se produza energia e ao mesmo tempo seja possível armazená-la, para que esta depois seja disponibilizada para o consumo na forma de eletricidade. O grande problema é conseguir armazenar a energia por determinado período, uma vez que a distância entre a produção e consumo tanto pode ser reduzida como pode ser bastante elevada, e com um sistema de armazenamento eficiente, este problema tende a ficar resolvido [39].

É dentro contexto que as baterias de Carnot surgem como uma das soluções emergentes mais promissoras, sendo capazes de oferecer flexibilidade e capacidade de armazenamento de energia em consonância com os requisitos de um sistema altamente renovável [38].

As baterias de Carnot constituem um conjunto de tecnologias de armazenamento que ao longo dos últimos anos têm vindo a ganhar enorme fama, principalmente em aplicações de média e de longa duração.

Apesar deste conceito de converter eletricidade em calor, armazenar essa energia térmica (calor) e posteriormente reconverter essa energia em eletricidade, já ter sido

apresentado no século XIX, foi apenas relativamente há pouco tempo que esta tecnologia começou a evoluir de forma significativa. É de salientar que esta evolução se prende no aumento da produção renovável intermitente e à necessidade, que é cada vez mais elevada, de armazenar energia elétrica em grandes quantidades ao longo de várias horas ou até mesmo dias [40].

O interesse científico e industrial pela tecnologia da bateria de Carnot tem aumentado de forma expressiva. Embora o conceito de baterias de Carnot exista há várias décadas, o seu desenvolvimento tecnológico tem vindo a acelerar de forma significativa nos últimos anos, impulsionado pela necessidade crescente de armazenamento de média e de longa duração.

Esta evolução refletiu-se no aparecimento de diferentes soluções em vários níveis de maturidade tecnológica, que vão desde estudos conceptuais e simulações em ambiente académico até protótipos experimentais, instalações piloto e alguns sistemas já próximos de operação comercial.

### **3.1 Definição do ciclo de bateria de Carnot**

As baterias de Carnot têm-se vindo a revelar uma tecnologia de armazenamento de energia bastante inovadora e completa.

Porém, uma característica é factual, que é que este tipo de sistema é um sistema EES, ou seja, é um sistema de armazenamento de energia elétrica e desse modo deve sempre conter uma entrada e uma saída elétrica. Deste modo torna-se possível melhorar o seu desempenho adicionando entradas de energia térmica na fase de carga e/ou na fase de descarga e através destes aumentos é possível produzir energia elétrica e energia térmica útil [41].

Uma vez que as baterias de Carnot se fundamentam em bombas de calor e motores térmicos, é de realçar que a sua composição passa bastante por bombas, compressores, expansores, turbinas e permutadores de calor [41].

A Figura 3.1 representa o esquema teórico do que é uma bateria de Carnot.

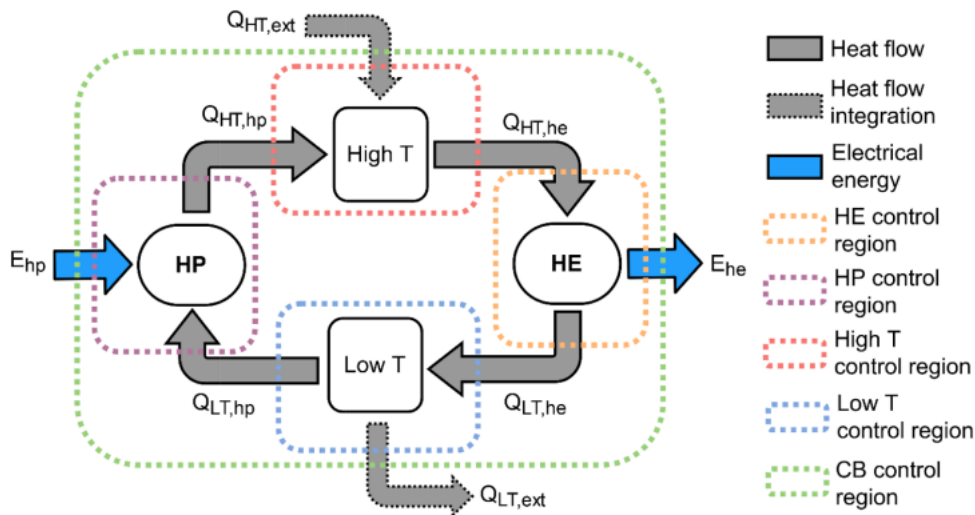


Figura 3.1 - Esquema de uma bateria de Carnot [12].

Tal como será explicado posteriormente, a bateria de Carnot desempenha duas funções essenciais: converte a eletricidade em calor e reconverte esse calor em eletricidade novamente, além de permitir o respetivo armazenamento.

Estas funcionalidades são possíveis graças ao ciclo termodinâmico que caracteriza este sistema, o qual constitui um elemento fundamental no seu funcionamento [42].

A bateria de Carnot, tal como o nome indica é baseada no ciclo termodinâmico de Carnot. A energia elétrica fornecida ao sistema é utilizada para criar uma diferença de temperatura entre dois reservatórios, sendo que um é de alta temperatura (HT) e o outro é de baixa temperatura (LT). Através deste gradiente térmico que foi gerado através das diferenças de temperaturas, é feito o carregamento do sistema de armazenamento e a energia elétrica é convertida em exergia térmica, que consiste em energia térmica que possui uma capacidade para realizar trabalho útil posteriormente. O processo de carregamento é realizado através de um ciclo termodinâmico, podendo também ser efetuado utilizando energia térmica, como é possível observar na Figura 3.1. Para forçar o fluxo de calor a se mover do reservatório frio para o reservatório quente é necessário que se consuma trabalho para que o carregamento da bateria térmica (armazenamento) seja efetuado. Quando se entra na fase de descarga, deixa-se que o fluxo de calor flua naturalmente do reservatório de alta temperatura para o reservatório de baixa temperatura, para que a energia possa ser recuperada, e é na fase da descarga que a exergia térmica que anteriormente foi armazenada é libertada. O calor que não é aproveitado ao longo do processo é rejeitado para o reservatório de baixa temperatura e desta forma é possível aproveitar uma certa parte da entrada elétrica [41].

Sendo que as baterias de Carnot são um sistema de armazenamento de energia elétrica, a sua eficiência será definida pela relação entre a energia elétrica que será produzida durante a fase de descarga e a energia elétrica que será consumida durante a fase de carregamento, ou seja, a sua eficiência (RTE) acaba por ser a relação entre

a energia elétrica que sai e a energia elétrica que entra, tal como se pode visualizar na equação (3.1) [40].

$$\eta_{RTE} = \frac{\textit{eletricidade produzida}}{\textit{eletricidade consumida}} \quad (3.1)$$

No entanto, a eficiência energética útil que o sistema apresenta pode ser definida por outra expressão, que se apresenta como a produção total de energia útil, porém é referente ao caso onde se acoplem várias áreas de consumo energético [40].

A eficiência energética útil transcreve-se pela equação (3.2).

$$\eta_{UE} = \frac{\textit{Eletricidade produzida} + \textit{Calor útil}}{\textit{Eeletricidade consumida}} \quad (3.2)$$

As baterias de Carnot possuem diversas aplicações no mercado atual e caracterizam-se por três características principais. Primeiramente, destacam-se pela capacidade de ajuste flexível, permitindo a integração eficiente de fontes renováveis, o combate aos picos de energia, o controlo remoto e a arbitragem da energia. Em segundo lugar, contribuem para reduzir o desperdício no aquecimento e no arrefecimento. E por fim, e em terceiro lugar, apresentam aplicações em diversos contextos, incluindo arrefecimento industrial, processos de aquecimento e utilização doméstica [43].

As baterias de Carnot apresentam-se como uma alternativa mais ecológica e sustentável aquando comparadas com as baterias elétricas convencionais e desempenham um papel fundamental, uma vez que possuem a capacidade de compensar as flutuações que existem na produção de energia renovável, e conseqüentemente vai permitir que exista uma maior utilização da eletricidade gerada pelas fontes [39].

A bateria de Carnot é uma tecnologia que permite armazenar energia elétrica a baixo custo, sem restrições geográficas [44].

As demonstrações realizadas ao longo do tempo abrangem uma ampla gama de potências, desde sistemas de pequenas escalas, da ordem dos quilowatts, até instalações com capacidades na faixa dos megawatts.

Este conjunto diversificado de experiências e validações contribuiu para consolidar as baterias de Carnot como uma tecnologia com elevado potencial, especialmente para aplicações que exigem armazenamento seguro, escalável e de longa duração [40].

As baterias de Carnot apresentam vantagens significativas, nomeadamente a possibilidade de cogeração simultânea de energia térmica e de energia elétrica no lado do consumo, assim como a capacidade de operar numa ampla gama de temperaturas. Estas características transformam as baterias de Carnot numa opção particularmente promissora para o armazenamento de energia [45].

O facto de a bateria de Carnot poder ser integrada em diferentes ciclos termodinâmicos constitui uma vantagem significativa. Ao combinar a tecnologia da bomba de calor com estes ciclos, é possível aumentar consideravelmente a eficiência do ciclo completo. Esta tecnologia é compatível com vários ciclos termodinâmicos, incluindo o ciclo de Brayton, o ciclo de Rankine convencional, o ciclo de Rankine transcrito e subcrítico e o ciclo de Rankine orgânico (ORC) [45].

### **3.2 Diferentes tecnologias de aplicação das baterias de Carnot**

As baterias de Carnot são um tópico interessante, uma vez que estas abrangem uma imensidão de conceitos de armazenamento termodinâmico.

Quando se fala de baterias de Carnot referente a sistemas de armazenamentos, pode-se estar a referir a sistemas de armazenamento de energia térmica bombeada, o conhecido PTES e a armazenamentos de energia em ar líquido, os LAES. Além destes, existem ainda sistemas como o Lamm-Honigmann Storage (LHS).

É possível classificar os sistemas PTES em dois ciclos, sendo o ciclo PTES de Rankine e o ciclo PTES Brayton.

Existem alguns exemplos de aplicações referentes ao ciclo PTES Rankine, que são os sistemas transcritos, os sistemas subcríticos ou até mesmo o aquecimento resistivo. Já relativamente aos exemplos referentes ao ciclo PTES Brayton, incluem-se as máquinas reversíveis, bem como o aquecimento resistivo [43].

As baterias de Carnot são uma tecnologia de armazenamento que de forma geral apresentam um rendimento bastante reduzido, porém quando se conjugam baterias de Carnot com bombas de calor o rendimento vai aumentar.

#### **3.2.1 Sistemas PTES de ciclo de Brayton**

O Brayton PTES opera segundo um ciclo de Brayton reversível.

O ciclo PTES-Brayton é um sistema que por norma apresenta na sua constituição uma bomba de calor e um motor térmico e é um sistema que opera segundo um ciclo de Brayton reversível entre um reservatório térmico quente e um reservatório térmico frio.

Como é possível visualizar na Figura 3.2, o ciclo vai funcionar em função das duas etapas que caracterizam um sistema de armazenamento, que são: a fase de carga, que irá operar em sentido horário e a fase de descarga, onde o ciclo vai operar no sentido inverso.

Uma vez que o sistema PTES-Brayton opera segundo um ciclo fechado, e para que seja possível manter um sistema cíclico é necessária a existência de um ou mais permutadores de calor, uma vez que estes permutadores são responsáveis por

permitir carregar e descarregar os reservatórios térmicos, bem como expulsar o calor que vai ser gerado pelo facto de existirem irreversibilidades [46].

Na Figura 3.2 é possível visualizar o esquema de montagem de um sistema PTES-Brayton.

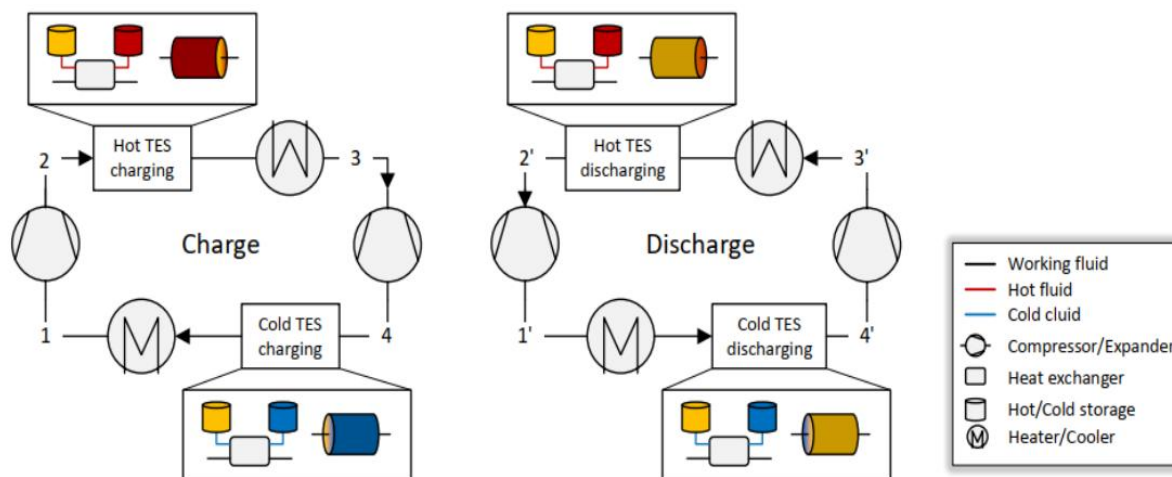


Figura 3.2 - Esquema de funcionamento do ciclo PTES-Brayton [46].

O princípio de funcionamento (com base na Figura 3.2) do modo de carga vai ser baseado na compressão de um fluido de trabalho, (1 para 2) que estará sempre no estado gasoso, para que seja possível que ocorra a transferência do calor gerado pela compressão do reservatório de baixa temperatura para o reservatório de alta temperatura, (2 para 3). Entretanto o gás vai sofrer uma expansão (de 3 para 4) onde consequentemente irá perder temperatura e consequentemente também perderá pressão, e esse acontecimento vai levar a que no ponto 4 esse mesmo gás tenha uma pressão de saída mais reduzida. É de realçar que neste modo a diferença de temperatura que irá existir entre os dois reservatórios é uma diferença de temperatura positiva.

A fase de carregamento dá-se quando o gás é comprimido, uma vez que durante essa operação o compressor utiliza mais energia que o expansor. Porém, na fase de descarga o trabalho que vai ser gerado pela turbina será maior do que toda a energia que o compressor irá utilizar [41].

Deste modo, a operação do sistema requer a existência de dois permutadores de calor principais, sendo estes responsáveis por assegurar a transferência de energia térmica entre o fluido e os dois reservatórios. Durante o modo de carregamento, o permutador que se encontra associado ao reservatório de alta temperatura vai receber o calor proveniente da compressão, enquanto o permutador ligado ao reservatório de baixa temperatura irá absorver o arrefecimento resultante da expansão do gás. No modo de descarregamento, as funções de ambos os permutadores serão invertidas, isto é, o calor armazenado no reservatório de alta temperatura é transferido para o fluido pressurizado, permitindo a sua expansão na

turbina, enquanto a energia armazenada no reservatório de baixa temperatura contribuirá para que o trabalho necessário na compressão seja reduzido. Deste modo, os dois permutadores permitem que o funcionamento reversível do ciclo seja assegurado, permitindo também o armazenamento e posterior recuperação de energia.

No modo de descarga, na vez de o calor ser transferido do fluido para o reservatório térmico, o que vai acontecer é que o reservatório térmico é que vai transferir calor para o fluido pressurizado (3' para 2'), que irá levar a uma expansão por parte da turbina (2' para 1'), no modo de descarga, a energia térmica fria que está armazenada, será utilizada (1' para 4') para auxiliar na compressão, reduzindo o trabalho de compressão (4' para 3) [43,46].

O sistema PTES-Brayton trabalha com uma larga gama de temperatura e de pressões, sendo que a temperatura pode variar de  $-170^{\circ}\text{C}$  até  $950^{\circ}\text{C}$ , enquanto a pressão se situa aproximadamente no intervalo de 1 a 20 bar [46].

Uma vez que o fluido de trabalho nos ciclos PTES-Brayton se encontra no estado gasoso, os dois tipos de gases monoatômicos mais utilizados neste tipo de sistemas são o Hélio e o Árgon.

No entanto, os dois gases monoatômicos não apresentam as mesmas propriedades.

Estes gases apresentam propriedades termodinâmicas favoráveis e, para uma razão de compressão fixa, estes gases apresentam temperaturas de processo mais elevadas que os outros gases. Quanto maior for a temperatura de funcionamento do sistema, maior será a eficiência energética global.

Comparando um sistema que opera com Hélio com outro que utiliza Árgon, verifica-se que o primeiro apresenta uma eficiência energética de 56,9%, enquanto o segundo alcança apenas o valor de 39,3%. Estas diferenças devem-se ao facto de o hélio apresentar menores perdas de pressão e maior estabilidade operacional [46].

De uma forma geral, o sistema PTES-Brayton típico possui na sua constituição um expansor e um compressor para a fase de carregamento e um compressor e um expansor para a fase de descarregamento [15], porém caso não seja possível recorrer a um compressor e um expansor em cada fase (carga e descarga), deve-se utilizar um compressor e uma turbina em ambas as fases devido ao facto de ambos conseguirem trabalhar de forma reversível [46].

O sistema PTES-Brayton apresenta variações de aplicação para aplicação, no entanto existem características e valores relativos ao próprio que o definem, tais como [41]:

- Relação de compressão/expansão - 4.5-4.7
- Eficiência – 60-70%
- Fluido de trabalho mais comum – Árgon
- Alta densidade energética – até  $200 \text{ kWhth/ m}^3$

- Baixos preços estimados de capacidade – 50-180 €/kWh

Ao aliar e analisar estas propriedades técnicas, entende-se que este sistema é um sistema que tende a ser economicamente viável [41].

A eficiência de um sistema PTES-Brayton é calculada a partir da eficiência politrópica dos compressores e das turbinas, sendo comum assumirem-se valores elevados, iguais ou superiores a 0.9. Como esta eficiência condiciona diretamente o desempenho global do sistema, máquinas com eficiência politrópica mais baixa conduzem inevitavelmente a uma eficiência global mais reduzida.

A bateria de Carnot só por si não apresenta valores relativos à eficiência muito elevados, no entanto, ao se aliar uma bateria de Carnot com uma bomba de calor (que opera segundo um ciclo Brayton), conseguem-se atingir eficiências mais elevadas, na ordem dos 60-70% [41].

Ao longo do tempo, foram realizadas diversas simulações para determinar a melhor configuração do PTES-Brayton, de modo que este atingisse o seu máximo potencial. Algumas destas simulações indicam que a eficiência global do sistema se situa na ordem dos 60%, tanto para tanques TES sensível como para sistemas de leito embalado. No entanto, esta percentagem de eficiência apenas se atinge quando as máquinas apresentam um desempenho politrópico de, pelo menos 0,9. O modo de funcionamento influencia diretamente a eficiência, isto é, se forem considerados valores de desempenho politrópico mais baixos, a eficiência global é reduzida para cerca de 30%. Assim, a eficiência do sistema depende fortemente do valor politrópico da máquina em questão [47].

Na Figura 3.3 pode-se observar o diagrama T-s ideal de funcionamento de um sistema PTES-Brayton no modo de carga e no modo de descarga.

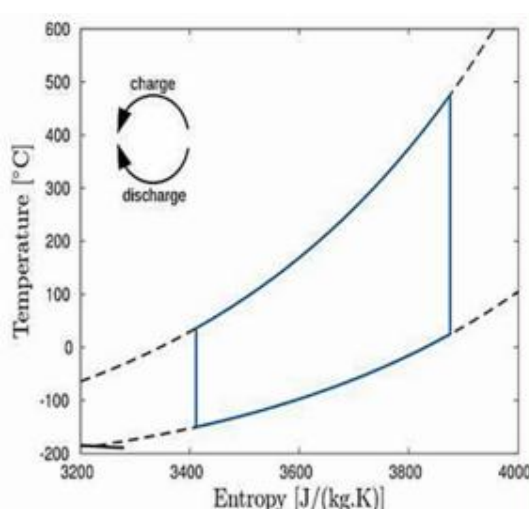


Figura 3.3 – Diagrama T-s de um sistema PTES-Brayton [48].

Na Figura 3.4, é ilustrado um diagrama T-s real de um ciclo de carga e descarga num sistema PTES-Brayton [48].

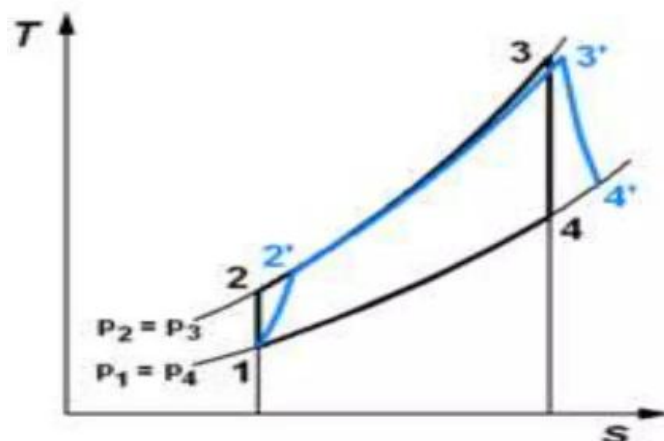


Figura 3.4 – Diagrama T-s de um ciclo real (azul) de carga e descarga de um sistema PTES-Brayton [48].

Ao contrário do ciclo ideal, observa-se que as curvas de compressão e expansão não são perfeitamente verticais nem adiabáticas, refletindo perdas irreversíveis devido a atrito, resistência ao fluxo e transferência de calor não ideal. Estas diferenças resultam numa redução da eficiência global do ciclo.

Tal como todos os sistemas de armazenamento apresentados anteriormente, o sistema PTES-Brayton apresenta diversas vantagens e desvantagens.

Os pontos fortes desta tecnologia incluem a elevada eficiência, independentemente da relação entre a gama de temperatura e pressão, a alta densidade de energia e potência, que tende a aumentar com uma maior razão de temperatura, bem como menores perdas por fricção nos fluidos e baixas emissões de gases poluentes.

Por outro lado, o sistema apresenta várias limitações. A eficiência global do sistema depende de forma significativa do desempenho das máquinas, sendo fortemente penalizada quando estas operam com eficiências reduzidas. Além disso, os elevados requisitos de temperatura dificultam a integração de fontes de calor de baixa qualidade. Por fim, o sistema envolve custos de investimento elevados e necessita de um aquecedor de ar de grandes dimensões [47].

Para atingir valores elevados de eficiência de ciclo completo, é necessário que o fluido de trabalho alcance temperaturas próximas de 1270 K. Contudo, o compressor utilizado no sistema PTES-Brayton, opera apenas a cerca de 900 K, tornando essencial a instalação de um aquecedor elétrico logo após o compressor. Este dispositivo converte energia elétrica em energia térmica, permitindo que a temperatura máxima do ciclo seja independente da razão de pressão do compressor.

Embora a introdução de um aquecedor de ar possa reduzir ligeiramente a eficiência de ciclo completo, estudos demonstram que o custo global do PTES pode diminuir, uma vez que a sua utilização possibilita a redução de área do permutador de calor e do tamanho do compressor.

Embora o aquecedor apresenta um custo significativo, a sua implementação contribui para a redução do custo global do sistema [47].

### 3.2.2 Sistema PTES do ciclo de Rankine

Nos sistemas PTES baseados no ciclo de Rankine, o processo de carregamento é geralmente realizado através de uma bomba de calor por compressão de vapor, enquanto a descarga de energia ocorre pelo ciclo de Rankine. Estes ciclos distinguem-se pela mudança de fase do fluido de trabalho, permitindo a retenção de calor sensível e latente. Uma das vantagens associadas aos PTES-Rankine consiste na capacidade de atingir altas densidades de energia e armazená-la a temperaturas relativamente baixas, normalmente inferiores a 200°C, quando comparado com os sistemas PTES-Brayton.

Em relação ao PTES-Brayton, esta configuração possibilita a utilização de armazenamento de calor latente com materiais PCM, reconhecidos pela sua elevada densidade energética, apresentando, em simultâneo, menores perdas térmicas.

Adicionalmente, os sistemas PTES-Rankine podem utilizar tanques de água pressurizada, uma solução de armazenamento económica, cuja operação é limitada a temperaturas inferiores a 140°C [49].

No entanto, devido ao facto de que a gama de temperaturas padrão utilizadas no sistema PTES-Rankine são relativamente reduzidas, na ordem dos 100 a 200°C, este sistema é frequentemente utilizado com técnicas de armazenamento de calor latente, ou então com técnicas de calor sensível, mas aplicada aos líquidos [47]

Na Figura 3.5 é possível observar um esquema que representa o modo de operação e a montagem de um sistema PTES-Rankine.

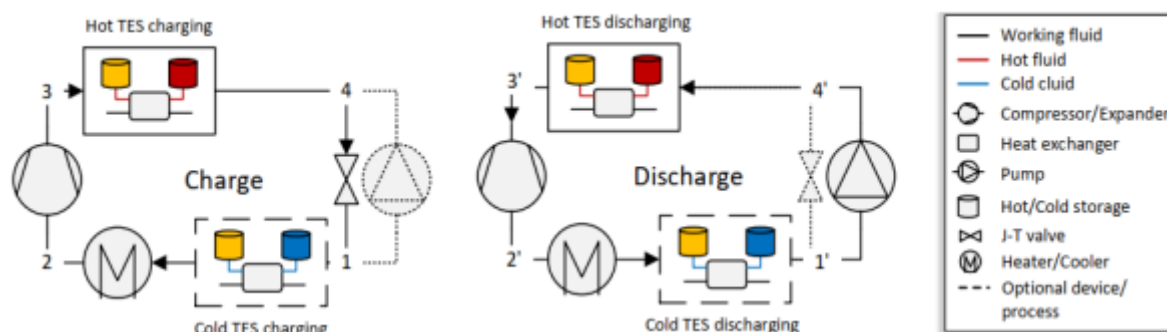


Figura 3.5-Esquema do ciclo PTES-Rankine [46].

Existem três configurações de sistemas PTS-Rankine mais comuns: o ciclo Rankine clássico, que utiliza água/vapor de água como fluido de trabalho; o ciclo Rankine Orgânico (ORC), que opera com líquidos orgânicos; e o ciclo de Rankine com CO<sub>2</sub>, que pode ser implementado nas variantes subcríticas e transcíticas.

É de extrema importância que os fluidos de trabalho presentes neste sistema correspondam aos perfis da temperatura presente no reservatório de exergia térmica [47].

### 3.2.2.1 PTES-Rankine clássico

Os sistemas PTES-Rankine convencionais, ou seja, baseados no ciclo Rankine a vapor apresentam uma configuração tecnológica exigente, mesmo podendo atingir valores de eficiências de ciclo completo próximos de 73%.

O fluido de trabalho que será utilizado nesta configuração do sistema PTES-Rankine é a água. Contudo, na fase de carregamento, a baixa pressão de saturação da água à temperatura ambiente impede o funcionamento eficiente da bomba de calor com compressão de estágio único.

Durante o processo de armazenamento, a unidade de armazenamento de calor latente será carregada através da condensação do vapor, enquanto o condensado é posteriormente arrefecido na unidade de armazenamento sensível.

Durante a fase de descarga, o calor que se encontra armazenado, é transferido para o fluido de trabalho. Visto que nesta configuração a água é utilizada como fluido de trabalho, dar-se-á a expansão húmida (a expansão vai ocorrer em condições húmidas), que conseqüentemente exige a adoção de sobreaquecimento. O processo de expansão será dividido em duas etapas, para que o desempenho do sistema sofra uma melhoria [49].

Na Figura 3.6 encontra-se representado o diagrama T-s correspondente a um sistema PTES-Rankine convencional.

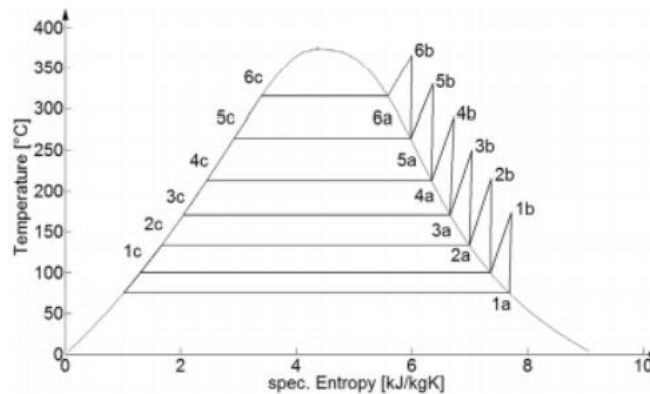


Figura 3.6 – Diagrama T-s para o ciclo de compressão de vapor num sistema PTES-Rankine convencional [49].

Na Figura 3.7 é apresentado um diagrama T-s da fase de descarga correspondente a um sistema PTES-Rankine convencional.

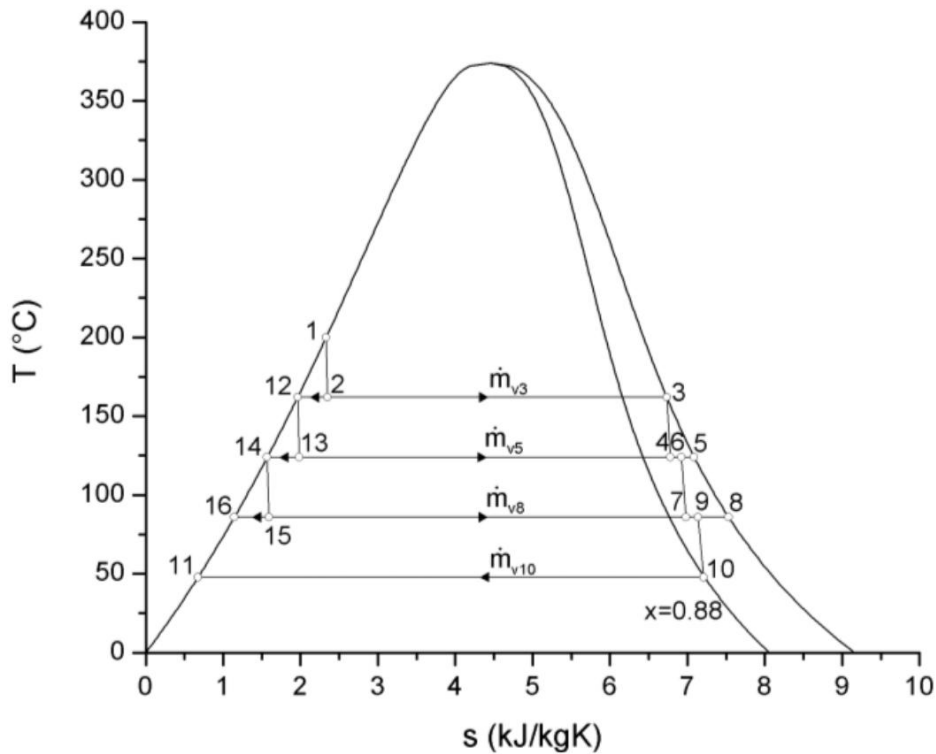


Figura 3.7 - Diagrama T-s para a fase de descarga [50].

Para ultrapassar a limitação da água à temperatura ambiente apresentar uma baixa pressão de saturação, é comum recorrer a compressão em múltiplos estágios associada a uma configuração de ciclo binário, onde a amónia ( $\text{NH}_3$ ) será utilizada como ciclo inferior com o objetivo de elevar a temperatura de evaporação da água até cerca de  $80^\circ\text{C}$ . Logo após esta etapa, a água será comprimida sucessivamente em vários estágios até que temperaturas mais elevadas sejam atingidas.

É de salientar que em cada estágio, o vapor que se encontra sobreaquecido é misturado com água na fase líquida antes de entrar no estágio de compressão seguinte, porém, mantendo sempre a pressão.

A utilização combinada de múltiplos estágios de compressão e expansão, associada a um ciclo binário, apresenta como principal desvantagem a necessidade de uma arquitetura altamente complexa, o que conseqüentemente se traduz em custos mais elevados, maiores riscos operacionais associados e uma maior necessidade de manutenção.

Por conseguinte, quando comparados com outras configurações de PTES mais simples, os sistemas PTES-Rankine convencionais são menos adequados [51].

Apenas como título de curiosidade, é representado na figura 3.8 o diagrama T-s para o ciclo de compressão da amónia num sistema PTES baseado no ciclo de Rankine convencional

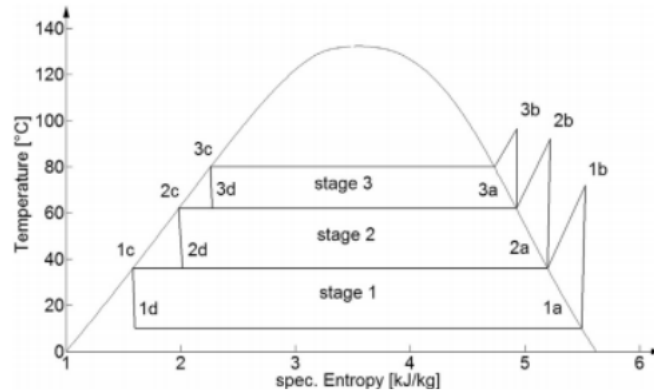


Figura 3.8 – Diagrama T-s para o ciclo de compressão da amónia num sistema PTES-Rankine convencional [49].

Ou seja, os estágios de compressão da amónia possuem o objetivo de elevar a temperatura da água até cerca de 80°C, para que o sistema PTES-Rankine convencional obtenha um funcionamento eficiente.

### 3.2.2.2 PTES-Rankine Orgânico

Nos sistemas PTES-Rankine orgânicos (ORC), os fluidos de trabalho são, como o nome indica, orgânicos. Os fluidos de trabalho vão permitir a operação sob pressão à temperatura ambiente e evitando assim a necessidade de equipamentos volumosos e dispendiosos.

A curva de saturação destes ciclos possui a capacidade de se ajustar de forma adequada às faixas de temperatura das fontes de calor que por norma se utilizam.

Na Figura 3.9 está representado o diagrama de princípio de um sistema PTES-Rankine ORC.

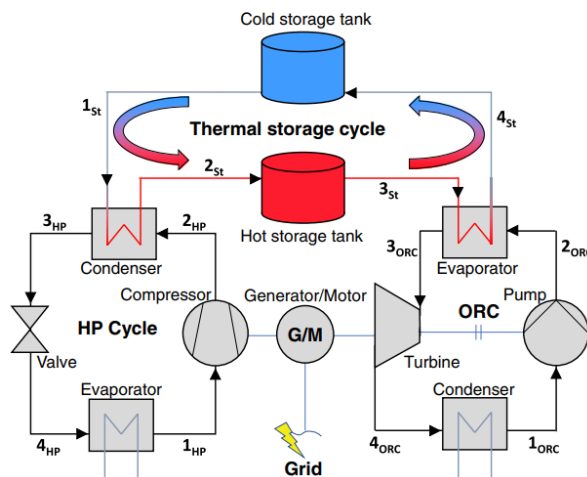


Figura 3.9 – Diagrama de princípio de um sistema PTES-Rankine ORC. M-Motor; ST-reservatório de armazenamento; HP-Bomba de calor; G – Gerador [52].

Em sistemas de armazenamento de energia elétrica baseados no ciclo PTES-Rankine ORC, a reconversão do calor acumulado em eletricidade é realizada por meio da interação coordenada de três subciclos interligados: o ciclo da bomba de calor, o ciclo de armazenamento térmico e o ciclo ORC. Durante períodos de elevada produção elétrica proveniente de fontes renováveis, a bomba de calor transforma eletricidade excedente em energia térmica, que é posteriormente armazenada no sistema de armazenamento térmico. Quando a produção elétrica diminui, o calor armazenado é reconvertido em eletricidade através do ciclo ORC.

O sistema de armazenamento térmico encontra-se conectado aos lados quentes da bomba de calor (condensador) e do ORC (evaporador), podendo ser complementado por um sistema de armazenamento frio ligado aos lados frios destes ciclos.

Durante a fase de carregamento, a energia térmica será armazenada em reservatórios de alta temperatura. Esse armazenamento será feito através da compressão do fluido de trabalho, por uma bomba de calor por compressão de vapor (VCHP).

No ciclo da bomba de calor, (ciclo de carregamento) o fluido de trabalho em fase de vapor tem a sua pressão aumentada derivada a um compressor que foi acionado por um motor elétrico. Após esta compressão, o fluido sobreaquecido é condensado, transferindo calor para o armazenamento térmico. O fluido líquido resultante é despressurizado através de uma válvula antes de ser novamente evaporado com utilização de calor proveniente do ambiente, completando dessa forma o ciclo da bomba de calor.

O ciclo de armazenamento térmico pode assumir diferentes configurações e utilizar diversos meios, como armazenamento de calor sensível ou latente.

Já na fase de descarga, o calor que anteriormente foi armazenado, será convertido em eletricidade pelo ciclo de rankine orgânico, aproveitando o calor presente no reservatório quente [47,52,53].

No ciclo ORC (ciclo de descarga), o fluido de trabalho líquido é inicialmente pressurizado por uma bomba antes de ser evaporado pelo calor proveniente do meio de armazenamento quente. O vapor que foi gerado, expande-se num expansor ou numa turbina, produzindo dessa forma energia mecânica que é convertida em eletricidade através de um gerador, sendo o fluido finalmente condensado utilizando o ambiente como sumidouro de calor.

A escolha do tipo de expansor ou turbina depende diretamente da potência elétrica do sistema. Para potências entre 1 e 10 kW, são normalmente utilizados expansores volumétricos do tipo scroll ou do tipo pistão. Para potências até 30 kW, são utilizados expansores roots. Para potências que alcancem o valor de 200 kW, são utilizados expansores de parafuso (screw). No entanto, entre 50 e 500 kW, a utilização de expansores deixa de ser recomendada e é nesta gama que se começam a utilizar turbinas de fluxo radial, enquanto para valores superiores a 500 kW, é preferível que se utilizem turbinas axiais [47,52,53].

É de extrema importância assegurar a compatibilidade entre o equipamento que foi escolhido e o fluido de trabalho, assim como a razão de compressão do ciclo, para que seja possível assegurar um desempenho adequado do sistema.

Em termos gerais, sistemas com potência elétrica reduzida correspondem a escalas mais pequenas, pelo que expansores volumétricos do tipo scroll ou pistão são preferencialmente utilizados, enquanto turbinas axiais se tornam mais adequadas em sistemas de maior escala e potência [47,52,53].

Na Figura 3.9 é possível visualizar um esquema sistemático de um PTES-Rankine Orgânico, onde se integram a fase de carregamento, o armazenamento e a fase de descarga.

Já na Figura 3.10 encontra-se um diagrama T-s de um sistema PTES-Rankine orgânico.

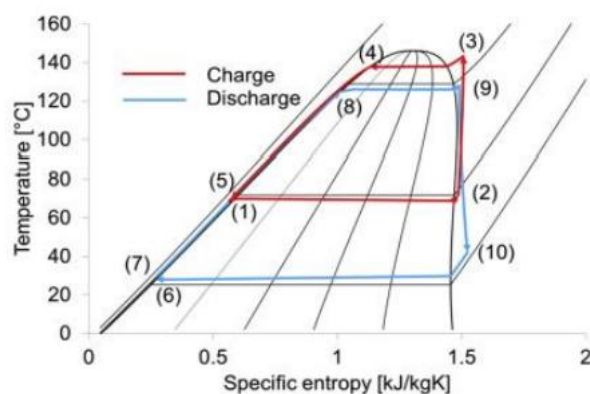


Figura 3.10- Diagrama T-s de um sistema Rankine Orgânico [49].

A integração térmica dos sistemas ORC, permite alcançar um desempenho bastante superior. Este efeito é particularmente evidente quando combinada com sumidouros de calor a baixa temperatura - ou reservatórios capazes de absorver o calor rejeitado pelo ciclo sem alterar significativamente a sua própria temperatura – e quando existem diferenças de temperatura adequadas entre a fonte quente e o sumidouro.

A integração de permutadores adicionais para recuperação de calor interno é uma estratégia e uma solução que permite aumentar a eficiência do ciclo ORC, apesar de que estas adições de componentes indicam conseqüentemente aumento nos custos de investimento [52,54,55].

Neste contexto, as eficiências de ciclo completo podem ser significativamente elevadas.

Sem uma integração térmica adequada, os ciclos orgânicos apresentam eficiências com valores relativamente baixos, sendo valores de ciclo completo frequentemente abaixo dos 50%.

Embora as configurações clássicas continuem a ser mais estudadas, vão surgindo algumas variantes em que o fluido que sai do condensador é subarrefecido pelo

fluido proveniente do evaporador no ciclo VCHP, e durante a fase de descarga, o fluido que sai da bomba de alimentação será pré-aquecido, pelo fluido que sai do expansor. Este género de regeneração interna tende a melhorar o desempenho do ciclo sem implicar aumentos de custos excessivos e é cada vez mais utilizado [49].

A Figura 3.11 apresenta o diagrama T-s (temperatura-entropia) de um sistema ORC regenerativo, ilustrando o princípio do processo de regeneração [54]

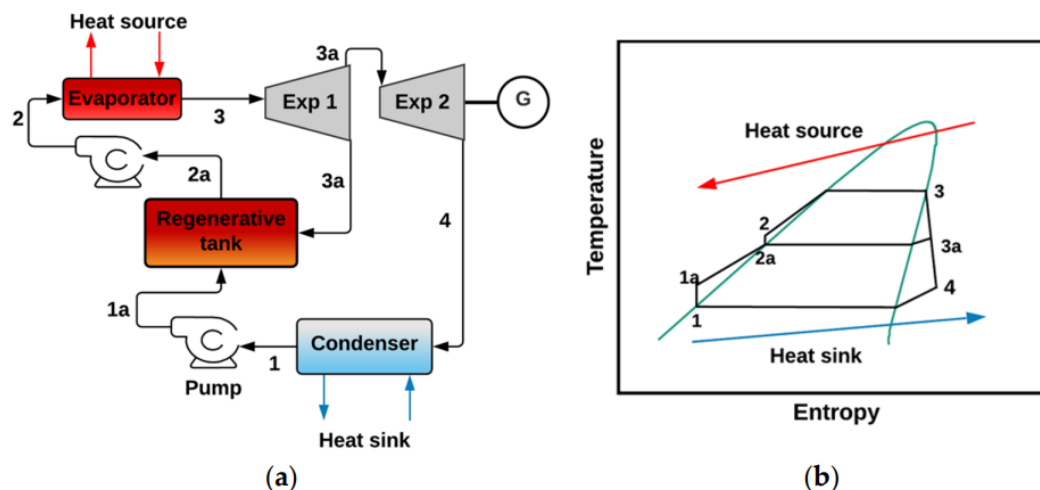


Figura 3.11 – Diagrama do ciclo ORC regenerativo: (a) Diagrama de princípio dos processos de regeneração; (b) Diagrama T-s [54].

O sistema PTES-Rankine ORC constitui uma tecnologia promissora para a recuperação de energia térmica de baixo grau, sendo amplamente utilizado em sistemas de armazenamento de energia térmica devido à sua elevada eficiência.

Entre as vantagens deste sistema, destacam-se a capacidade de reconverter parte do calor residual em eletricidade, a operação com fluidos de trabalho ecologicamente mais sustentáveis e a melhoria do desempenho energético global do sistema PTES.

No entanto, o sistema PTES-Rankine ORC apresenta diversas limitações, como é o caso da ocorrência de perdas energéticas significativas devido ao desajuste entre as temperaturas do fluido de trabalho e do meio de transferência de calor, as irreversibilidades nos processos de compressão e expansão, e a necessidade de integração de permutadores de calor, que conseqüentemente aumentam a complexidade e o custo do sistema [49].

### 3.2.2.3 PTES-Rankine subcríticos e transcritos

Os sistemas PTES-Rankine subcríticos utilizam expansores de motor térmico e compressores de bomba de calor, que geralmente se encontram separados.

Para os fluidos de trabalho, são utilizados tanto fluidos não-orgânicos, como a água e a amônia, quanto fluidos orgânicos, sendo que a escolha do fluido dependerá do tipo de armazenamento e da escala do sistema.

Os fluidos de trabalho não-orgânicos, uma vez que apresentam diferenças de entalpia mais elevadas, são mais adequados para sistemas de maior escala, embora exijam diversas etapas de compressão para alcançar o trabalho específico necessário.

Por outro lado, os fluidos orgânicos, tendem a apresentar uma eficiência ligeiramente inferior, no entanto permitem layouts mais simples, necessitando de menos etapas de compressão durante o carregamento, sendo que uma única etapa pode ser suficiente na fase de descarga.

No que respeita o armazenamento térmico, os sistemas subcríticos podem recorrer a armazenamento de calor latente ou de calor sensível líquido. Entre os líquidos mais utilizados destacam-se a água pressurizada e o óleo térmico, muitas vezes organizados em sistemas de dois tanques para evitar a mistura de fluidos e aumentar a eficiência, embora esse arranjo implique custos superiores.

Nos sistemas subcríticos, o armazenamento de calor latente assegura que os perfis de temperatura de condensação e evaporação sejam ajustados durante as fases de carregamento e de descarga, podendo também utilizar sais de nitrato para este efeito.

Embora os sistemas subcríticos tendam a apresentar uma eficiência global inferior aos sistemas transcíticos, o seu layout é mais simples, mais direto e logicamente mais económico. a eficiência global destes sistemas, tipicamente ronda os valores de 50% a 60%, sendo que dependerá do fluido de trabalho, das características do armazenamento e do controlo das máquinas, como os compressores e as turbinas.

A combinação destes dois fatores, o layout simples e a utilização de armazenamento a baixas temperaturas, torna os sistemas PTES-Rankine subcríticos numa opção viável para aplicações que valorizem custos mais baixos (ou em locais onde o orçamento seja menor) e menor complexidade técnica, apesar de que a eficiência é ligeiramente inferior quando comparada com os sistemas transcíticos [47].

Como seria de esperar, o sistema PTES-Rankine de ciclos transcíticos opera com fluidos de trabalho diferentes dos ciclos subcríticos. O principal fluido utilizado nos ciclos transcíticos é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), embora outras opções possam ser escolhidas consoante a aplicação, como R1234ze(Z), R125A e R1234ze(Z). Por outro lado, nos ciclos subcríticos, a água e o amoníaco têm sido alvo de estudo para melhorar a eficiência destes sistemas. Diferentes fluidos de trabalho conferem, naturalmente, parâmetros operacionais distintos [38].

Nos sistemas PTES-Rankine de ciclos transcíticos, são utilizados fluidos de trabalho com pontos críticos baixos e pressões reduzidas.

Esta característica permite que o armazenamento no reservatório quente seja feito com água líquida pressurizada, contribuindo assim para a redução de custos do sistema.

Tal como todos os sistemas apresentados anteriormente, o sistema PTES-Rankine transcítico apresenta uma etapa de carregamento e uma etapa de descarga.



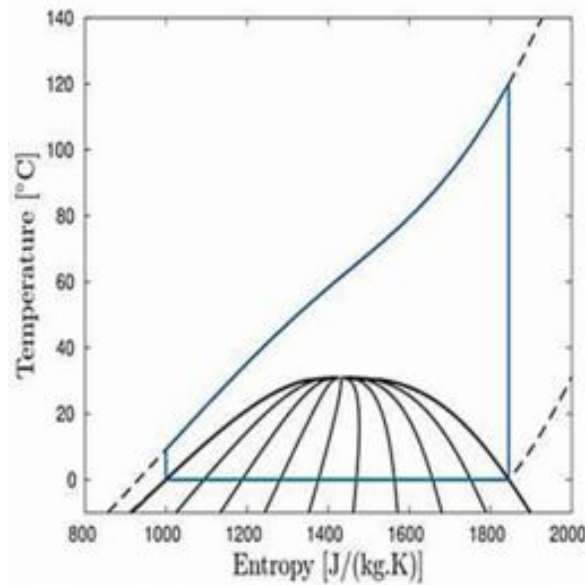


Figura 3.13 - Diagrama T-s de um sistema PTES-Rankine transcrito [47].

Embora o CO<sub>2</sub> seja o fluido de trabalho mais utilizado em sistemas PTES-Rankine transcritos, a adoção de outros fluidos pode permitir um desempenho global ligeiramente superior a pressões mais reduzidas. De facto, esta é a principal diferença entre o CO<sub>2</sub> e outros fluidos de trabalho: o CO<sub>2</sub> apresenta pressões relativamente elevadas, mas razões de expansão e compressão mais baixas. Além disso, a utilização de CO<sub>2</sub> dispensa a necessidade de uma unidade de armazenamento de calor latente, uma vez que não ocorre evaporação a temperatura constante. [47,49]

À semelhança dos sistemas PTES-Brayton, a eficiência global dos sistemas PTES-Rankine transcritos depende fortemente da eficiência politrópica do compressor e da turbina. Estima-se que as eficiências de ciclo completo destes sistemas estejam situadas entre 50% e 60%. Apesar de os sistemas transcritos de CO<sub>2</sub> apresentarem uma eficiência ligeiramente inferior à dos sistemas PTES-Brayton, são geralmente mais eficientes do que os sistemas subcríticos. Por outro lado, os sistemas subcríticos tendem a ser mais económicos uma vez que apresentam projetos mais simples. [38]

Dadas as características que os fluidos que não são orgânicos apresentam, como é o exemplo das diferenças de entalpia que são maiores, isto torna a escolha deste tipo de fluidos melhor para sistemas de maior escala [47].

O facto de o sistema PTES-Rankine operar com temperaturas inferiores ao sistema PTES-Brayton limita o seu desempenho. Em muitas configurações, a implementação de uma fonte de calor de baixa temperatura pode ser utilizada para contornar esta limitação, contribuindo assim para um aumento do desempenho global.

O sistema PTES-Rankine possui a capacidade de operar como uma ponte de diversas e variadas redes energéticas, uma vez que este sistema possui a capacidade

de trabalhar com energia solar térmica, calor residual industrial ou até mesmo energia geotérmica [47].

Para baixas gamas de temperatura, é preferível armazenar o calor em tanques de água pressurizada, uma vez que apresentam bons coeficientes de transferência de calor, permitindo uma eficiente redistribuição térmica e contribuindo para a redução das perdas energéticas do sistema [49].

Nos sistemas PTES-Rankine transcíticos e subcríticos, a conversão de energia térmica armazenada em eletricidade é realizada através de expansores ou turbinas, cuja seleção depende das condições de pressão, temperatura e escala do sistema.

Entre os expansores volumétricos, destacam-se os tipos de pistão, parafuso (screw), rotor oscilante (swing rotor), palhetas deslizantes (sliding vane) e scroll.

Nos expansores do tipo pistão, o fluido de trabalho comprimido expande-se ao deslocar o pistão, convertendo a energia de alta pressão em trabalho mecânico. Este tipo de expansor revela-se adequado para os ciclos PTES-Rankine transcíticos, uma vez que suporta pressões mais elevadas. Os expansores de parafuso (screw) são eficientes em sistemas de pequena e média potência, mas a sua eficiência é reduzida em regimes de menor potência e exigem elevada precisão no que toca a fabricação dos rotores e do invólucro.

Os expansores de rotor oscilante (swing rotor) operam através da expansão do fluido de trabalho em rotores excêntricos que oscilam durante o processo, enquanto os expansores de palhetas deslizantes (sliding vane) permitem a expansão do fluido em câmaras rotativas, sem que exista a necessidade de válvulas de admissão ou válvulas de escape. Deste modo os expansores de palhetas deslizantes são capazes de lidar com a fase líquida e com a fase gasosa do fluido de trabalho.

Os expansores scroll, são constituídos por um rotor estático e um rotor rotativo que formam uma câmara em espiral concêntrica. O fluido a alta pressão expande-se durante a rotação, dispensando válvulas e mostrando elevada compatibilidade com aplicações que utilizem sistemas PTES-Rankine transcíticos.

No que se refere às turbinas que são utilizadas nestes sistemas, estas podem ser axiais ou radiais. As turbinas radiais apresentam-se compactas, de conceção relativamente simples, são eficientes em pequenas escalas e são adequadas para aplicações de potência baixa a moderada, incluindo sistemas que operam com fluidos transcíticos.

Por outro lado, as turbinas axiais são preferivelmente utilizadas em aplicações de maior potência, permitindo desse modo a passagem de caudais elevados e conseguindo assim suportar altas pressões e temperaturas, no entanto estas turbinas apresentam uma maior complexidade e um maior custo de fabrico.

A seleção do tipo de turbina ou de expansor deve ter em conta a análise detalhada de diversos fatores, como é o exemplo da compatibilidade com o fluido de trabalho, a faixa de pressões e temperaturas, a escala do sistema e os objetivos de eficiência

energética, sendo determinante para o desempenho global dos ciclos PTES-Rankine transcíticos e subcríticos [57].

Os sistemas PTES-Rankine convencional e o PTES-Rankine transcítico apresentam diversas vantagens e desvantagens.

Analisando individualmente, o sistema PTES-Rankine apresenta várias vantagens. As perdas por atrito são reduzidas devido à baixa viscosidade do fluido de trabalho. Além disso, a sua estabilidade química diminui a necessidade de materiais específicos.

O sistema possui uma elevada capacidade térmica, permitindo armazenar grandes quantidades de energia, o que é vantajoso para a gestão e redistribuição de calor no ciclo. Por fim, os ciclos de bomba de calor operando a temperaturas relativamente baixas reduzem as perdas térmicas, maximizando a eficiência do sistema ao incorporar calor residual de baixa temperatura no ciclo.

Em termos de desvantagens, o sistema PTES-Rankine exige um elevado nível de isolamento, particularmente na turbina e no condensador. Apresenta um volume específico elevado e opera a pressões relativamente baixas devido à baixa temperatura de condensação. Além disso, verifica-se uma redução de eficiência e uma adequação limitada na recuperação de calor residual. Por fim, o sistema normalmente utiliza turbinas multi-etapas, cujo custo é relativamente elevado. [47].

Relativamente ao sistema PTES-Rankine transcítico as vantagens e desvantagens já são ligeiramente diferentes.

Como vantagens, este sistema apresenta uma boa compatibilidade com o perfil da fonte de calor, possui uma elevada eficiência exergetica, é um sistema bastante ecológico, possui requisitos de baixa temperatura e o principal fluido de trabalho é barato e não é tóxico, logo não existe perigo associado.

Entre as desvantagens, o sistema apresenta uma configuração dispendiosa para ciclos melhorados e exige múltiplas etapas de expansão devido à elevada razão de volume. A principal limitação ocorre na fase transcítica, em que o calor específico do CO<sub>2</sub> sofre variações significativas exigindo cuidados adicionais no projeto do permutador de calor entre o CO<sub>2</sub> e a água quente [47,49]

A Tabela 3.1. representa o conjunto de características que as configurações de um sistema PTES apresentam.

Tabela 3.1 - Características das diferentes propriedades das configurações de um sistema PTES [49].

PTES	Potência (MW)	Gama de temperatura (°C)	Capacidade energética (MWh)	RTE (%)	Fluidos de trabalho
Brayton	5-100	-150-1000	16-600	50-80	Árgon, Nitrogénio, Ar

ORC	1-10	-25-180	Acima de 40	60-130	R1233zd, Butano
Transcritico	1-50	-25-150	10-200	50-75	CO <sub>2</sub>
Convencional	1.5	10- 80(NH <sub>3</sub> ) e 75- 315(Água)	Acima de 10	70-73	NH <sub>3</sub> /Água

### **3.3 Bateria convencional vs Bateria de Carnot**

Para se poder apresentar uma comparação da bateria de Carnot com um sistema de bateria convencional, foi escolhida a bateria de íão de lítio onde desse modo é possível realizar uma análise e comparação entre estas duas tecnologias de armazenamento, mostrando as limitações das baterias convencionais e a razão da necessidade de se começar a adotar o uso de baterias de Carnot.

Uma bateria convencional, nomeadamente a bateria de íão de lítio é uma bateria que apresenta um ciclo de vida tipicamente longo, apresenta uma alta tensão de operação e um valor de baixa tensão de autodescarga.

A bateria de íão de lítio é constituída por 2 elétrodos, sendo um positivo que é o cátodo e um negativo que é o ânodo, dois coletores de corrente, um separador e um eletrólito [8].

Na fase de descarga destas baterias, vai-se dar a ionização e posterior difusão dos átomos de lítio no ânodo, e isso acontece devido a uma pequena variação que irá acontecer na concentração do eletrólito. O eletrólito é o agente responsável pela condução dos íões até ao seu destino, que é o cátodo, e será precisamente no cátodo que estes se vão combinar com alguns eletrões externos onde posteriormente se depositarão como átomos de lítio [8].

Ao se mover, os íões de lítio originam eletrões livres no ânodo. Estes eletrões fluem naturalmente através de um circuito externo até ao cátodo, onde se recombina com os íões de lítio. A principal função do separador consiste em impedir o fluxo direto de eletrões do ânodo para o cátodo [8].

Durante a fase de carga, o movimento do sistema será o inverso do que aconteceu na fase de descarga [8].

Procedendo à comparação entre estas baterias convencionais e as baterias de Carnot, espera-se que as baterias de Carnot possam apresentar um custo nivelado de armazenamento mais reduzido para aplicações de períodos superiores a 4-8 horas, devido ao baixo custo dos materiais de armazenamento térmico, como leitos

compactados ou betão de alvenaria, embora o custo total dependa também de outros equipamentos essenciais, como é o caso das turbinas, dos compressores, dos reservatórios e inclusive dos permutadores de calor.

Por outro lado, as baterias de iões de lítio apresentam um custo de armazenamento elevado para períodos prolongados, dado que o seu custo por unidade de energia armazenada (kWh) se torna bastante elevado quando se pretende assegurar energia suficiente para cobrir longos períodos de baixa geração de fontes renováveis intermitentes ou de elevada procura.

Relativamente às potencialidades das diferentes tecnologias de baterias, as baterias de Carnot revelam-se uma solução mais eficiente, dado que são capazes de fornecer não só eletricidade, mas também calor útil, que pode ter diversas aplicabilidades. Esta característica contribui para uma melhoria significativa da eficiência global do sistema e representa uma vantagem económica adicional. Em contraste, as baterias de iões de lítio não disponibilizam estas capacidades de forma direta.

Ao aumentar o tamanho do componente de armazenamento térmico, torna-se possível alcançar um armazenamento de longa duração de forma mais económica. Simultaneamente, a potência (MW) e a capacidade de energia podem ser aumentadas, enquanto nas baterias de iões de lítio, estes parâmetros encontram-se limitados devido aos seus custos elevados.

Do ponto de vista geográfico, as baterias de Carnot apresentam uma facilidade no que toca à sua implementação, uma vez que as mesmas não se encontram sujeitas a restrições de localização.

Isto permite que as baterias de Carnot sejam instaladas na proximidade de locais de geração renovável ou de consumo, reduzindo assim as perdas de transporte que efetivamente possam existir se forem instaladas longe destes locais, e ao mesmo tempo melhorando a eficiência da rede elétrica.

Quando se realiza uma análise comparativa entre as vantagens e desvantagens de ambas as tecnologias de armazenamento, conclui-se que as baterias de Carnot se apresentam como uma tecnologia promissora para armazenamentos de energia de média e de longa duração. Esta promessa prende-se a fatores económicos, diversidade de aplicações e, em muitos casos, o potencial de utilização de fluidos de trabalho com menor impacto ambiental, o que contribui para uma operação mais sustentável [51].

## **4 PERSPETIVAS E DESAFIOS FUTUROS**

### **4.1 Baterias de Carnot**

As baterias de Carnot apresentam-se cada vez mais como uma tecnologia emergente de armazenamento de energia em grande escala, baseada no armazenamento térmico com possibilidade de reconversão para eletricidade, contribuindo para a integração eficiente das energias renováveis e para a descarbonização do setor energético.

Apesar de todo o potencial existente, as baterias de Carnot enfrentam bastantes desafios técnicos, económicos e de integração que direta ou indiretamente condicionam a sua aplicação e potencial. De certa forma, o presente capítulo aborda alguns desafios que necessitam de ser ultrapassados.

Para tal, é essencial otimizar a eficiência individual dos seus componentes e, ao mesmo tempo, minimizar as perdas térmicas. Só assim esta tecnologia de armazenamento poderá competir eficazmente com outras e destacar-se no mercado.

Apesar das baterias de Carnot possuírem uma eficiência teórica com valores relativamente elevados, as eficiências reais não apresentam esses valores. Por isso, existe a necessidade de melhorar a eficiência do ciclo destas baterias e demonstrar que podem apresentar uma eficiência real elevada de forma consistente.

No ponto de vista comercial, é necessário que os projetos existentes comecem a ganhar forma, e ocorra realmente a sua instalação em grande escala visto que só assim é possível ganhar a confiança de alguns investidores e ganhar a perceção de que o desempenho pode ser muito bom.

De certa forma também é necessário que se garanta estabilidade térmica e química dos materiais de armazenamento que constituem estes sistemas, mas a longo prazo, para que se comece a ter uma avaliação mais detalhada sobre ciclos de vida e custos operacionais relativos a cada material, principalmente em instalações de baixo custo.

É necessário proceder à seleção e análise dos componentes de conversão de energia dos sistemas auxiliares, de modo a identificar oportunidades de redução de custos, permitindo que o sistema atinja os níveis-alvo ou os níveis teóricos do custo nivelado de armazenamento, contribuindo assim para a estabilidade económica.

A integração de diferentes materiais de armazenamento, juntamente com a sua otimização, é essencial para melhorar o desempenho desta tecnologia e o seu valor económico. A hibridização com outros ESS ou com sistemas que utilizem os fluxos de calor e frio residual também constituem uma maneira de melhorar esta tecnologia de armazenamento.

É de realçar que as propriedades das turbomáquinas e dos permutadores de calor nos sistemas possuem elevada importância. Estes componentes devem ser robustos, eficientes e economicamente viáveis, operando de forma fiável segundo propriedades de temperatura e pressão, bem como com os diferentes fluidos de

trabalho. Além disso, devem apresentar elevada durabilidade, visto que é crucial para um ESS [51].

Algumas propostas indicam que estes sistemas devem integrar energias residuais criogênicas nos reservatórios de baixa temperatura, sendo esta medida mais específica para o sistema PTES-Brayton. Desta forma, facilita-se a admissão do fluido no compressor reduzindo simultaneamente a temperatura de descarga durante a fase de carga. Esta redução assume particular importância, uma vez que as tecnologias de compressores atualmente disponíveis apresentam limitações na operação sob temperaturas de descarga elevadas. Adicionalmente, esta abordagem revela-se especialmente vantajosa quando são utilizadas fontes de calor residual ou de baixa temperatura. A sua aplicação torna-se ainda mais relevante em sistemas PTES baseados no ciclo de Rankine, dado que estes operam tipicamente a temperaturas inferiores.

Outras soluções sugerem a utilização de aquecedores elétricos, de modo a eliminar parte do processo de aquecimento do fluido de trabalho antes da entrada no dispositivo expensor.

Já abordando especificamente o sistema PTES-Rankine, uma melhoria futura que poderia aumentar o seu desempenho seria o aproveitamento de fontes e reservatórios de calor adicionais [41].

## **4.2 Sistemas PHS**

Atualmente, a capacidade global de armazenamento de eletricidade é estimada em cerca de 4.7 TWh, embora este valor apresente alguma incerteza devido à escassez de dados detalhados sobre a capacidade de armazenamento de energias renováveis expressa em termos de energia. A grande maioria desta capacidade, tal como já foi abordado anteriormente, é assegurada por sistemas de bombagem hidroelétrica, que representam aproximadamente 98% do total. Como já referido, o armazenamento PHS lidera tanto em termos de potência instalada [GW] como de capacidade de armazenamento de energia (GWh). Apenas em três países concentram-se quase metade da capacidade instalada global de armazenamento de energia (48%), sendo que os países são a China (31,1 GW), o Japão (28,5) e os Estados Unidos da América (24,2 GW). No entanto estão a emergir novos locais significativos para tecnologias de armazenamento de energia elétrica.

Projeções da IRENA indicam que, até 2030, a capacidade de armazenamento por PHS, poderá aumentar entre 1560 e 2340 GWh relativamente a 2017. No entanto, a participação relativa desta tecnologia diminuirá devido ao crescimento mais rápido de outras soluções de armazenamento, como baterias e sistemas térmicos. Este crescimento será impulsionado, para além de outros fatores, pela descarbonização do setor dos transportes através da adoção de veículos elétricos e pela necessidade crescente de flexibilidade na rede elétrica. Como consequência, prevê-se que a capacidade de armazenamento não hidroelétrico (como as baterias de carnot,

sistemas CAES, sistemas TES, etc) aumente de cerca de 162 GWh em 2017 para valores aproximados de entre 5800 a 8400 GWh em 2030 [17].

Uma das principais limitações relativamente aos sistemas PHS encontra-se no facto de não ser comum encontrar grandes elevações junto ao mar que permita tornar o sistema PHS económico [17].

Existem diversos projetos que exploram a possibilidade de integrar centrais PHS com fontes de energia renovável variável, tipo energia eólica. Têm sido propostas centrais PHS híbridas que utilizam a energia eólica por bombagem frequente, revelando-se soluções economicamente viáveis em diferentes regiões geográficas. Um projeto que se encontra desenvolvido pelo grupo alemão Max Bogl em parceria com a General Electric, é um projeto que planeia a integração de turbinas eólicas com uma central PHS na floresta Suábia-Francónia, na Alemanha. As turbinas eólicas terão 178 metros de altura e estarão apoiadas num reservatório artificial que funciona como armazenamento superior, com capacidade adicional de reservatório integrado na base das turbinas. A potência nominal do parque eólico é de 13.6 MW, enquanto a capacidade hidroelétrica proposta é, de pelo menos, 16 MW [17].

### **4.3 Sistemas CAES**

Apesar da tecnologia CAES ter apresentado um crescente interesse nos últimos anos, até 2016 apenas duas centrais de grande escala se encontravam ligadas à rede elétrica: uma instalação de 290 MW em Huntorf na Alemanha, e outra em McIntosh no Alabama. Ainda chegou a existir um projeto de 270 MW planeado para Iowa, nos EUA, no entanto acabou por ser cancelado após vários anos devido ao risco financeiro que a sua implementação iria ter [17].

As principais características relativas a cada central são, Huntorf, Alemanha:

- Iniciada em 1978
- Potência nominal de 290 MW
- Energia nominal de 580 MWh
- Pressão de 4.6-6.6 MPa
- Fonte de calor é gás natural
- Eficiência de ciclo completo é 42%

Enquanto a central de McIntosh apresenta:

- Iniciada em 1991
- Potência nominal de 110 MW
- Energia nominal de 2860 MWh
- Pressão de 4.5-7.4 MPa

- Fonte de calor é gás natural
- Eficiência de ciclo completo é 54%

No que respeita aos sistemas CAES, esta é uma tecnologia consolidada, mas que ainda se encontra sujeita a desafios técnicos e económicos.

Tal como acontece com o armazenamento PHS, o custo de implementação de um sistema CAES depende fortemente das condições locais, incluindo a disponibilidade de reservatórios adequados e restrições ambientais. O custo típico de instalação situa-se em cerca de 50 USD/kWh, no entanto, se existir um reservatório previamente disponível é possível que seja reduzido para 40 USD/kWh. Entre as limitações desta tecnologia destacam-se a eficiência relativamente baixa de ciclo completo, a taxa de descarga limitada e a necessidade de combustível fóssil para reaquecimento do ar, sendo consequentemente, fatores que tendem a influenciar o custo e o impacto ambiental do sistema [17].

Apesar destas limitações, prevê-se que os esforços de otimização tecnológica e o aumento da escala de implementação contribuam para uma redução de custos de instalação na ordem dos 17% até 2030, reforçando dessa forma a competitividade do CAES em aplicações de média e de longa duração. Além disso, esta é uma tecnologia que apresenta um potencial para desempenhar um papel relevante na integração de energias renováveis, nomeadamente em países com capacidade geológica adequada para reservatórios subterrâneos, sendo objeto de investigação e implementação em projetos piloto na Alemanha, nos EUA e em diversos países da Europa.

#### **4.4 Baterias de iões de lítio**

Para efeitos de comparação, consideraram-se as baterias de iões de lítio, uma tecnologia que já se encontra devidamente consolidada e amplamente utilizada em aplicações estacionárias.

Entre 2010 e 2016, o custo das baterias de iões de lítio para transportes caiu 73%. No caso das aplicações estacionárias, o custo instalado é maior devido aa ciclos de carga/descarga mais exigentes e à necessidade de sistemas de gestão de energia mais sofisticados. Um exemplo é o caso de na Alemanha, sistemas de pequena escala viram o custo total instalado reduzir 60% entre 2014 e 2017. Projeta-se que, beneficiando do aumento da produção de baterias para veículos elétricos, o custo em aplicações estacionárias possa cair entre 54% e 61% até 2030, atingindo entre 145 e 480 USD/kWh, dependendo da química da bateria. Através destes valores, é possível comparar economicamente o desempenho de tecnologias emergentes, como é o caso das baterias de Carnot, com tecnologias já maduras no mercado [17].

## **4.5 Sistemas FES**

Os volantes armazenam energia sob a forma de energia cinética rotacional, através da aceleração e travagem de uma massa em rotação, e apresentam elevado potencial de potência. No entanto, este sistema apresenta um elevado custo por unidade de energia, que atualmente apresenta uma estimativa entre 1500 e 1600 USD/kWh, e uma autodescarga elevada, que pode atingir os 15% por hora, tornando assim estes sistemas mais indicados para aplicações de curta duração. Com a melhoria de materiais e a redução das perdas por atrito, através do desenvolvimento de rolamentos magnéticos, prevê-se que a vida útil e a eficiência destes sistemas aumentem. Esta evolução poderá contribuir para uma redução de custos de instalação na ordem dos 35% até 2030, permitindo assim reduzir o custo por unidade de energia para valores compreendidos entre 1000 e 3900 USD/kWh até ao ano de 2030 [17].

## **4.6 Apreciação global**

Os sistemas de armazenamento de energia apresentam-se como soluções consolidadas ou em desenvolvimento, permitindo armazenar energia em diferentes formas e reconvertê-la em eletricidade quando necessário. Embora algumas destas tecnologias já se encontrem bem implementadas, muitas ainda não se encontram perfeitamente desenvolvidas e requerem melhorias em termos de eficiência, custos, durabilidade e integração na rede elétrica. Ainda assim, contribuem de forma significativa para a integração eficiente das energias renováveis e para a descarbonização do setor energético.

No conjunto, as diferentes tecnologias de armazenamento analisadas revelam um potencial significativo para apoiar a transição energética, embora permaneçam desafios técnicos, económicos e de integração que exigem investigação contínua. A evolução prevista para os próximos anos indica um reforço do papel destes sistemas na estabilidade e flexibilidade das redes elétricas, contribuindo para um setor energético mais sustentável e resiliente [17].

## **5 CONCLUSÕES**

A crescente penetração de fontes de energia renovável exige soluções de armazenamento de energia de longa duração, capazes de assegurar estabilidade e flexibilidade de armazenamento de energia.

As baterias de Carnot pertencem a uma área que atualmente se encontra numa evolução bastante acentuada no que toca a sistemas de armazenamento de energia.

Uma vez que se realizou a apresentação das baterias de Carnot e de outro tipo de tecnologias de armazenamento, como é o caso do PHS, FES, CAES e sistemas TES, concluiu-se que as baterias de Carnot apresentam vantagens significativas em relação a todas as outras tecnologias de armazenamento, principalmente na flexibilidade geográfica e no fornecimento de energia multivetorial, uma vez que combinam armazenamento térmico e conversão elétrica para fornecer energia elétrica e calor útil de forma eficiente e eficaz.

Teoricamente, as baterias de Carnot simples apresentam valores de eficiência relativamente baixos. No entanto, quando combinadas com ciclos termodinâmicos, como no caso do PTES-Brayton ou PTES-Rankine, as eficiências dos sistemas podem atingir valores significativamente superiores, situando-se entre 50% e 130%, como se apresenta na Tabela 3.1.

As baterias de Carnot também se apresentam como uma opção mais viável que as baterias eletroquímicas, dada as suas propriedades de fácil adaptação, aumento de densidade energética, fácil aplicação geográfica e dada a sua capacidade de combinar energia elétrica com calor.

Apesar das baterias de Carnot se apresentarem como uma solução bastante promissora, ainda enfrentam alguns desafios, que podem estar relacionados com a eficiência do ciclo, certos custos de capital ou até mesmo a nível da fiabilidade das propriedades dos materiais a longo prazo.

Em suma, as baterias de Carnot apresentam um grande potencial como solução de armazenamento de energia para projetos de longa duração. No entanto, a obtenção de materiais e equipamentos constituintes de baixo custo ainda apresenta dificuldades, exigindo otimizações para assegurar que o sistema funcione de forma fiável e sustentável. Por conseguinte, diversos aspetos necessitam de ser aperfeiçoados para que estas baterias se tornem efetivamente uma das melhores opções de armazenamento de energia de longa duração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - de Araújo, R. S., de Sousa, F. L. N., Vanderley, P. S., da Silva Bentes, S. O., Gomes, L. M., & Ferreira, F. C. L. (2022). Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. *Research, Society and Development*, 11(11), e468111133893-e468111133893.
- 2 - Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. (2022). Renewable energy for sustainable development. *Renewable energy*, 199, 1145-1152.
- 3 - Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1(3), 166-216.
- 4 - Fernandes, D. J. S. G. (2013). *Riscos e incerteza das fontes renováveis na produção de energia elétrica* (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- 5 - Goldenergy. (s.d.). *Armazenamento de energia*. Glossário.
- 6 - Kim, H.-M., Rutqvist, J., Ryu, D.-W., Choi, B.-H., Sunwoo, C., & Song, W.-K. (2012). *Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: A modeling study of air tightness and energy balance*. *Applied Energy*, 92, 653–667.
- 7 - Capwatt. (s.d.). *ATE – New Carnot Battery*.
- 8 - Naggio, M., Esparcia, E. A., & Galiano-Garrigós, A. (2021). A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparisons, and applications. *Energies*, 14(13), 3977.
- 9 - Sayed, E. T., Olabi, A. G., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. A. (2023). Renewable energy and energy storage systems. *Energies*, 16(3), 1415.
- 10 - Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1), 191.
- 11 - Rabi, A. M., Radulovic, J., & Buick, J. M. (2023). Comprehensive review of compressed air energy storage (CAES) technologies. *Thermo*, 3(1), 104–126
- 12 - González, A., Cameán, I., Monzón, A., & de la Fuente, D. (2023). Comparative analysis of control strategies for residential hybrid energy systems in three different climates. *Energies*, 16(11), 4516.
- 13 - Costa, F. V. R. G. da. (2019). *Processos de armazenamento de energia com recurso a ar comprimido: revisão* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa). Repositório da Universidade de Lisboa.
- 14 - Mongird, K., Fotedar, V., Viswanathan, V., Koritarov, V., Balducci, P., Hadjerioua, B., & Alam, J. (2019, julho). *Energy Storage Technology and Cost*

*Characterization Report* (PNNL-28866). Pacific Northwest National Laboratory.

- 15 - Zakeri, B., & Syri, S. (2023). A comprehensive review on energy storage systems: Types, applications, and challenges. *Energies*, 16(11), 4516.
- 16 - Malavazi, A., Ferreira, V. J., Bernardon, D. P., Bertol, D., & Fantin, A. M. (2023). A comprehensive review on energy storage systems: Research progresses and applications. *Energies*, 16(11), 4516.
- 17 - International Renewable Energy Agency. (2017, outubro). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. ISBN 978-92-9260-038-9.
- 18 - Energy Storage Association. (s.d.). *Flywheel energy storage systems (FESS)*.
- 19 - Amiryar, M. E., & Pullen, K. R. (2017). *A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications*. *Applied Sciences*, 7(3).
- 20 - Schaper, A. (2021, 29 de setembro). *Flywheel energy storage*. Schaper Energy.
- 21 - Bryce, E. (2024, 5 de outubro). *Flywheel energy storage: A promising alternative to batteries for balancing solar power*. Bryce Energy Services.
- 22 - Kim, Y.-M., Lee, J.-H., Kim, S.-J., & Favrat, D. (2012). Potential and evolution of compressed air energy storage: Energy and exergy analyses. *Entropy*, 14(8), 1501–1521.
- 23 - Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). *Energy storage systems: A review*. *Energy Storage and Saving*, 1(5), 166–216.
- 24 - Zhou, S.-W., Xia, C.-C., Zhang, P.-Y., & Zhou, Y. (2014). *Analytical approach for stress induced by internal pressure and temperature of underground compressed air energy storage in a circular lined rock cavern*. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(11), 2065-2073.
- 25 - Liu, X., Li, W., Guo, X., Su, B., Guo, S., Jing, Y., & Zhang, X. (2025). Advancements in Energy-Storage Technologies: A Review of Current Developments and Applications. *Sustainability*.
- 26 - Ding, X., Duan, L., Zheng, N., Desideri, U., Zhou, Y., Wang, Q., Wang, Y., & Jiao, W. (2025). A systematic review on liquid air energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, Article 115164.
- 27 - Solveno Technologies. (2025). *Liquid Air Energy Storage (LAES)*.
- 28 - Dincer, I., & Rosen, M. A. (2002). Thermal energy storage: An overview. *International Journal of Energy Research*, 26(2), 85–111.
- 29 - Kumar, A.; Shukla, S.K. A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. *Energy Procedia* 2015, 74, 462–469.

- 30 - Tawalbeh, M., Khan, H. A., Al-Othman, A., Almomani, F., & Ajith, S. (2023). *A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. International Journal of Thermofluids*, 18, Article 100326.
- 31 - Babay, S., Bouguettaia, H., Bechki, D., Boughali, S., Bouchekima, B., & Mahcene, H. (2009). *Review on thermal energy storage systems. Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur*, 1(4).
- 32 - de Souza, V. B. (2025). *Avaliação termodinâmica dos sistemas integrados de armazenamento de energia na forma de ar líquido e regaseificação de gás natural (Doctoral dissertation, [sn])*.
- 33 - Connor, N. (2024, 3 de junho). *Como funcionam os sistemas de armazenamento de calor latente. Thermal Engineering*.
- 34 - McTigue, J., Farres-Antunez, P., Ellingwood, K., Neises, T., & White, A. (2020). *Pumped thermal electricity storage with supercritical CO<sub>2</sub> cycles and solar heat input. AIP Conference Proceedings*, 2303(1), 190024.
- 35 - Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Appl. Energy* 2015, 137, 511–536.
- 36 - Li, X., & Palazzolo, A. (2021). *A review of flywheel energy storage systems: State of the art and opportunities. arXiv*.
- 37 - Nikolaos, P. C., Fafalakis, M., & Katsaprakakis, D. (2023). *A review of pumped hydro storage (PHS) systems. Energies*, 16(11), 4516.
- 38 - Jacob, R., & Liu, M. (2023). *Design and evaluation of a high temperature phase change material Carnot battery. Energies*, 16(1), 189.
- 39 - Capwatt. (s.d.). *ATE – New Carnot Battery*.
- 40 - Novotny, V., Basta, V., Smola, P., & Spale, J. (2022). Review of carnot battery technology commercial development. *Energies*, 15(2), 647.
- 41 - Dumont, O., Frate, G. F., Pillai, A., Lecompte, S., & Lemort, V. (2020). Carnot battery technology: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 32, 101756.
- 42 - Lin, X., Sun, P., Zhong, W., & Wang, J. (2023). Thermodynamic analysis and operation investigation of a cross-border integrated energy system based on steam Carnot battery. *Applied Thermal Engineering*, 220, 119804.
- 43 - Vecchi, A., Knobloch, K., Liang, T., Kildahl, H., Sciacovelli, A., Engelbrecht, K., ... & Ding, Y. (2022). Carnot Battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art. *Journal of Energy Storage*, 55, 105782.
- 44 - Zhao, D., Sun, S., & Alavi, H. (2022). Simulation and optimization of a Carnot battery process including a heat pump/organic Rankine cycle with

- considering the role of the regenerator. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 870-878.
- 45 - Zhao, C., Yan, J., Tian, X., Xue, X., & Zhao, Y. (2023). *Progress in thermal energy storage technologies for achieving carbon neutrality*. *Carbon Neutrality*, 2(1), 10.
- 46 - Vecchi, A., et al. (2022). *Carnot battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art*. *Heliyon*, 8(10), e11039.
- 47 - Rabi, A. M., Radulovic, J., & Buick, J. M. (2023). Pumped Thermal Energy Storage Technology (PTES): Review. *Thermo*, 3(3), 396-411.
- 48 - Turbojet. (2007, 17 Setembro). Ts Real Brayton Cycle [Diagrama T-s]. Wikimedia Commons.
- 49 - Kalaivanane, G. (2023). *Pumped thermal energy storage based on Organic Rankine Cycles* [Master's thesis, Politecnico di Milano]. Politesi.
- 50 - Méndez-Cruz, L. E., Salazar-Pereyra, M., Bonilla-Blancas, A. E., & Lugo-Leyte, R. (2019). Diagramas temperatura-entropía de los ciclos de vapor y geotérmicos [Figura]. In *Análisis termodinámico de las turbinas de vapor para los ciclos ultracríticos, supercríticos, subcríticos y geotérmicos* (Fig. 2). ResearchGate.1-1.
- 51 - Nunes, L. J. R. (2025). *Carnot batteries for grid-scale energy storage: Technologies and the potential valorization of biomass ash as thermal storage media*. *Energies*, 18(16), 4235.
- 52 - Tillmanns, D., Pell, D., Schilling, J., & Bardow, A. (2022). The thermo-economic potential of ORC-based pumped-thermal electricity storage: Insights from the integrated design of processes and working fluids. *Energy Technology*, 10(7), 2200182.
- 53 - Frate, G. F., Ferrari, L., & Desideri, U. (2020). Rankine Carnot Batteries with the Integration of Thermal Energy Sources: A Review. *Energies*, 13(18), 4766.4-42.
- 54 - Jiménez-García, J. C., Ruiz, A., Pacheco-Reyes, A., & Rivera, W. (2023). A comprehensive review of organic Rankine cycles. *Processes*, 11(7), 1982.2-2.
- 55 - Heat Reservoir, Source and Sink – Thermodynamics. (s.d.). MECH Department, Anna University. «Heat Reservoir, Source and Sink».3-27.
- 56 - Zhao, Y., Song, J., Liu, M., Zhao, Y., Olympios, A. V., Sapin, P., Yan, J., & Markides, C. N. (2022). Thermo-economic assessments of pumped-thermal electricity storage systems employing sensible heat storage materials. *Renewable Energy*, 186, 431–456.5-52.
- 57 - Chai, L., & Tassou, S. A. (2025). A technology review of pumped thermal energy storage based on CO<sub>2</sub> cycles. *Applied Thermal Engineering*, 281, 128586.



**Instituto Superior  
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra