



Avaliação de diferentes tipos de armazenamento de energia

GUIYANG FU
setembro de 2024

**Avaliação de diferentes tipos de armazenamento
de energia**

Fu Gui Yang 1190645

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Energia**

Orientador: Leonardo Ribeiro

Júri:

Presidente:

Rui Rego, Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Engenharia do Porto

Vogais:

Adélio Cavadas, Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Viana do Castelo

Porto, setembro de 2024

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos os que participaram nesta incrível jornada acadêmica desde o início até agora. Neste percurso, tive a oportunidade de aprender e aprofundar sobre os conhecimentos envolvidos no mundo da engenharia, fazer amizades, partilhar experiências de vida e desenvolver as capacidades de enfrentar diferentes desafios na área profissional.

Primeiro aos meus pais, que sempre me motivaram e encorajaram a seguir os meus sonhos, sendo as duas figuras que mais importantes na minha vida para partilhar as minhas derrotas e sucessos. Adicionalmente, estendo os meus agradecimentos aos membros da minha família, especialmente o meu irmão pelo seu amor incondicional desejando-me sempre o melhor.

Aos meus melhores amigos, com quem partilhei os meus sonhos muito antes da faculdade e que ainda estão aqui a dar o seu apoio. Aos amigos da faculdade, com quem recentemente partilhei esta nova aventura, e que contribuíram para tornar esta experiência ainda mais especial e enriquecedora.

Gostaria de agradecer a orientação e o apoio do meu Professor e supervisor Leonardo Ribeiro no ISEP, por todas as lições e valiosos conhecimentos e também ao meu amigo Pedro Ramos pela correção da escrita e da formalidade. Com estes apoios enriqueceram a qualidade deste trabalho.

A todos vocês, obrigado.

Fu Gui Yang.

“Se eu tivesse tido tempo, ter-lhe-ia escrito uma carta mais curta.”

Pascal

Resumo

O armazenamento de energia é essencial para otimizar a gestão de sistemas energéticos e integrar fontes renováveis. Os principais sistemas envolvem baterias, energias mecânicas, energias térmicas, hidrogénios, etc.

As baterias usam reações químicas para armazenar e liberar energia, sendo as baterias de íon de lítio as mais comuns no mercado, pois são eficientes e ideais para aplicações móveis e sistemas renováveis, mas são mais caras e têm menor possibilidade de escala.

A energia mecânica inclui armazenamento em ar comprimido (CAES), bombagem hidráulica, etc. Esses sistemas são adequados para grandes escalas, têm vida útil longa e custos relativamente baixos, mas apresentam menor densidade de energia.

O armazenamento de energia térmica, apresenta a energia na forma de calor, como em sistemas de energia solar térmica. É eficaz para aplicações industriais e solares, oferece uma boa eficiência para armazenar calor.

O hidrogénio é uma estratégia futura para armazenar energia, pois pode ser convertido de volta em eletricidade ou usado como combustível. É flexível e escalável, mas possui menor eficiência de conversão e custos mais altos.

Ao comparar os quatro sistemas verifica-se que as baterias de íon de lítio são mais eficientes e adequadas para aplicações específicas, enquanto armazenamento em ar comprimido e bombagem hidráulica são mais económicos para grandes volumes. O armazenamento térmico é eficiente para calor, e o hidrogénio oferece flexibilidade para várias aplicações, mas com maior custo e menor eficiência. A escolha ideal depende das necessidades específicas de escala, custo e eficiência.

PALAVRAS-CHAVE: Energias Renováveis, Baterias, Solar Térmico, Barragens, Hidrogénio e Combustíveis fósseis.

Abstract

Energy storage is essential for optimizing the management of energy systems and integrating renewable sources. The main systems involve batteries, mechanical energy, thermal energy, hydrogen, etc.

Batteries use chemical reactions to store and release energy, with lithium-ion batteries being the most common on the market, as they are efficient and ideal for mobile applications and renewable systems, but they are more expensive and have less possibility of scalability.

Mechanical energy includes compressed air storage (CAES), hydraulic pumping, etc. These systems are suitable for large scales, have a long lifetime and relatively low costs, but have lower energy density.

Thermal energy storage presents energy in the form of heat, as in solar thermal energy systems. It is effective for industrial and solar applications, offering good efficiency for storing heat.

Hydrogen is a future strategy for storing energy, as it can be converted back into electricity or used as a fuel. It is flexible and scalable, but has lower conversion efficiency and higher costs.

When comparing the four systems it appears that lithium-ion batteries are more efficient and suitable for specific applications, while compressed air storage and hydraulic pumping are more economical for large volumes. Thermal storage is efficient for heat, and hydrogen offers flexibility for various applications, but at higher cost and lower efficiency. The ideal choice depends on specific scale, cost and efficiency needs.

KEYWORDS: Renewable Energy, Batteries, Solar Thermal, Dams, Hydrogen, and Fossil Fuels.

Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Acrónimos e Símbolos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do relatório	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Estrutura do relatório.....	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. Armazenamento de energia de matérias-primas	3
2.1.1. Madeira/carvão vegetal.....	3
2.1.2. Carvão mineral.....	3
2.1.3. Petróleo/Petróleo bruto	5
2.1.4. Gás natural.....	6
2.1.5. Hidrato de metano.....	6
2.1.6. Hidrogénio	7
2.1.7. Combustíveis derivados da reação química.....	7
2.2. Armazenamento de energia térmica	8
2.2.1. Propriedades de termodinâmica e calor específico	8
2.2.2. Calor sensível	9
2.2.3. Calor latente.....	10
2.2.4. Material de mudança de fase (PCM)	11
2.3. Armazenamento de energia mecânica	13
2.3.1. Energia armazenada por volantes	13
2.3.2. Energia hidroelétrica.....	14
2.3.3. Energia das ondas do oceano	16
2.3.4. Energia por ar comprimido	18
2.4. Armazenamento de energia eletroquímica	19
2.4.1. Baterias de chumbo ácido.....	19
2.4.2. Baterias de iões de lítio.....	20
2.4.3. Baterias de níquel-cádmio	20
2.4.4. Baterias de sódio-enxofre.....	21
2.4.5. Baterias de fluxo	22
3. Método de transformação de energia e capacidade de armazenamento	25
3.1. Principais tipos de mecanismos de reação de células eletroquímicas	25
3.1.1. Reações de formação.....	25
3.1.2. Reações de deslocamento	27

3.1.3. Reações de inserção.....	28
3.1.4. Conceitos importantes de aplicações práticas	29
3.1.5. Variação de tensão da bateria durante recargas e descargas	32
3.2. Principais tecnologias aplicadas para o aproveitamento de energias hidroelétricas ...	34
3.2.1. Aproveitamento hídrico de pequena dimensão.....	34
3.2.2. Geradores.....	36
3.2.3. Turbomáquinas hidráulicas.....	38
3.3. Principais tecnologias aplicadas para o aproveitamento de energias solar térmicas ..	51
3.3.1. Coletores solares.....	52
3.3.2. Tecnologias de aplicação	54
3.4. Principais tecnologias aplicadas da produção e armazenamento de hidrogénio	56
3.4.1. Produção de hidrogénio.....	57
3.4.2. Armazenamento de hidrogénio	60
3.4.3. Células combustíveis de hidrogénio	63
4. Análise e comparação dos dados obtidos.....	65
4.1. Apresentação dos dados	65
5. Conclusão	67
5.1. Conclusões finais	67
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	67
Referências.....	69
Declaração de Integridade	73

Lista de Figuras

Figura 1 - Gráfico traduzido para os tipos de carvão[1].....	4
Figura 2 – Gráfico traduzido da evolução de estado de água[2]	10
Figura 3 Gráfico traduzido de diferentes estados em função da temperatura[1].....	11
Figura 4 – Representação esquemática do sistema de volante[4]	13
Figura 5 – Representação esquemática do ciclo de água [6].....	15
Figura 6 – Esquema traduzido de um sistema de bombeamento de água[2]	15
Figura 7 – Esquema traduzido do funcionamento de bombeamento de água subterrâneo [2] 16	
Figura 8 - Esquema traduzido do processo de enchimento e geração de aproveitamento de água do mar[8]	17
Figura 9 – Esquema traduzido do sistema de aproveitamento da energia da ondas[8]	17
Figura 10 - Esquema traduzido do processo de armazenamento do ar comprimido[7]	18
Figura 11 – Esquema traduzido da bateria de chumbo ácido[10]	19
Figura 12 -Esquema traduzido da bateria de íon de lítio[10]	20
Figura 13 - Esquema traduzido da bateria de níquel-cádmio, estrutura selada[10]	21
Figura 14 - Esquema traduzido da bateria de níquel cádmio, estrutura ventilada[10]	21
Figura 15 - Esquema traduzido da bateria de sódio-enxofre [10]	22
Figura 16 - Esquema traduzido da bateria de redox de vanádio[10].....	23
Figura 17 - Esquema traduzido da bateria de zinco-bromo [10]	23
Figura 18- Diagrama traduzido de fases de equilíbrio do sistema alumínio-lítio[1].....	26
Figura 19 – Figura adaptada das curvas de descarga de baterias[1]	32
Figura 20 –Representação esquemática de diferentes tipos de curvas de descarga - adaptado[1]	33
Figura 21 -Figura adaptada dos elementos de uma central de aproveitamento de pequena dimensão[16]	35
Figura 22 –Tipos de centrais mini-hídricas - adaptado[17].....	35
Figura 23 – Comportamento binário de uma máquina assíncrona[18]	37
Figura 24 – Representação esquemática de uma turbina Pelton com um injetor[20].....	40
Figura 25 – Exemplificação do pormenor do jato das turbinas de Pelton e Turgo[21]	40
Figura 26 – Turbina Pelton de eixo horizontal com dois injetores[23]	41
Figura 27 – Princípio de funcionamento de uma turbina Turgo[21]	41
Figura 28 – Composição e princípio de funcionamento de uma turbina Turgo[22]	42
Figura 29 – Esquema de composição e o princípio de funcionamento de uma turbina de fluxo cruzado[23]	43
Figura 30 – Eficiência de uma turbina de fluxo cruzado de caudais diferentes[22]	44
Figura 31 – Composição da turbina Francis[21].....	45
Figura 32 – Rendimento de uma turbina Francis de várias velocidades com quedas constantes[23]	46
Figura 33 -Figura esquemático de uma turbina Kaplan[21].....	47
Figura 34 – Gráfico de seleção de turbinas[20]	48
Figura 35 - Bomba centrífuga a funcionar como bomba[23].....	50
Figura 36 Bomba centrífuga a funcionar como turbina[23]	50

Figura 37 – Curvas típicas de rendimento dos diversos turbinas - adaptado[23]	50
Figura 38 – Composição de um painel solar térmico plano[26]	52
Figura 39 - Coletor solar térmico de concentração do tipo parabólico[27].....	53
Figura 40 – Coletor solar térmico de tubo vácuo[28]	53
Figura 41 Representação esquemática de um campo solar da tecnologia cilindro-parabólico[29]	54
Figura 42 –Componentes de um painel solar térmico de disco parabólico - adaptado[30].....	55
Figura 43 -Esquema do ciclo de funcionamento de tecnologia de torre solar[31].....	56
Figura 44 -Esquema adaptado da produção de hidrogénio[1]	57
Figura 45 -Variação de energia livre de Gibbs com a evolução de temperatura na reação da extração do hidrogénio através do metano[1]	58
Figura 46 - Variação de energia livre de Gibbs com a evolução de temperatura na reação da extração do hidrogénio através do carbono[1]	58
Figura 47 - Variação de energia livre de Gibbs com a evolução de temperatura na formação de água[1]	59
Figura 48 – Representação esquemática de um depósito para armazenamento de hidrogénio comprimido[33]	60
Figura 49 - Esquema de um depósito para armazenamento de hidrogénio líquido - adaptado[33]	61
Figura 50 -Representação esquemática de nanotubo de parede única (A) e de paredes múltiplas (B)[35]	62
Figura 51 - Representação esquemática de reação de eletrólise de água (a) e produção de energia a partir da reação inversa com hidrogénio e oxigénio(b)[36]	63
Figura 52 - Representação esquemática de uma célula combustível de hidrogénio[36]	64
Figura 53 - Gráfico de comparação de VED por GED dos diversos combustíveis	66

Lista de Tabelas

Tabela 1-Descobrimento de campos de petróleo-Local e Data[1]	5
Tabela 2-Tabela traduzido das propriedades térmicas de algumas materiais[1]	9
Tabela 3-Tabela traduzido da comparação de PCM orgânicos e inorgânicos[3].....	12
Tabela 4 – Critérios desejáveis dos PCMs[3].....	12
Tabela 5 - Algumas propriedades dos materiais para volantes [2].....	14
Tabela 6 - Tabela adaptada de energia específica e densidade energética de alguns sistemas de baterias[1].....	29
Tabela 7 – Classificação da qualidade de tensão de aplicação	30
Tabela 8 - Designações das centrais a nível da potência[15].....	34
Tabela 9 - Designações das centrais a nível da altura da queda[15]	34
Tabela 10 – Classificação das turbomáquinas hidráulicas[19].....	39
Tabela 11 – Características de turbinas de impulso[23]	48
Tabela 12 - Dados de densidade energética aproximados de vários sistemas de armazenamento de energia [33], [34], [37], [38].....	65

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P. Porto	Instituto Politécnico do Porto
TES	<i>Thermal Energy Storage (Armazenamento de Energia Térmica)</i>
PCM	<i>Phase Change Materials (Materiais de Mudança de Fase)</i>
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage (Armazenamento de Energia por Ar Comprimido)</i>
MTSE	<i>The Maximum Theoretical Specific Energy (A Energia Específica Teórica Máxima)</i>
CPC	<i>Concentradores parabólicos compostas</i>
CCP	<i>Coletores cilíndricos parabólicos</i>

Lista de Símbolos

T	temperatura	$^{\circ}\text{C}$
GED	Densidade Gravimétrica de Energia	$k\text{WH}/kg$
VED	Densidade Volumétrica de Energia	$k\text{Wh}/L$

Lista de Unidades Físicas

kg	quilograma	Unidade de massa
g	grama	Unidade de massa
m	metro	Unidade de Comprimento
m^3	metro cúbico	Unidade de volume
L	litro	Unidade de volume
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius	Unidade de temperatura
K	Graus Kelvin	Unidade de temperatura
J	Joule	Unidade de energia
kJ	quilojoule	Unidade de energia
W	Watt	Unidade de potência
kW	quilowatt	Unidade de potência
Wh	Watt-hora	Unidade de energia
kWh	quilowatt-hora	Unidade de energia
Pa	Pascal	Unidade de pressão
MPa	megapascal	Unidade de pressão
V	Volt	Unidade de tensão elétrica
A	Ampere	Unidade de corrente elétrica
h	hora	Unidade de tempo
mol	mol	Unidade de substância

g/mol	grama por mol	Unidade de massa molar
kg/mol	quilograma por mol	Unidade de massa molar
N	Newton	Unidade de força

Lista de Símbolos Químicos

Ag	Prata
AgO	Óxido de prata
Al	Alumínio
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
CH_4	Metano
$CFRP$	Polímero reforçado fibra de carbono
Li	Lítio)
$LiAl$	Liga de lítio-alumínio
Li_2O	Óxido de lítio
$LiCl$	Cloreto de lítio
Mn	Manganês
Mg	Magnésio
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Cu_2O	Óxido de cobre
H_2	Hidrogénio
H_2O	Água
O_2	Oxigénio
Pb	Chumbo
PbO_2	Óxido de chumbo
Ti	Titânio
S	Enxofre
S_2	Moléculas de enxofre
SO_2	Dióxido de enxofre
Zn	Zinco
ZnO	Óxido de zinco

1. Introdução

O consumo energético é essencial para garantir as necessidades da população no dia a dia.

Devido ao aumento exponencial da população mundial essas necessidades têm aumentado.

O uso de combustíveis fósseis trouxe problemas relacionadas com mudanças climáticas, no que diz respeito da poluição ambiental na produção de energia. Isso aumentou o interesse na produção de energias mais ecológicas e mais eficientes, temas estes cada vez mais pesquisados e estudados nas últimas décadas.

O investimento nas energias renováveis criou soluções na tecnologia do planeamento de uso energético, de armazenamento, e novas aplicações no mercado industrial e no mercado doméstico.

Esta mudança da metodologia na produção de energia é bastante morosa e complexa por causa das aplicações de energias clássicas, combustíveis fósseis, já se implementaram algumas décadas, ou seja, a tecnologia das energias alternativas ainda não se encontra preparadas para substituição total na sociedade atual.

Outra questão preocupante na aplicação destas energias é o seu armazenamento, pois traz a questão de como armazená-lo, qual forma mais económica e por fim a eficiência do método de armazenamento.

1.1. Enquadramento do relatório

Este relatório foi desenvolvido no âmbito de unidade curricular Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica de Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pelo qual se procura estudar diferentes métodos de armazenamento de energia, por comparação de várias aspetos como eficiência de conservação, custo de armazenamento e também o impacto social da utilização.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar vários tipos de armazenamento de energia, compreender seu modo de funcionamento, algumas das suas aplicações práticas e metodologia na gestão energética do uso dos recursos.

Pretende-se também comparar as diferentes tecnologias usadas, no que toca a custos e facilidade de instalação.

1.3. Estrutura do relatório

No primeiro capítulo faz-se uma breve apresentação do trabalho, dá-se o enquadramento do relatório, objetivo do trabalho e estrutura do relatório.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica do tema proposto, onde se apresenta os diferentes tipos de energia, como por exemplo energia hidroelétrica, energia libertada pelos combustíveis fósseis, o hidrogénio e fontes de energia renováveis.

No terceiro capítulo, apresentam-se métodos e tecnologias utilizadas no aproveitamento e armazenamento de energias, incluindo-se as reações químicas de combustão, características técnicas na seleção de turbomáquina e impacto na geometria dos coletores solares na absorção da radiação.

O capítulo quatro, resumem-se os principais resultados de capacidades energéticas de várias tecnologias e discutem-se estes resultados.

No capítulo cinco, conclui-se à cerca do desenvolvimento deste trabalho no que diz respeito à armazenamento de energia e propõem-se trabalhos futuros sobre o mesmo tema.

E por fim, uma lista de referências utilizados ao longo do trabalho.

2. Revisão bibliográfica

Este capítulo descreve-se o desenvolvimento da utilização de energia, desde o início do aproveitamento dos recursos naturais e o seu armazenamento até a exploração de novas energias, por exemplo o hidrogénio.

2.1. Armazenamento de energia de matérias-primas

Uma forma mais simples de obter energia consiste na utilização de fogo. A obtenção da energia térmica consiste, por exemplo, na queima da madeira, de combustíveis fósseis, normalmente hidrocarbonetos como, por exemplo, o gás natural.

Neste subcapítulo irá abordar-se estas fontes naturais de energia, que constituem recursos fundamentais para produção de energia térmica ou elétrica, que alimenta grande parte de fábricas de produção.[1]

2.1.1. Madeira/carvão vegetal

A madeira tem sido usada para converter o calor há milhares de anos, usada para preparar o alimento ou para garantir o conforto térmico nas casas. Com a sua queima liberta a energia por meio de uma chama, aproveitando assim a energia térmica.

Pode-se adquirir este material através da recolha de pedaços de madeira mais pequena na floresta, ou corte das árvores.

É conveniente armazenar lenha na época quente do ano, mesmo que não seja utilizada, para mais tarde, na época de inverno ser usada.

Há muitos anos, o carvão vegetal é obtido por queima da madeira com pouca quantidade de oxigénio, assim, algumas das substâncias voláteis da madeira são eliminadas. Esta nova composição contém alto teor de carbono, isto é, tem poder calorífico mais alto do que a madeira. O carvão tem maior eficiência a armazenar e utilizar para produzir calor. Contudo, este resultado serve como exemplo típico da conversão de um elemento que contém menor capacidade energético em um elemento de maior valor energético.[1]

2.1.2. Carvão mineral

O carvão mineral é outro recurso natural que contém alto teor de carbono. Desde o seu descobrimento, é usado para a queima, por exemplo em caldeiras. O carvão mineral, em

máquinas a vapor (estacionárias ou em comboios) trouxe alto crescimento económico a partir do século dezassete.[1]

Estes materiais sólidos são descritos com várias tipologias distintas de diferentes conteúdos energéticos. A forma do carvão mais económico e fácil de armazenar e transportar, é chamado carvão duro, antracite, entre todos os tipos de carvão, é o que tem maior capacidade de energia por unidade de peso, os outros tipos de carvão são carvão turfa, carvão Lignite, carvão sub-betuminoso/betuminoso.[1] Na Figura 1 demonstra esse desenvolvimento.

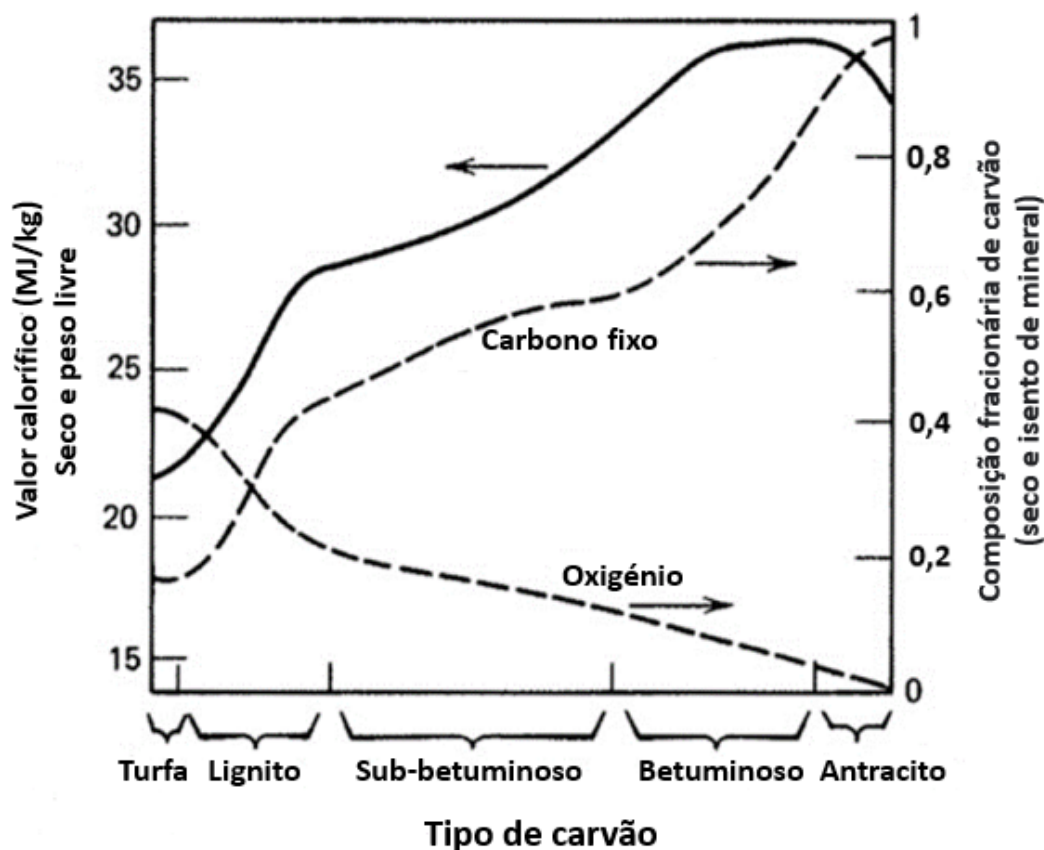


Figura 1 - Gráfico traduzido para os tipos de carvão[1]

O carvão, tal como a madeira, pode ser aquecido com o ambiente baixo em oxigénio, com o resultado de um novo produto, coque, carvão processado utilizado no alto-forno para produção de ferro, e devido à sua porosidade, dureza e o teor de carbono, tem maior eficiência de armazenamento e consegue fornecer energia suficientes para atingir valores altos de temperaturas na produção.[1]

2.1.3. Petróleo/Petróleo bruto

Outro combustível fóssil semelhante ao carvão é o petróleo. Este material como fonte de energia é relativamente recente comparativamente ao carvão.

O petróleo é extraído no estado líquido, o que o torna mais vantajoso que outros combustíveis sólidos, isto é, a queima de substâncias no estado líquido é mais completa do que no estado sólido, o que quer dizer que, com este componente fóssil, obtém-se uma maior quantidade de energia. Além disso é mais eficaz no seu armazenamento, tendo um valor de energia específica aproximadamente de 42 kJ/kg. A sua reserva torna-se uma medida do ponto de vista estratégico para qualquer país.[1] Na Tabela 1, apresenta a data e o local de descobrimento de petróleo a nível mundial.

Tabela 1-Descobrimto de campos de petróleo-Local e Data[1]

Primeiras descobertas	
Perto de Bakku, no Mar Cáspio	Cerca de 1849
Bend, norte de Bucareste, Romênia	1857
Oil Springs, Ontário, Canadá	1858
Drake, perto de Titusville, PA, EUA	1859
Primeiros grandes campos de petróleo descobertos	
Spindletop, perto de Beaumont, TX, EUA	1901
Outros em Oklahoma e Califórnia, EUA	Pouco tempo depois
Descobertas no Médio Oriente	
Bahrein	1920
Kirkuk no Iraque	1927
Gachsaran no Irã	1935
Dammam na Arábia Saudita	1938
Abqaiq na Arábia Saudita	1940
Ghawar na Arábia Saudita	1948-1949
Alasca, EUA	
Baía de Prudhoe	1968
Áreas do Mar do Norte	
Anos quarenta, Reino Unido	1970
Ekofisk, Noruega	1971
Brent, Reino Unidos	1971

América do Sul	
Venezuela	1988

2.1.4. Gás natural

O gás natural, constituído essencialmente de metano, CH_4 , é usado como combustível na produção de eletricidade em turbinas a vapor e turbinas a gás de alta temperatura. É um elemento limpo na queima, comparado com combustíveis sólidos, pois não produz cinzas. Tem também a vantagem de se poder armazenar no estado líquido, facilitando o processo de transporte do gás natural. Pode ser utilizado para aquecimento e na confeção de alimentos, e também como combustível para automóveis em vez de gasolina ou gasóleo.[1]

A camada de gás natural no processo de extração, é normalmente associado aos combustíveis fósseis líquidos e nas reservas de carvão, também pode-se encontrar no fundo de oceano. Em altas pressões subterrâneas, o gás natural é dissolvido no petróleo e é frequentemente emitido quando o petróleo é bombeado para a superfície (pressão mais baixa). O poço de gás é frequentemente perfurado a profundidades consideravelmente mais profundas do que os campos de petróleo.[1]

O gás natural, além de metano, tem um peso significativo em substâncias de hidrocarbonetos mais pesados, como etano, propano, butano etc. Muitas vezes o gás natural liberta poluentes para atmosfera, sendo um deles o CO_2 , que se liberta inevitavelmente em todos os tipos da queima, provocando o aquecimento global devido a efeitos de estufa.[1]

2.1.5. Hidrato de metano

Existe uma grande possibilidade de outro meio de recurso natural que pode ser utilizado na produção de energia, o hidrato de metano, que apresentam uma estrutura de gelo de água, e contém uma elevada quantidade de metano.

Estes materiais só foram reconhecidos nos anos setenta do século vinte, são comuns de serem encontrados na camada superficial de oceano, a menos de dois mil metros de profundidade, e normalmente espalhados ao longo das plataformas continentais, ou nos lagos profundos.

Apesar de ainda estarem no processo de investigação, este elemento demonstra um potencial como fonte de energia, a quantidade de reserva mundial é estimada em pré-estudo é de quinhentos a dois mil giga toneladas.[1]

2.1.6. Hidrogénio

Nas últimas décadas, a palavra hidrogénio é cada vez mais conhecida por institutos da investigação de energia sobre forma de recursos renováveis.

Hidrogénio não é de toda a forma considerado como uma fonte de energia, pois na produção do mesmo é exigido o uso de energias adicionais, como combustíveis fósseis ou energias renováveis. Então o termo mais correto para o classificar é como um portador de energia, ou vetor energético.

Até ao momento, a aplicação de hidrogénio no mercado ocupa uma fração muito pequena. O método mais barato de obter o hidrogénio é tratar com temperaturas elevadas o gás natural, que constitui noventa e cinco por cento de obtenção total de hidrogénio.

Este material tem tendências futuras na aplicação como energia renovável, que será abordado nos capítulos seguintes.[1]

2.1.7. Combustíveis derivados da reação química

Os combustíveis derivados de reações químicas são diferentes dos combustíveis apresentados anteriormente. Este não é um recurso natural, mas sim um recurso artificial, pois a sua produção depende da origem das fontes de energia que são utilizadas.

Foi descoberto um tipo de planta chamado "Raps", na linguagem alemã, que pode ser usado na produção de um óleo natural, substituindo o gasóleo. Outros materiais biológicos, como colza, soja, óleo de palma ou alguns frutos secos que contêm alta quantidade de óleo vegetal, também podem ser utilizados na produção de combustíveis. Além disso, é indispensável considerar plantas ricas em açúcar, como cana-de-açúcar, beterraba sacarina e sorgo doce. No processo de fermentação, é possível extrair o álcool etílico, que pode ser aplicado como combustível líquido.

Uma possível gestão económica de energia envolve o armazenamento. É possível utilizar esses biocombustíveis nos constituintes de combustíveis naturais, evitando assim o uso excessivo de energias fósseis. Esta mudança obriga uma adaptação da parte mecânica dos motores de carro.

Em suma, os materiais como o hidrogénio não são estáveis o suficiente para substituir os combustíveis fósseis, mas no futuro a sua utilização poderá se tornar mais económica na produção, e o armazenamento com melhor eficiência, o que terá impacto positivo no mercado de energia.[1]

2.2. Armazenamento de energia térmica

O armazenamento de energia térmica (TES) é uma tecnologia crucial para a conservação de energia, especialmente em aplicações de aquecimento e arrefecimento. A energia térmica é um dos aproveitamentos de energia mais antigo, desde a existência das primeiras civilizações. Este tipo de energia é normalmente dividido em dois componentes de armazenamento:

- Calor sensível – usa a elevação de temperatura em matérias como água ou rocha;
- Calor latente – usa a mudança de fase através de passagem do estado sólido para líquido ou de líquido para gasoso.

A escolha do tipo de armazenamento de energia térmica depende do período em questão, e, por sua vez, essa escolha está condicionada ao fator de custo de armazenamento e à eficiência de aplicação. Isso significa que é necessário ter uma gestão energética bem fundamentada e uma avaliação de desempenho na transição das fontes de energia para o destino de utilização, de forma a minimizar os desperdícios ou as perdas de energia ao longo do processo.[2]

2.2.1. Propriedades de termodinâmica e calor específico

O conceito de calor específico está relacionado com a quantidade de calor que uma substância pode armazenar. Ele distingue-se de outras noções básicas, como energia interna, entalpia e entropia específicas. Essas propriedades termodinâmicas envolvem vários fatores de características distintas, especialmente a temperatura e pressão do ambiente, e, por sua vez, também dependem do calor específico do material.

A energia interna reflete o comportamento das moléculas em um sistema, enquanto a energia interna específica quantifica essa energia por unidade de massa. Essa propriedade está diretamente relacionada à variação de temperatura e pressão. Num sistema fechado, onde o atrito é desprezado, o trabalho mecânico é dominado pelo trabalho de expansão pressão/volume, como por exemplo o sistema de pistão-cilindro.

A entalpia específica é outra forma de medição de energia por unidade de massa, expressa em quilojoules por quilograma (kJ/kg) no sistema internacional (SI). As dependências desta propriedade são semelhantes às da energia interna, uma vez que a entalpia se relaciona com o calor específico de uma substância a pressão constante, enquanto a energia interna se relaciona com o calor específico a volume constante.

A variação de entropia é calculada através da razão entre o calor adicionado à substância e a temperatura absoluta durante o processo da desordem das moléculas do próprio elemento.[1], [2]

2.2.2. Calor sensível

O armazenamento de energia térmica num determinado material pode ser realizado simplesmente por aquecimento a uma temperatura elevada. À transferência de energia térmica para o corpo sem que ele sofra uma mudança de fase, apenas variando a sua temperatura, é chamada de calor sensível.

O calor sensível pode ser transferido para outro sistema com temperatura mais baixa por meio de radiação, convecção (forçada ou natural) ou condução. Uma forma eficaz de armazenar o calor é transferir essa energia para um material bem isolado termicamente até ao momento da sua utilização. Um método tradicional é usar uma bolsa de água quente para pré-aquecer a cama antes de dormir.

O aproveitamento da energia solar é um dos métodos que envolve o armazenamento do calor fornecido pelo sol por meio de um painel solar térmico. Um reservatório isolado é utilizado para armazenar a energia solar na água, sem permitir que ela atinja o estado de vapor. Dessa forma, os residentes da casa podem utilizar a energia armazenada no reservatório quando necessitam de água quente. Este tipo de armazenamento de energia tem sido bastante utilizado para o controlo da temperatura do espaço residenciais ou de trabalho.

O uso do material de armazenamento, considerando a quantidade necessária, o custo deste elemento é um vetor diretivo na técnica de gestão energética. Frequentemente, as suas implicações na escolha do material são importantes para serem utilizadas em projetos relacionados a questões energéticas. Com isto, a Tabela 2 apresenta a massa volúmica e o calor específico dos materiais mais comuns, na gama de temperatura de 5 a 95 °C.[1]

Tabela 2-Tabela traduzido das propriedades térmicas de algumas materiais[1]

Material	Massa volúmica ($kg\ m^{-3}$)	Calor específico ($J\ kg^{-1}\ m^{-3}$)
Barro	1458	879
Tijolo	1800	837
Arenito	2200	712
Madeira	700	2390
Betão	2000	880
Vidro	2710	837
Alumínio	2710	896
Aço	7840	465
Magnetite	5177	752
Água	988	4182

2.2.3. Calor latente

Outro mecanismo de armazenamento de energia é realizado através do calor latente. Esse método concentra-se no armazenamento de calor por meio de mudanças de fase, sem alterar a composição química do material envolvente.

As mudanças de fase em alguns materiais são avaliadas pela variação na composição química. No caso de uma mudança de fase congruente, como ocorre na fusão do alumínio, a transição do estado sólido para o estado líquido não implica em alteração na composição química.

Por outro lado, existe a mudança de fase em elementos que mantêm a sua composição química durante a transição. Isso pode levar à destruição e reformação da estrutura cristalina, resultando valores diferentes de entropia e entalpia como consequência desse processo.

Neste contexto, o calor latente é absorvido ou fornecido a uma temperatura constante, ao contrário do calor sensível, que ocorre ao longo de uma faixa de temperatura. Como resultado, o tamanho do depósito de armazenamento no processo de calor latente é geralmente muito menor em comparação com o de calor sensível com capacidades semelhantes.

O comportamento da água é estudado com grande importância desde os primórdios da revolução industrial. Esta substância é bastante útil para armazenar calor uma vez que, a água consegue absorver e liberar energia com facilidade, apresentando menor custo associado à permuta de energia térmica.

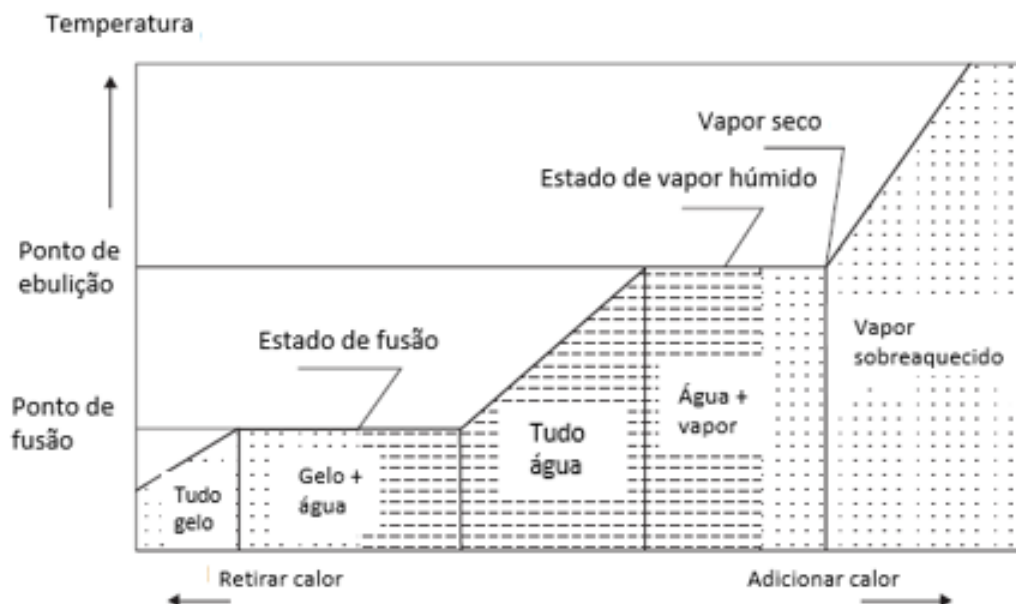


Figura 2 – Gráfico traduzido da evolução de estado de água[2]

O gráfico apresentado na Figura 2, ilustra a transformação da água com a adição ou rejeição de calor. A estabilidade da água nas fronteiras de cada estado é investigada devido a seu comportamento notável. A energia livre de Gibbs, ou potencial químico, demonstra essa estabilidade ao ser contínua em cada estado, a inclinação na curva com temperatura é inversamente proporcional ao valor da entropia, que é diferente em cada estado devido às distintas estruturas de composição. Essas observações são destacadas na Figura 3.[1], [2]

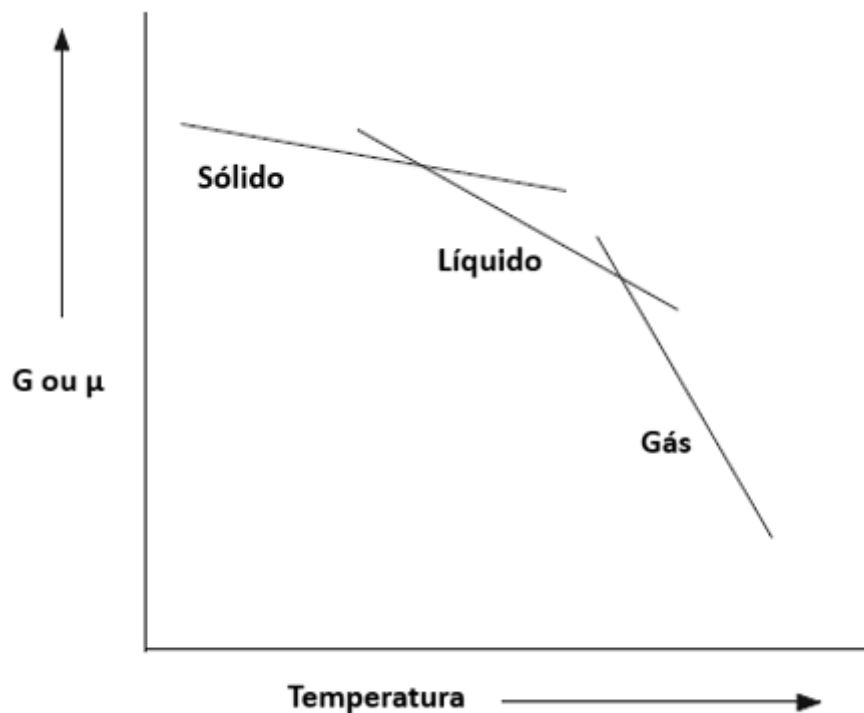


Figura 3 Gráfico traduzido de diferentes estados em função da temperatura[1]

2.2.4. Material de mudança de fase (PCM)

“Os materiais a serem utilizados para armazenamento de energia térmica por mudança de fase devem ter grande calor latente e alta condutividade térmica”. [3]

Neste contexto, são realizados alguns estudos sobre materiais de mudança de fase, PCM, nos quais esse tipo de material é crucial para o armazenamento de energia solar, pois necessita de um material que seja capaz de receber energia na forma de calor e, assim que a recebe, seja capaz transportá-lo de forma eficiente para o destino. Este material deve apresentar as características como, a temperatura de fusão entre os limites das operações práticas, estáveis nas suas ligações moleculares, baratos, não tóxicos, corrosivos, etc.[3]

No uso prático, os PCMs que têm pontos de fusão abaixo de quinze graus Celsius são geralmente utilizados para retirar energia do ambiente, como, por exemplo, em sistemas de ar condicionado. Já os materiais cujos pontos de fusão estão acima de noventa graus Celsius são normalmente utilizados para armazenar calor que lhes é fornecido como o caso da refrigeração por absorção, promovendo a evaporação do fluido refrigerante.

Além dos materiais mencionados, os PCMs com ponto de fusão entre 15 a 90 graus Celsius são utilizados no aquecimento solar, a qual se integra na gama de ser fácil da utilização, ou seja, é mais comum a sua aplicação em locais residenciais para armazenamento de energia.[3]

Existem algumas diferenças, nomeadamente, entre os materiais de mudança de fase orgânicos e inorgânicos. A Tabela 3 apresenta algumas vantagens e desvantagens desses materiais.

Tabela 3-Tabela traduzido da comparação de PCM orgânicos e inorgânicos[3]

Materiais	Orgânicos	Inorgânicos
Vantagens	• Não corrosivo; • Baixo sub-arrefecimento; • Quimicamente e termicamente estável.	• Maior entalpia na mudança de fase.
Desvantagens	• Menor entalpia na mudança de fase; • Baixa condutividade térmica; • Inflamabilidade.	• Apresenta sub-arrefecimento; • Corrosivo; • Termicamente instável.

Em seguida, é apresentada na Tabela 4 com alguns critérios desejáveis dos PCMs que devem ser consideradas na procura do mesmo para sistemas de armazenamento de energia térmica.

Tabela 4 – Critérios desejáveis dos PCMs[3]

Propriedades	Critérios	Observação
Térmico	• Temperatura apropriada de fusão-solidificação; • Alto calor latente de fusão.	A alta condutividade térmica melhora a carga e descarga do armazenamento de energia.
Físico	• Alta massa volúmica; • Menos mudança de volume.	A alta massa volúmica permite um tamanho mais pequeno de recipiente de armazenamento.
Cinético	• Alta resistência ao resfriamento; • Cristalização suficiente	O sobre arrefecimento tem sido um aspecto preocupante do desenvolvimento do PCM.
Químico	• Estabilidade química a longo prazo; • Não tóxicos.	Os PCMs devem ser não tóxicos, não inflamáveis e não explosivos por questões de segurança.
Económico	• Barato / Económico e disponível	O baixo custo e a disponibilidade em larga escala do PCM também são muito importantes.

2.3. Armazenamento de energia mecânica

Este capítulo aborda a metodologia de armazenamento de energia mecânica, na qual o aproveitamento da energia mecânica clássica direciona-se à energia potencial e à energia cinética. Um exemplo típico é um pêndulo que, desprezando o efeito do atrito, é elevado a uma determinada altura. Ao soltar esse mesmo pêndulo, ocorre o processo de conversão de energia potencial para energia cinética. Este método de conservação de energia mecânica é utilizado até ao momento atual em algumas circunstâncias, dando-se a transformação de forma imediata.[4]

Outras formas de armazenamento de energia mecânica podem ser realizadas através do movimento linear ou rotacional de um objeto, do processo de compressão, da deformação de um material elástico, etc.[2] Neste trabalho, abordam-se apenas alguns exemplos mais recorrentes da conservação de energia mecânica.

2.3.1. Energia armazenada por volantes

O sistema de armazenamento de energia com volante é caracterizado por um objeto cilíndrico ou disco que segue um movimento rotacional em torno de seu eixo central. Quando armazena quantidades pequenas de energia, o volante tem uma espessura menor que seu raio, assumindo a forma de um disco. Quando é necessário conservar grandes quantidades de energia, a sua espessura é maior que seu diâmetro.

Este sistema, na sua forma mais básica, é constituído por três elementos principais: um motor elétrico/gerador, o cilindro/disco e um veio que os conecta. Na Figura 4 apresenta uma geometria de um corpo cilíndrico com uma análise vetorial do movimento.[4]

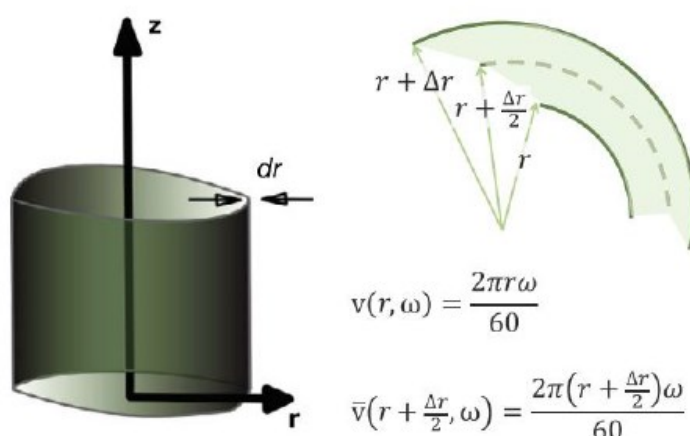


Figura 4 – Representação esquemática do sistema de volante[4]

A quantidade de energia armazenada em sistemas de armazenamento de volante é geralmente pequena, uma vez que é limitada pelo material usado, normalmente aço, que possui uma grande densidade. Isso resulta na necessidade de um suporte mais robusto, levando a velocidades de rotação mais baixas.[5]

Atualmente, já existem volantes constituídos por materiais compostos, o que proporciona uma vantagem em comparação com o aço. Com o mesmo tamanho de volante, esse novo material é mais leve do que o aço, permite suportar maiores forças centrífugas e alcançar altas velocidades de rotação, Tabela 5. Isso resulta em uma maior capacidade e eficiência no armazenamento de energia.[2]

Tabela 5 - Algumas propriedades dos materiais para volantes [2]

Materiais	Massa volúmica (kg/m³)	Tensão (MN/m²)	Resistência específica à tração (MN.m/kg)
Aço (AISI 4340)	7800	1800	0,22
Liga (AlMnMg)	2700	600	0,22
Titânio (TiAl ₆ Zr ₅)	4500	1200	0,27
CFRP (60% de vidro E)	2000	1600	0,80
CFRP (60% HT C)	1500	2400	1,60

2.3.2. Energia hidroelétrica

O aproveitamento de energia hídrica é um processo amplamente conhecido por transformar a energia potencial em energia elétrica, possuindo grandes capacidades de armazenamento de energia a longo prazo. Esse sistema requer pouca tecnologia, aproveitando principalmente a queda da água transferida de uma altura mais elevada para um local mais baixo.[4]

A utilização da energia hídrica, num processo de aproveitamento de recursos naturais, segue o ciclo hidrológico, Figura 5, também conhecido como ciclo da água.

Neste processo, a água é armazenada naturalmente nos oceanos e lagos, nas águas subterrâneas e até mesmo na forma sólida, como gelo nas regiões mais frias.

Este ciclo proporciona a base para a geração de energia hídrica em diversas formas, aproveitando a energia cinética associada ao movimento da água.



Figura 5 – Representação esquemática do ciclo de água [6]

Na gestão de recursos de energia, por meio do sistema de armazenamento de hidrelétrico bombeado, é adicionada uma unidade de bombeamento à instalação. Ao contrário das turbinas em conjunto com geradores elétricos, essa unidade de bombeamento eleva a água do reservatório de nível baixo para o reservatório de nível alto.

Este método é geralmente utilizado durante a noite, um período de baixo consumo de eletricidade. Isso ocorre porque o armazenamento de eletricidade apresenta algumas limitações em termos de capacidade e custo. Torna-se mais eficiente o armazenamento da energia na forma de material físico, a água, como demonstrado no esquema da Figura 6. Durante o período de alto consumo de energia, a água é libertada do reservatório ou barragens, passa pela unidade de turbina de água, e assim gera a eletricidade que posteriormente é conectada à rede de distribuição elétrica e por fim chega aos locais de consumo.[2], [4], [7]

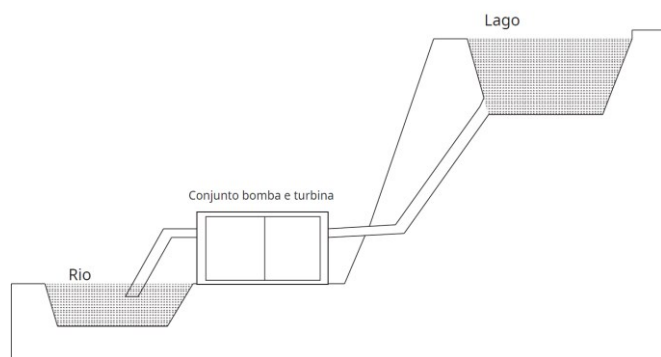


Figura 6 – Esquema traduzido de um sistema de bombeamento de água[2]

Por outro lado, essa metodologia pode ser implementada a nível subterrâneo. Ao utilizar um reservatório na superfície e outro abaixo da terra com uma certa profundidade, instala-se o

conjunto de equipamentos para geração de energia. Desta forma, realiza-se a gestão dos recursos utilizados na conversão de eletricidade, semelhante ao processo de bombeamento de água para barragens. A Figura 7, demonstra um esquema do funcionamento de bombeamento de água subterrâneo.

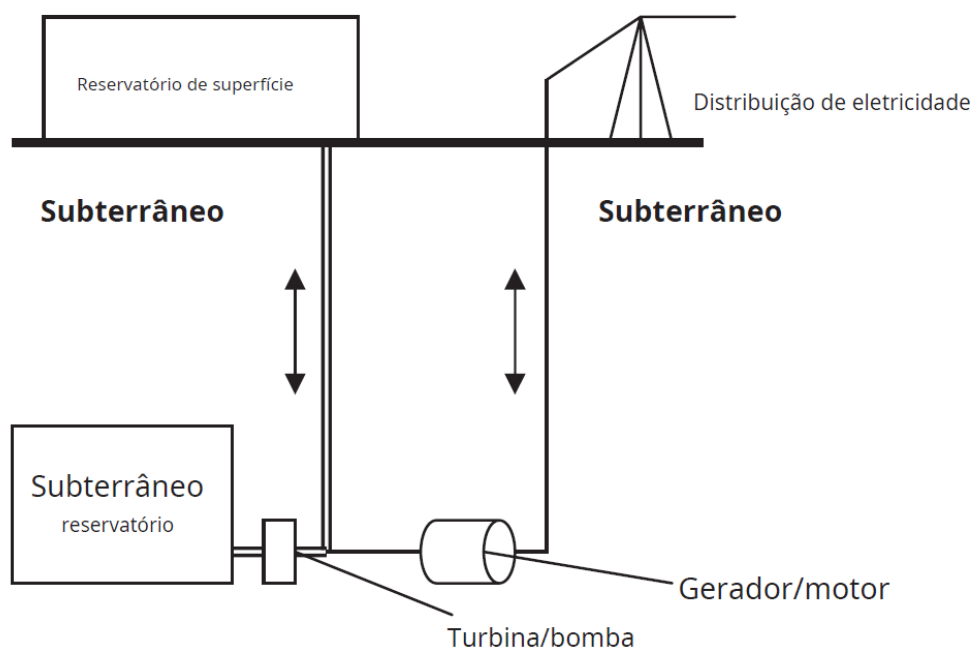


Figura 7 – Esquema traduzido do funcionamento de bombeamento de água subterrâneo [2]

2.3.3. Energia das ondas do oceano e marés

O processo de transformação de energia das ondas das marés consiste em aproveitar a energia cinética gerada pelo movimento das ondas, bem como a energia potencial resultante da variação de altura entre dois níveis distintos.

A turbina instalada na barreira entre a área de armazenamento da água do mar e o oceano é reversível, ou seja, pode operar nos dois sentidos. Durante o período de maré alta, a água enche o reservatório e, ao passar pela turbina, gera eletricidade devido o fluxo do movimento da água. Durante o período de marés baixas, o sentido do escoamento da água é invertido, e a turbina aproveita novamente o fluxo que passa por ela. Esse tipo de tecnologia é o exemplo típico de aproveitamento de energia potencial que o mar possui, Figura 8.[8]

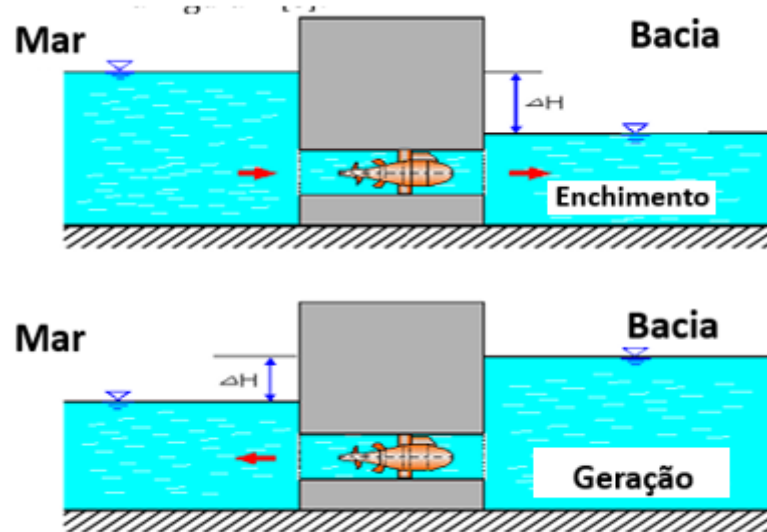


Figura 8 - Esquema traduzido do processo de enchimento e geração de aproveitamento de água do mar[8]

A utilização da energia cinética da corrente de ondas das marés é apresentada no princípio de funcionamento ilustrado na Figura 9. As ondas que atingem a instalação empurram o ar na direção da turbina, que age como o fluido de trabalho, gerando assim energia. Quando a onda recua, cria-se um vácuo dentro da instalação, e o movimento do ar inverte a sua direção, proporcionando um segundo aproveitamento da onda.[8]

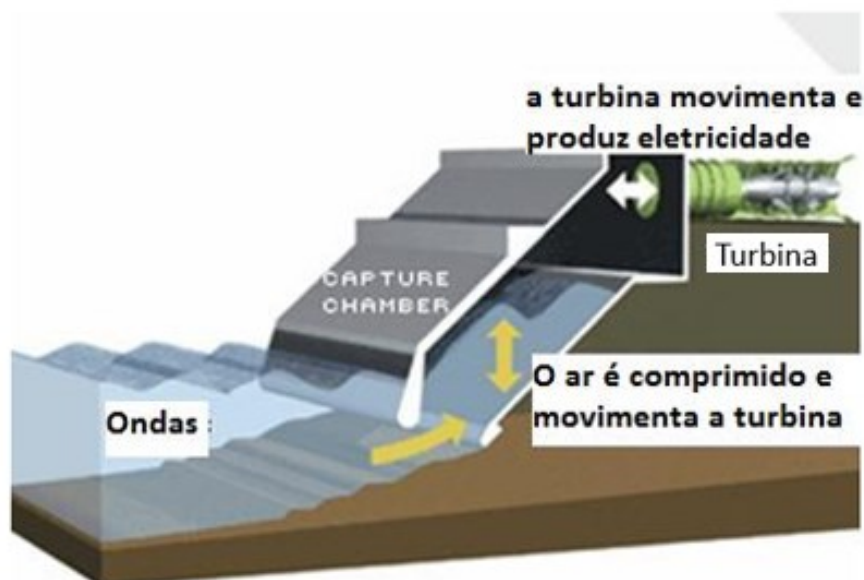


Figura 9 – Esquema traduzido do sistema de aproveitamento da energia da ondas[8]

2.3.4. Energia por ar comprimido

O sistema de armazenamento de energia a ar comprimido é outra forma que apresenta grandes capacidades de armazenamento e distribuição de energia, além do armazenamento de energia hidrelétrica. O funcionamento desse sistema consiste na utilização de turbinas a gás, com o ciclo de compressão e expansão. A energia é armazenada na forma de energia potencial elástica do ar comprimido em um espaço hermético, normalmente a uma pressão entre 4 MPa a 8 MPa. Para extrair a energia do ar comprimido, este é aquecido e depois expandido por uma turbina de alta pressão. O ar é misturado com o combustível e é queimado, havendo o escapamento de ar através de uma turbina de baixa pressão.

As duas turbinas estão conectadas a um gerador de eletricidade, convertendo a energia mecânica em eletricidade. O calor liberado durante o processo de conversão passa por uma unidade de recuperador de calor antes de ser libertado.[7] A Figura 10 ilustra essa metodologia.

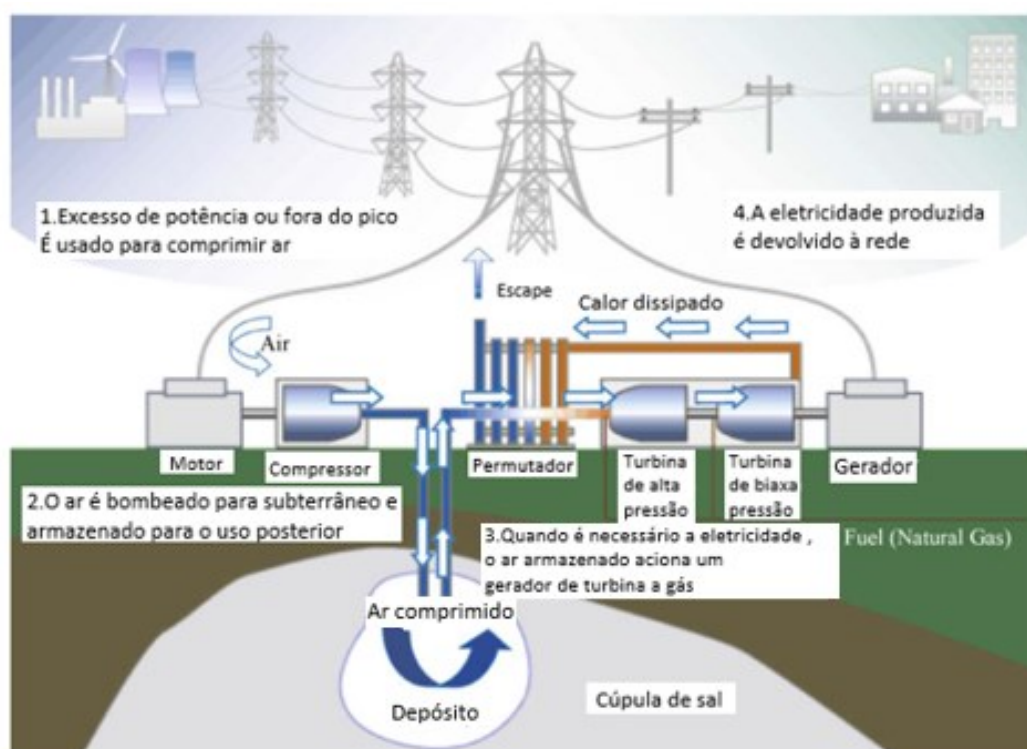


Figura 10 - Esquema traduzido do processo de armazenamento do ar comprimido[7]

2.4. Armazenamento de energia eletroquímica

A maioria da energia que chega ao seu destino para consumo é fornecida na forma de eletricidade, como mencionado em capítulos anteriores. Neste contexto, o armazenamento de energia elétrica torna-se bastante relevante, pois essa energia é fundamental para o cotidiano.

No setor de armazenamento de energia elétrica, existem dois grandes grupos, armazenamento em baterias e armazenamento em condensadores eletroquímicos.[9]

Estas formas de armazenamento têm amplas utilizações, desde os dispositivos portáteis, como computadores e telemóveis, ou até como auxílio das redes de distribuição de eletricidade.[1]

“O armazenamento de energia eletroquímica baseia-se em converter a energia química em energia elétrica, ou vice-versa”.[4] No caso das baterias, existem várias subcategorias com eficiências de armazenamento distintas, umas melhores do que outras. Os tamanhos das baterias também variam com a sua capacidade, e com a evolução das tecnologias. A tendência é de aumentar as capacidades de armazenamento e diminuir o volume ocupado pelo dispositivo.[9]

2.4.1. Baterias de chumbo ácido

Os usos das baterias de chumbo-ácido são bastante amplos no mercado e representam a primeira tecnologia de baterias recarregáveis. Os seus constituintes são simples, como demonstrado na Figura 11. Devido à evolução da tecnologia, essas baterias têm um custo de produção baixo. No entanto, o processo de carregamento é demorado e elas não são totalmente descarregadas. Além disso, devido à sua simplicidade, o número de ciclos de carga e descarga também é bastante limitado.[10]

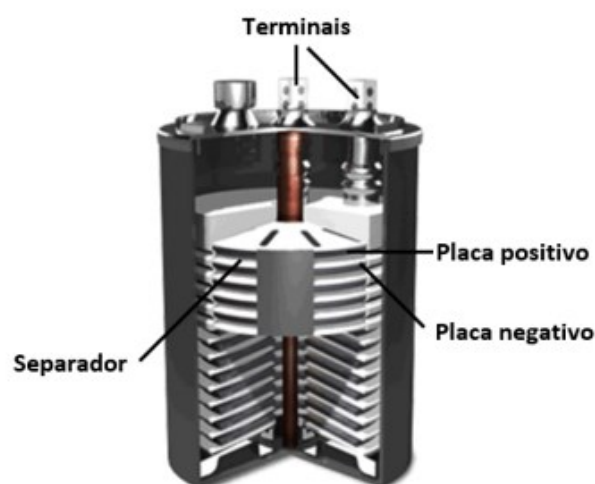


Figura 11 – Esquema traduzido da bateria de chumbo ácido[10]

No processo de fabrico desse tipo de baterias, é fundamental a considerar a segurança da sua produção, uma vez que o chumbo e o ácido sulfúrico são altamente tóxicos, apresenta riscos para as pessoas e para o ambiente.[10]

2.4.2. Baterias de iões de lítio

As baterias de iões de lítio tem uma percentagem significativa nos mercados de consumo portátil, e cada vez mais a ser estudados pelos mercado dos veículos híbridos e elétricos.[10]

A tendência da tecnologia desta bateria leva o crescimento da quantidade, qualidade e do custo da fabricação. Por outro lado, a instalação das baterias de iões de lítio é aplicada no armazenamento da energia e distribuição de eletricidade na rede. Procurando-se minimizar o custo do seu fabrico, aumentar a sua vida útil e melhorar a eficiência de carga e descarga de energia.[10] Na Figura 12, apresentam-se os componentes de uma bateria de iões de lítio.



Figura 12 -Esquema traduzido da bateria de íon de lítio[10]

2.4.3. Baterias de níquel-cádmio

As baterias de níquel-cádmio dividem-se em dois tipos de estruturas, a estrutura selada, representada na Figura 13, e a estrutura ventilada, representada na Figura 14. O elemento que atua como elétrodo negativo (material ativo) é oxi-hidróxido de níquel, enquanto o elétrodo positivo é composto por cádmio metálico, sendo ambos separados por uma placa de nylon.

Durante o funcionamento da descarga, o oxi-hidróxido de níquel reage com a água, produzindo hidróxido de níquel, e o elétron negativo resulta em hidróxido de cádmio.

O processo de carregamento da bateria pode ser invertido, nessa inversão, o elétron positivo produz oxigénio, e o elétron negativo resulta em hidrogénio.

Recentemente, esse tipo de bateria tem-se tornado cada vez mais popular para armazenar a energia gerada por painéis solares.[10]

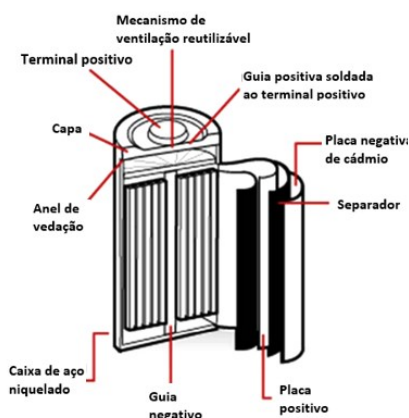


Figura 13 - Esquema traduzido da bateria de níquel-cádmio, estrutura selada[10]

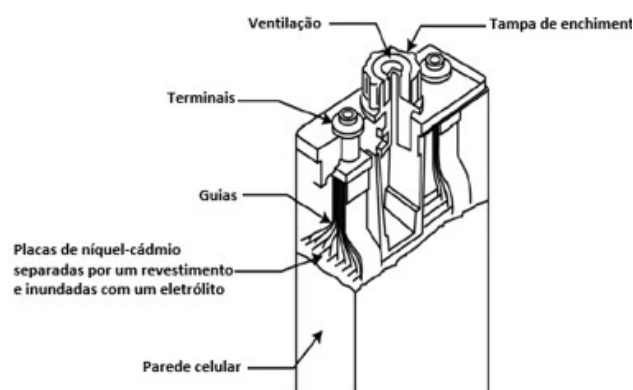


Figura 14 - Esquema traduzido da bateria de níquel cádmio, estrutura ventilada[10]

As baterias de níquel-cádmio com estrutura selada são recarregáveis e geralmente utilizadas em controladores remotos. Quando utilizadas corretamente, essas baterias não libertam gases, a menos que ocorra algum erro no processo de transformação. Já as baterias ventiladas de níquel-cádmio possuem os mesmos princípios de estrutura que as seladas. No entanto, durante operações de sobrecarga e descarga rápida, elas libertam oxigénio e hidrogénio por meio de uma válvula de baixa pressão, tornando essa estrutura mais segura e estável em comparação com as estruturas seladas. Além disso, as baterias com estrutura ventilada são mais leves e económicas.[10]

2.4.4. Baterias de sódio-enxofre

As baterias de sódio-enxofre são, de facto, um tipo de bateria recarregável que faz uso da tecnologia de alta temperatura envolvendo sódio metálico. Elas são particularmente atrativas para aplicações de armazenamento de energia em larga escala. Essas baterias são compostas por um metal fundido de sódio e enxofre, conforme ilustrado na Figura 15.[10]

Uma das principais vantagens desse tipo de bateria é sua alta eficiência de carga e descarga, juntamente com uma durabilidade significativamente prolongada. Além disso, os materiais utilizados na fabricação são geralmente acessíveis em termos de custo.[10]

No entanto, apesar de suas vantagens, as baterias de sódio-enxofre enfrentam desafios. As suas temperaturas operacionais elevadas, que variam de trezentos a três mil graus Celsius, e a sua

natureza altamente corrosiva são limitações substanciais. Essas condições tornam difícil a produção em larga escala dessas baterias.[10]

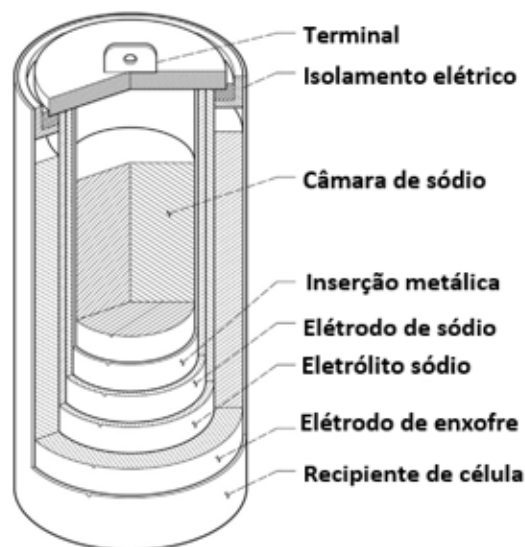


Figura 15 - Esquema traduzido da bateria de sódio-enxofre [10]

2.4.5. Baterias de fluxo

As baterias de fluxo são tipos de baterias que operam com um ou mais eletrólitos que fluem para uma célula eletroquímica, onde são convertidos em eletricidade. Nesse processo, o eletrólito adicional é armazenado num tanque e bombeado para a célula do reator. O diferencial das baterias de fluxo é a capacidade de recarga rápida alcançada, substituindo o líquido eletrolítico, que é alimentado por uma bomba ou sistema de fluxo.[10]

As baterias de fluxo dividem-se em várias classes, nomeadamente as baterias de fluxo "redox" (oxidação-redução) e as baterias de fluxo híbridas. A maior diferença entre elas é que as baterias "redox" dependem do volume do eletrólito, enquanto as híbridas dependem do tamanho do eletrodo da bateria.[10]

- **Bateria de redox de vanádio**

As baterias de fluxo "redox" de vanádio, um tipo específico de bateria de fluxo, operam com íons de vanádio em diferentes estados de oxidação, armazenando assim a energia química, conforme demonstrado na Figura 16. Esta tecnologia é considerada limpa, apresenta alta eficiência e um ciclo de vida longo. A principal razão para o uso desse tipo de bateria é sua grande capacidade armazenamento de energia, é tanto maior, quanto o tamanho dos tanques utilizados. O processo de descarregamento pode ser completo e por um período bastante prolongado sem causar efeitos nocivos, e a bateria pode ser recarregada substituindo o eletrólito quando não há fontes de energia disponíveis para recarregá-la.[10]

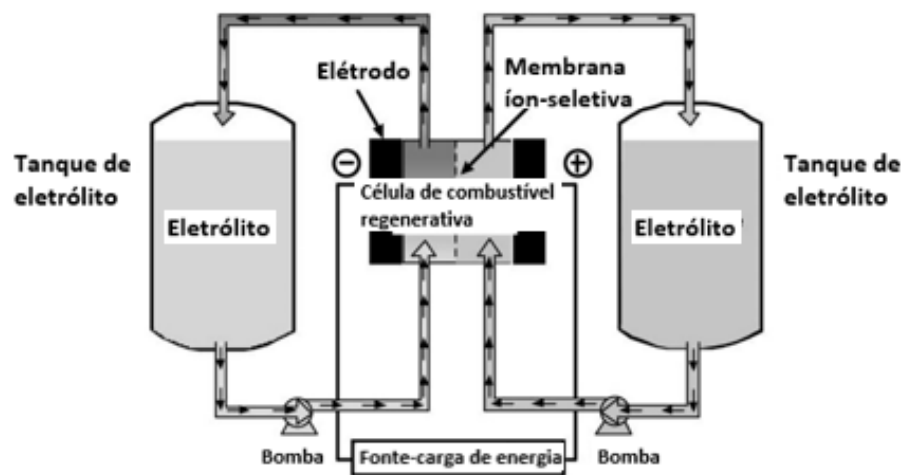


Figura 16 - Esquema traduzido da bateria de redox de vanádio[10]

- **Bateria de zinco-bromo**

O outro tipo da bateria de fluxo é bateria de zinco-bromo, que faz parte das baterias de fluxo híbrido, e é armazenado em dois tanques, como mostrado na Figura 17. O esquema de funcionamento desta bateria durante o processo de carregamento e descarregamento envolve o bombeamento dos eletrólitos por meio de uma célula de reator e que retorna finalmente aos tanques. Esta célula pode ser descarregada completamente sem sofrer danos. As baterias de zinco-bromo apresentam alta densidade de energia, têm a capacidade de descarregar completamente e possuem um ciclo de vida elevado.[10]

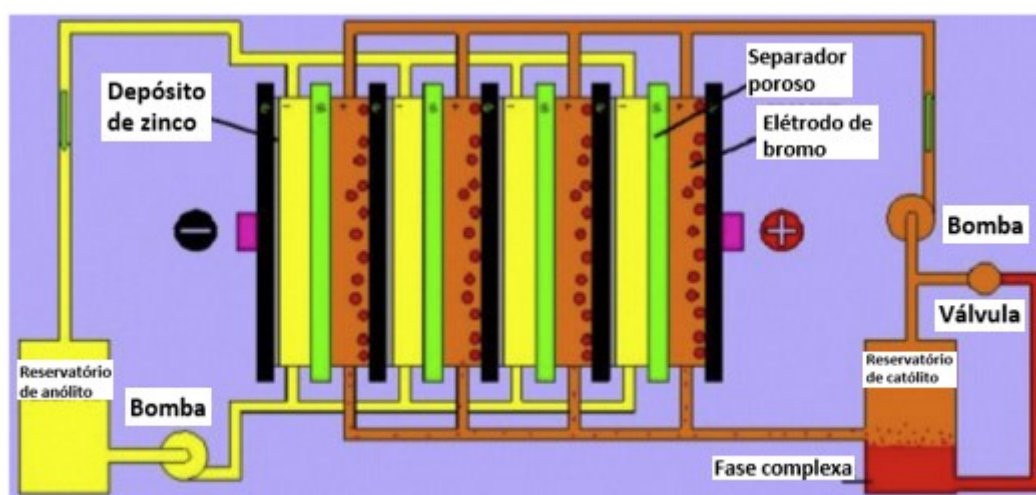


Figura 17 - Esquema traduzido da bateria de zinco-bromo [10]

3. Método de transformação de energia e capacidade de armazenamento

Este capítulo demonstra algumas tecnologias de armazenamento de energia, as quais incluem células eletroquímicas, por exemplo baterias, sistemas de armazenamento hidroelétrico, armazenamento térmico, como painéis solares térmicos, e também sistemas de armazenamento de hidrogénio. Cada tipo de tecnologia tem as suas próprias vantagens e desvantagens em termos de capacidade de armazenamento, eficiência, custo e impacto ambiental.

3.1. Principais tipos de mecanismos de reação de células eletroquímicas

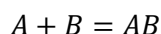
As células eletroquímicas ou baterias possuem o transporte de espécies químicas neutras para o interior ou exterior dos elétrodos. Os iões da bateria movimentam-se através do eletrólito, enquanto os eletrões de equilíbrio de carga se deslocam através do circuito elétrico externo. Este transporte de substâncias químicas resulta de várias circunstâncias, sendo uma delas a alteração da composição química da própria bateria, na fase em que esta se encontra. Esta alteração de constituição química designa-se como reações de reconstituição.

Os sistemas eletroquímicos geralmente operam em temperaturas constantes, ou seja, em sistemas isotérmicos. Isso é representado graficamente por uma evolução horizontal nos diagramas de fase.

Os principais tipos de reações de reconstituição no sistema de armazenamento de bateria envolvem reações de formação e reações de deslocamento, o que leva à introdução das reações de inserção. Estas desempenham um papel crucial na operação dos elétrodos em vários sistemas de baterias modernas importantes.[1]

3.1.1. Reações de formação

Uma forma mais simples de representar a reação de formação, pode ser expressa pela Equação 1. Um átomo “A”, parte de uma célula de eletroquímica, move-se através do eletrólito dessa bateria, promove assim a reação desse elemento com outro átomo “B”. Deste modo, forma-se uma nova composição AB. Esta alteração na microestrutura é também designada como reação de reconstituição.



Equação 1

Há diversos casos de reações que resultam na formação desse tipo de mistura. Além disso, é possível ocorrerem reações adicionais subsequentes, nas quais outras fases são criadas a partir da reação inicial.

O exemplo para ilustrar essa teoria é a reação de ligas de lítio-alumínio, conforme demonstrado na Figura 18. As suas propriedades termodinâmicas e cinéticas serviram como fundamentos essenciais nas células eletroquímicas de eletrólito de sal fundido desde o século passado. [11]–[13]

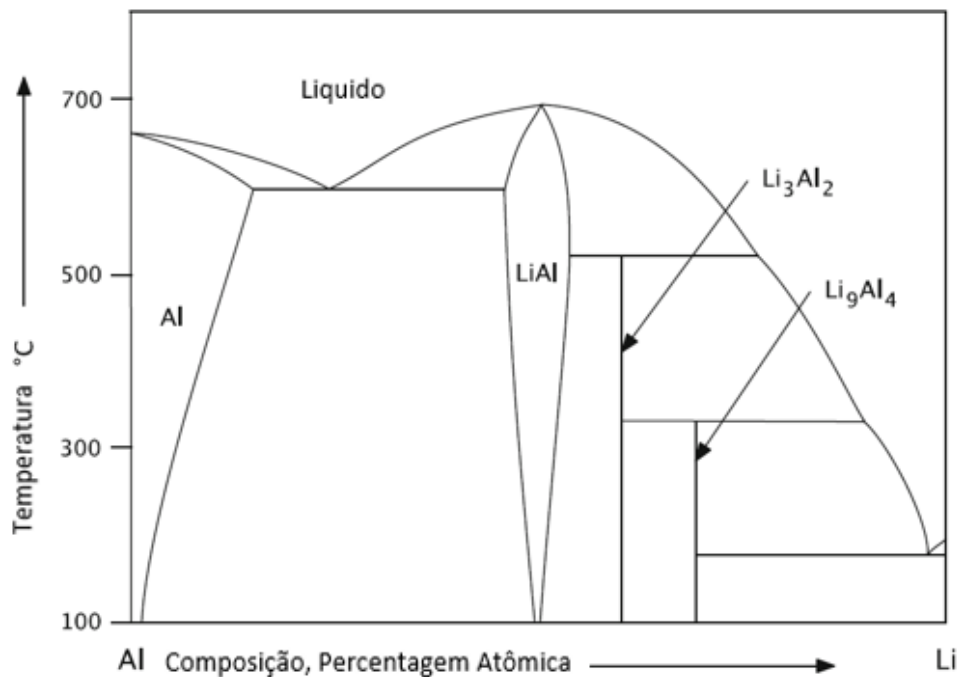


Figura 18- Diagrama traduzido de fases de equilíbrio do sistema alumínio-lítio[1]

Considerando que o eletrodo negativo é o lítio e o eletrodo positivo é o alumínio puro, ao aplicar corrente, carrega-se o lítio positivamente e o alumínio negativamente. Os íons de lítio assim irão fluir pela célula e reagir com o alumínio no eletrodo positivo, alterando a sua composição química.

Se essa reação ocorre a 100 °C (temperatura mais baixa no diagrama da Figura 18), e se as condições de equilíbrio fossem facilmente alcançadas, resultaria na formação inicial de uma solução sólida, na qual uma pequena quantidade de lítio se dissolve no alumínio.

À medida que mais lítio atravessa a célula, o limite de solubilidade do lítio em alumínio é alcançado, levando à transição para uma região do diagrama de fases, onde coexistem as fases no eletrodo positivo de alumínio saturado de lítio e de uma nova composição designada por "LiAl". Nesta parte do diagrama de fases, a reação de formação da composição da fase não segue precisamente uma proporção 1:1 entre Li e Al. Esta reação é demonstrada na equação 2.



Equação 2

Após a reação apresentada na Equação 2, ao continuar adicionando lítio, a composição geral transita da região de Al bifásico saturado para a região de "LiAl". Isso resulta em um aumento na formação de "LiAl" e numa diminuição na quantidade de Al saturado. Quando a composição geral alcança o limite de baixo teor de Li da região "LiAl", não há mais Al saturado presente na solução. Formando assim, novas composições como "Li₃Al₂" e "Li₉Al₄" apresentadas na Equação 3 e Equação 4.



Com a adição contínua de Li ao longo do processo, torna-se evidente que o potencial elétrico pode variar com a composição química dos eletrodos em sistemas de ligas como "Li-Al", bem como em outros que envolvem faixas de solução sólida ou reações multifásicas.

Além disso, não é necessário que ambos os reagentes nas reações de formação sejam sólidos ou líquidos. Por exemplo, a formação da fase "LiCl" pode resultar da reação do lítio com cloro gasoso, enquanto o "ZnO" pode ser produzido como resultado da reação do zinco com o oxigênio do ar. Esses processos eletroquímicos são comuns utilizados como fonte de energia em aparelhos auditivos.[1]

3.1.2. Reações de deslocamento

A reação de deslocamento pode ser apresentada com uma reação simplificada na Equação 5.



Nesta reação, a espécie A desloca para espécie B na fase binária simples BX para formar AX, cria-se uma fase composta pelo elemento B. A reação tende a ocorrer se a fase AX for mais estável do que a fase BX, produz assim uma força motriz para a reação.

Um exemplo para essa reação pode ser a reação do lítio com Cu₂O, que resulta na formação de duas novas fases: Li₂O e cobre elementar. Essa mudança no estado químico do eletrodo resulta numa alteração do seu potencial elétrico, como apresentado na Equação 6.[1]



3.1.3. Reações de inserção

A reação de inserção é um fenômeno peculiar que ocorre em sistemas químicos e eletroquímicos. Nesse processo, as espécies hóspedes são incorporadas em locais desocupados dentro da estrutura cristalina de um material hospedeiro estável. Embora a composição química do material hospedeiro possa ser alterada, a sua identidade e estrutura cristalina básica permanecem intactas, assim como as proporções das fases na microestrutura. No entanto, essa inserção muitas vezes resulta em mudanças de volume, que gera tensões mecânicas e energia mecânica. Essa energia mecânica desempenha um papel crucial na histerese e nas perdas de energia associadas às reações reversíveis nos elétrodos das baterias.

Em situações específicas de inserção de espécies em materiais com estruturas cristalinas em forma de camada, as reações de inserção são frequentemente referidas como reações de intercalação. Nestes casos, a composição de uma fase preexistente é modificada pela incorporação de espécies hóspedes, podendo ser considerada como uma solução do hóspede no material hospedeiro. Assim, esses processos também são ocasionalmente denominados reações em solução sólida.

De forma geral, a incorporação dessas espécies hóspedes ocorre de forma seletiva. Isso implica que as espécies convidadas tendem a ocupar posições específicas (de baixa energia) dentro da estrutura cristalina do hospedeiro, em vez de se dispersarem aleatoriamente.

Um exemplo simples desse tipo de reação pode ser a combinação de uma quantidade de espécie "A" com uma fase "BX" para produzir o produto " A_xBX ". Essa reação pode ser expressa na Equação 7.



A fase de solução sólida pode englobar uma gama de composições, isto é, uma faixa de valores de x. Por exemplo, ao introduzir lítio no TiS_2 , o produto final pode variar com x nos valores de 0 a 1. Este exemplo típico da reação de inserção pode ser simplificado na Equação 8.



Também é possível ocorrer uma reação de deslocamento, na qual uma espécie intersticial é substituída por outra dentro de um material hospedeiro estável. Nesse caso, apenas uma fase adicional é gerada, representando o material deslocado. Às vezes, o termo "extrusão" é usado para descrever esse processo. [14]

Em algumas situações, o novo elemento ou fase formado por esse processo de deslocamento intersticial é cristalino, enquanto em outros casos pode ser amorfo.[1]

3.1.4. Conceitos importantes de aplicações práticas

Quando se considera a aplicação de sistemas de armazenamento de energia eletroquímica, é importante estar ciente das propriedades relevantes, pois estas variam com a sua aplicação. A energia e a potência disponíveis por unidade de peso, conhecidas como energia específica ou poder específico, é essencial em aplicações como propulsão de veículos. Por outro lado, a quantidade de energia armazenada por unidade de volume, chamada densidade de energia, é fundamental em dispositivos eletrônicos portáteis, como telefones, computadores e máquinas fotográficas. A potência por unidade de volume, denominada por densidade de potência, é especialmente importante em ferramentas elétricas sem fio.

Além disso, é importante saber o ciclo de vida de um dispositivo, ou seja, quantas vezes ele pode ser recarregado antes que o seu desempenho seja degradado. O custo também é uma preocupação constante, e em algumas situações é mais importante do que o desempenho.

Serão discutidos de seguida alguns métodos para determinar os valores teóricos máximos de certos parâmetros abordados neste subcapítulo, baseando-se exclusivamente nas propriedades dos materiais presentes nos elétrodos. No entanto, os sistemas práticos geralmente não alcançam esses valores máximos teóricos, mas fornecem desempenhos frequentemente inferiores. Uma explicação óbvia para isso é que uma bateria na prática é composta por vários componentes passivos que não participam diretamente da reação química fundamental que atua como mecanismo de armazenamento de energia. Esses elementos englobam o eletrólito, que é responsável por facilitar a condução iônica, o separador que previne o contato direto entre os elétrodos, os conectores elétricos que direcionam a corrente elétrica para dentro e para fora da célula, e o invólucro que abriga todos esses componentes.

Além disso, frequentemente a eficiência na utilização dos componentes ativos na reação química é inferior ao ideal. Os materiais reagentes do eletrodo podem ser isolados eletricamente ou protegidos do eletrólito, o que os torna inativos na reação eletroquímica, sendo assim considerados passivos. Embora adicionem peso e volume, esses componentes não contribuem para a transformação de energia elétrica em energia química.[1]

Tabela 6 - Tabela adaptada de energia específica e densidade energética de alguns sistemas de baterias[1]

Sistema	Energia específica ($Wh\ kg^{-1}$)	Densidade energética ($Wh\ l^{-1}$)
Pb/PbO₂	40	90
Cd/Ni	60	130
Hidreto/Ni	80	215
Ião de lítio	135	320

Na Tabela 6, estão listados valores aproximados da densidade de energia (Wh/l) e energia específica (Wh/kg) de alguns sistemas de baterias recarregáveis comuns.

Porém, é importante notar que esses valores não são definitivos, pois variam conforme os fatores operacionais e os projetos dos fabricantes. Eles apenas mostram a ampla gama de parâmetros disponíveis comercialmente, provenientes de diferentes tecnologias.

Além da capacidade energética, outro aspecto fundamental para a utilidade das baterias é a quantidade de energia que podem fornecer. Isso é comumente expresso como potência específica, indicando a quantidade de potência por unidade de peso. Esse valor varia significativamente com base nos detalhes do projeto da célula e nas propriedades dos materiais reativos. Assim, os valores da potência específica também podem abranger uma grande faixa.[1]

- **Tensão de operação e qualidade energética**

Além de sua capacidade de armazenamento, a tensão de operação é um parâmetro importante num sistema de bateria, quer durante a descarga para fornecer energia e potência quer durante o processo de recarga.

No contexto do armazenamento de energia eletroquímica, outro fator importante a ser considerado é a qualidade da energia. O conceito de qualidade energética é similar ao conceito de qualidade do calor na engenharia termodinâmica. É amplamente aceite que o calor em altas temperaturas é mais útil, ou seja, tem uma qualidade maior do que o calor em baixas temperaturas. Da mesma forma, a utilidade da energia elétrica muitas vezes está relacionada com a tensão na qual está disponível. A energia em alta tensão geralmente é mais útil e tem melhor qualidade do que a energia em baixa tensão.

Por exemplo, em aplicações simples de resistência, a potência elétrica (P) está relacionada à tensão prática (não apenas teórica) (U) e à resistência (R) como demonstrada na Equação 9.

$$P = U^2/R \quad \text{Equação 9}$$

Portanto, a utilidade de uma célula eletroquímica para alimentar uma fonte de luz ou acionar um motor elétrico é especialmente sensível à tensão. Devido à relação quadrática entre a potência e a tensão, a energia armazenada em alta tensão tem uma qualidade muito superior para tais aplicações do que a energia armazenada em baixa tensão.

É possível fazer uma classificação aproximada da qualidade de energia atribuindo provisoriamente valores com base nas tensões de saída das células eletroquímicas, como ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação da qualidade de tensão de aplicação

Tensão de aplicação	Classificação
3,0-5,5 V	Energia de alta qualidade
1,5-3,0 V	Energia de média qualidade
0-1,5 V	Energia de baixa qualidade

- **Capacidade de carga**

A energia num sistema eletroquímico é determinada pelo integral da tensão multiplicada pela capacidade de carga, que representa a carga disponível.

$$Energia = \int U dq \quad \text{Equação 10}$$

Equação 10, a tensão de saída (U) pode variar conforme o estado de carga e os parâmetros cinéticos, enquanto a quantidade de carga elétrica que pode ser fornecida ao circuito externo é representada por q.

É importante conhecer a capacidade máxima teórica de armazenamento de uma bateria. Assim como a tensão, essa capacidade é uma propriedade intensiva, o que significa que é independente da quantidade de material presente. Por outro lado, a capacidade de carga é uma propriedade extensiva, ou seja, depende da quantidade de material contido no eletrodo.

Por isso, a capacidade de carga é sempre expressa em termos específicos, como o número de Coulombs por mol de material, por grama de peso do eletrodo ou por mililitro de volume do eletrodo.[1]

- **A energia específica teórica máxima (MTSE)**

Numa reação simples de inserção ou formação, onde x representa o número de moles de A que reagem por mol de R, e também o número de cargas elementares por mol de R. A energia teórica envolvida na reação pode ser calculada diretamente a partir da Equação 11, considerando a tensão média (U) usada na Equação 10.



Quando se expressa a energia em Joules, esta corresponde ao produto da tensão em Volts pela capacidade de carga em Coulombs envolvida na reação.

A energia específica teórica máxima (MTSE), que é a energia por unidade de peso, é simplesmente a energia teórica total dividida pela soma dos pesos moleculares dos reagentes envolvidos na reação (W_t).

A energia específica teórica máxima (MTSE) de Equação 12, é expressa em Joules por grama (J/g) ou em quilojoules por quilograma (kJ/kg), dependendo das unidades usadas para x, U e W_t . Em que x está expresso em mol, U está em Volts e W_t em gramas por mol.

$$MTSE = \left(\frac{xU}{W_t} \right) F \quad \text{Equação 12}$$

Dada a constante de Faraday F, que é igual a 96.500 Coulombs, podem relacionar Joules a Watt-hora (Wh). Como 1 Watt é igual a 1 Joule por segundo, 1 Watt-hora é equivalente a 3,6 quilojoules (kJ). Dessa forma, o valor do MTSE pode ser expresso em Watt-hora por quilograma (Wh/kg).

Assim a energia específica teórica máxima (MTSE) é dado pela Equação 13.[1]

$$MTSE = 26,805 \left(\frac{xU}{W_t} \right) \quad \text{Equação 13}$$

3.1.5. Variação de tensão da bateria durante recargas e descargas

A tensão da maioria das células eletroquímicas varia à medida que a sua energia química é utilizada, ou seja, varia ao longo da descarga. Da mesma forma, essas variações ocorrem no sentido oposto quando são recarregadas. Além das faixas de tensão, as características de mudanças destes comportamentos dependem do estado de carga e variam bastante entre os diferentes tipos de sistemas eletroquímicos.

Para entender melhor o desempenho das células eletroquímicas, é necessário analisar os valores máximos e a relação entre a tensão da célula e o estado de carga em condições de equilíbrio ou quase equilíbrio. A titulação colométrica é uma técnica experimental muito útil neste contexto, fornecendo uma grande quantidade de informações detalhadas.

A Figura 19 mostra alguns exemplos de curvas de descarga da variação da tensão em condições de baixa corrente ou quase de equilíbrio e apresentam-se algumas curvas de descarga. Estas curvas mostram a tensão da célula em relação ao estado de carga e destacam as diferenças significativas entre os diferentes tipos de baterias, que possuem capacidades variadas.

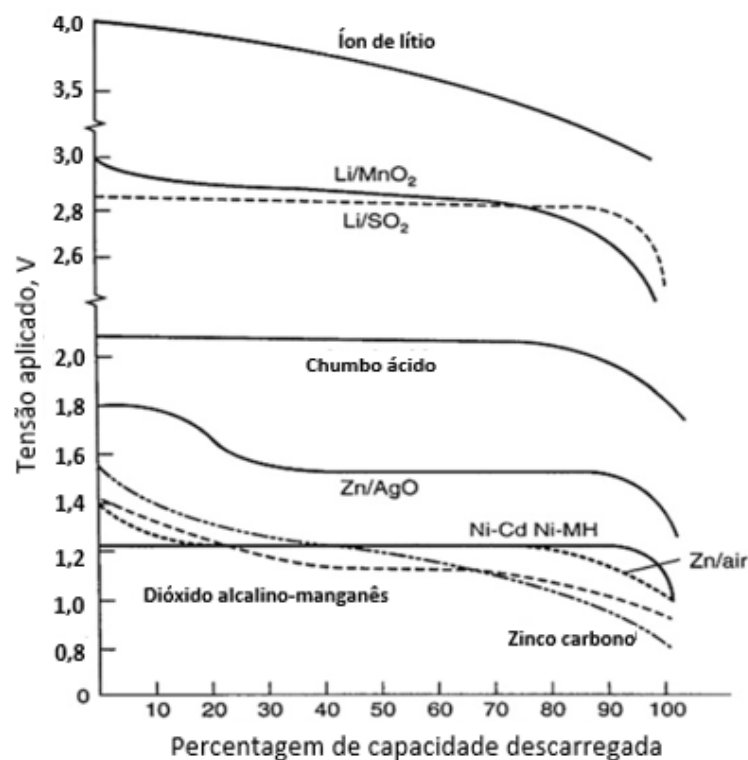


Figura 19 – Figura adaptada das curvas de descarga de baterias[1]

Ao apresentar essas propriedades de quase equilíbrio, observa-se que o comportamento das células varia significativamente. Algumas curvas de descarga são essencialmente planas, indicando uma tensão constante durante a maior parte da descarga. Outras curvas possuem mais de uma região plana, enquanto algumas têm um formato de “S” inclinado e esticado, com variações na inclinação.

Essas diferenças nas formas das curvas refletem as características únicas de cada tipo de bateria, demonstrando como cada uma responde de maneira distinta às condições de carga e descarga.

Essas variantes podem ser simplificadas em três tipos básicos de formatos de curva de descarga, conforme mostrado na Figura 20.[1]

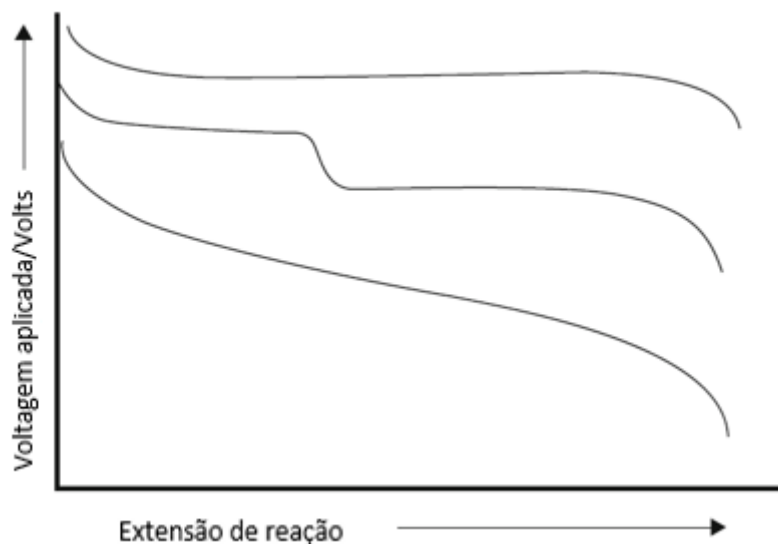


Figura 20 –Representação esquemática de diferentes tipos de curvas de descarga - adaptado[1]

- **Auto descarga**

A auto descarga é a diminuição da capacidade de uma célula ao longo do tempo, mesmo sem ser utilizada. Isso pode ser um problema grave em alguns sistemas e insignificante noutros. A capacidade depende dos elétrodos e da reação química entre as suas espécies neutras.

A auto descarga pode ser eletroquímica, envolvendo o transporte de espécies carregadas, ou química, através de vapor, fissuras no eletrólito sólido ou como gás dissolvido no eletrólito líquido. Impurezas também podem reduzir a capacidade ao reagirem com os componentes dos elétrodos ou do eletrólito.

Contudo, essas propriedades ainda serão estudadas em investigações futuras. Para melhorar essas qualidades, os conceitos básicos necessitam de atualizações, considerando a dinâmica das informações e o avanço das tecnologias que envolvem as células eletroquímicas.

3.2. Principais tecnologias aplicadas para o aproveitamento de energias hidroelétricas

Neste subcapítulo serão apresentados alguns conceitos básicos utilizados para aproveitar a energia contida na água, ou seja, a energia hídrica. Além disso, serão também apresentadas as tecnologias e metodologias de gestão económica dessa energia, com o objetivo de aumentar a produtividade na utilização desta importante fonte energética. Serão explorados diferentes tipos de centrais hidroelétricas e os mecanismos de conversão de energia das infraestruturas hídricas, baseados em três grandes grupos de equipamentos: geradores, turbinas e bombas.

3.2.1. Aproveitamento hídrico de pequena dimensão

O aproveitamento de energia hídrica de pequena dimensão é associado às centrais mini-hídricas. Em Portugal, esta designação refere-se aos aproveitamentos hidroelétricos com potência inferior a 10 MW, limite que separa as pequenas centrais das grandes centrais hidroelétricas.

Nessas pequenas centrais, segundo a classificação da UNIPED (International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy) [15], apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Designações das centrais a nível da potência[15]

Designação	Potência (MW)
Pequena Central Hidroelétrica	<10
Minicentral Hidroelétrica	<2
Micro Central Hidroelétrica	<0,5

Também se classificam as centrais relativamente à altura em que se encontram, como demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Designações das centrais a nível da altura da queda[15]

Designação	h(m)
Queda Baixa	2-20
Queda Média	20-150
Queda Alta	>150

A seguir, são apresentadas algumas figuras que permitem observar as diferentes configurações de cada tipo de classificação relativamente às alturas de queda.

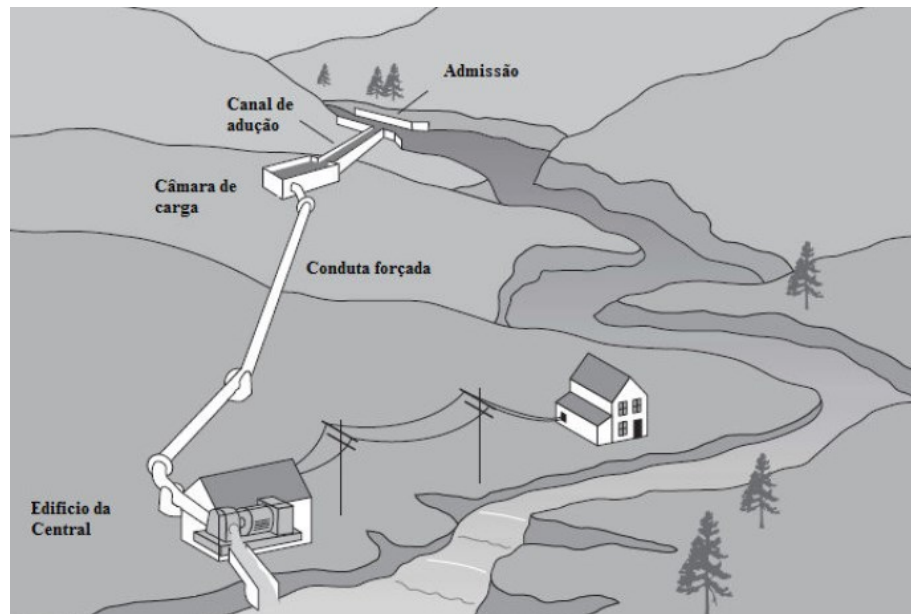


Figura 21 -Figura adaptada dos elementos de uma central de aproveitamento de pequena dimensão[16]

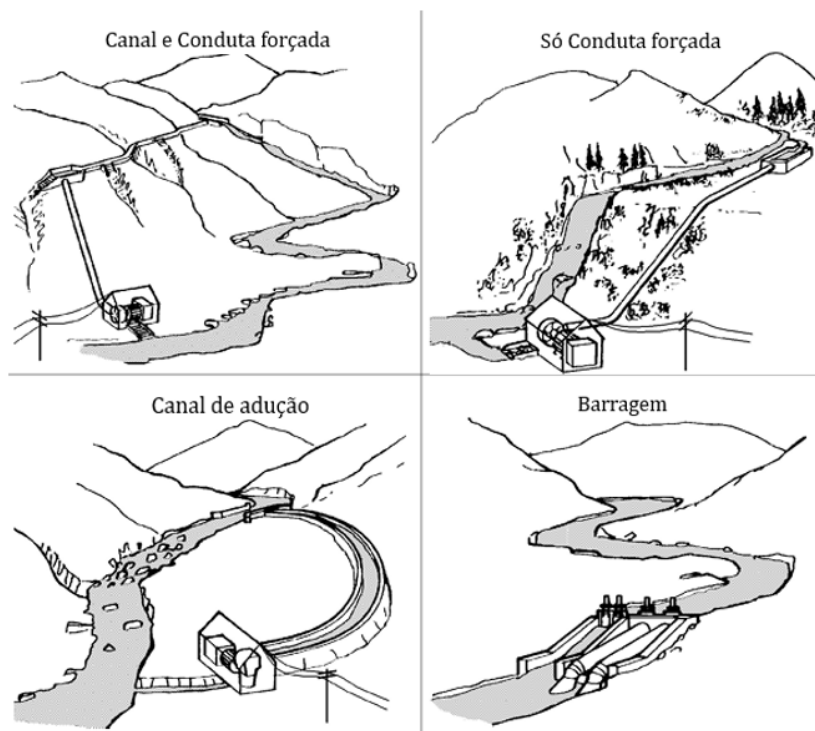


Figura 22 –Tipos de centrais mini-hídricas - adaptado[17]

Estes diferentes tipos de aproveitamento da queda de água, Figura 22, requerem o uso de equipamentos mais indicados para cada um deles. Neste contexto, os seguintes subcapítulos vão abordar várias opções de tecnologia que podem ser utilizadas nas configurações das centrais.

3.2.2. Geradores

No grupo de geradores, existem dois grandes tipos: geradores síncronos e geradores assíncronos. A escolha entre eles depende, essencialmente, no caso de uma central mini-hídrica, do rendimento, da velocidade nominal, da constante de inércia, dos tipos de regulação, entre outros fatores. O gerador síncrono é geralmente escolhido quando as condições de operação exigem um gerador tecnologicamente mais versátil, autónomo e com maior capacidade de produção de energia. Por outro lado, o gerador assíncrono é frequentemente a solução técnica e económica mais vantajosa, devido às suas reconhecidas características de robustez, fiabilidade e económica.

- **Geradores síncronos**

Os geradores síncronos operam a uma frequência f , determinada pela velocidade de rotação n e pelo número de pares de polos p ($f=n \cdot p$). Eles necessitam de uma fonte de corrente contínua para alimentar as bobinas de excitação no rotor.

Podem alimentar uma carga isolada ou estar conectados a uma rede com outros geradores. No caso de uma carga isolada, o gerador deve manter constante a frequência e a tensão, utilizando reguladores específicos. Quando uma carga é ligada ao gerador, a corrente no estator cria um binário resistente T que desacelera o rotor, como descrito pela Equação 14. Nesta equação, I é o momento de inércia do grupo gerador e ω é a velocidade angular do rotor.

$$T = I \left(\frac{\partial \omega_r}{\partial t} \right) \quad \text{Equação 14}$$

Como a frequência é diretamente proporcional à velocidade do rotor, quando essa velocidade diminui é necessário aumentar o binário do motor da máquina motriz, para corrigir essa redução. Esse aumento do binário motor resulta num aumento da potência mecânica P_M , conforme estabelecido pela Equação 15.

$$P_M = T \omega_r \quad \text{Equação 15}$$

O gerador síncrono fornece potência ativa à carga, ajustando o seu binário para compensar as variações na velocidade do rotor. Quando ligado à rede, é necessário sincronizá-lo com as condições da rede antes de ser ligado. Uma vez em carga, o regulador de velocidade controla a quantidade de vapor admitida na máquina motriz para manter a velocidade desejada. Geralmente, a regulação da frequência na rede é realizada pelo conjunto de geradores ligados. Além disso, o gerador pode fornecer ou consumir potência reativa, ajustando a corrente de excitação para manter a tensão de barramento. O regulador de tensão atua sobre a corrente de excitação para manter as condições desejadas de tensão na rede.[18]

- **Geradores assíncronos ou de indução**

O gerador assíncrono é uma máquina elétrica de indução que funciona a uma velocidade de rotação superior à velocidade de sincronismo, sendo por isso também chamado de gerador híper síncrono.

Para compreender o funcionamento de um gerador assíncrono, é essencial entender o funcionamento de um motor assíncrono, Figura 23. O fluxo magnético que atravessa os condutores do enrolamento retórico gera forças eletromotrizes. Como esses condutores estão em curto-circuito, surgem correntes elétricas que, ao interagir com o campo magnético, geram forças mecânicas. Estas forças combinadas produzem o binário eletromotor, o que faz com que o rotor tente acompanhar a velocidade do campo magnético.

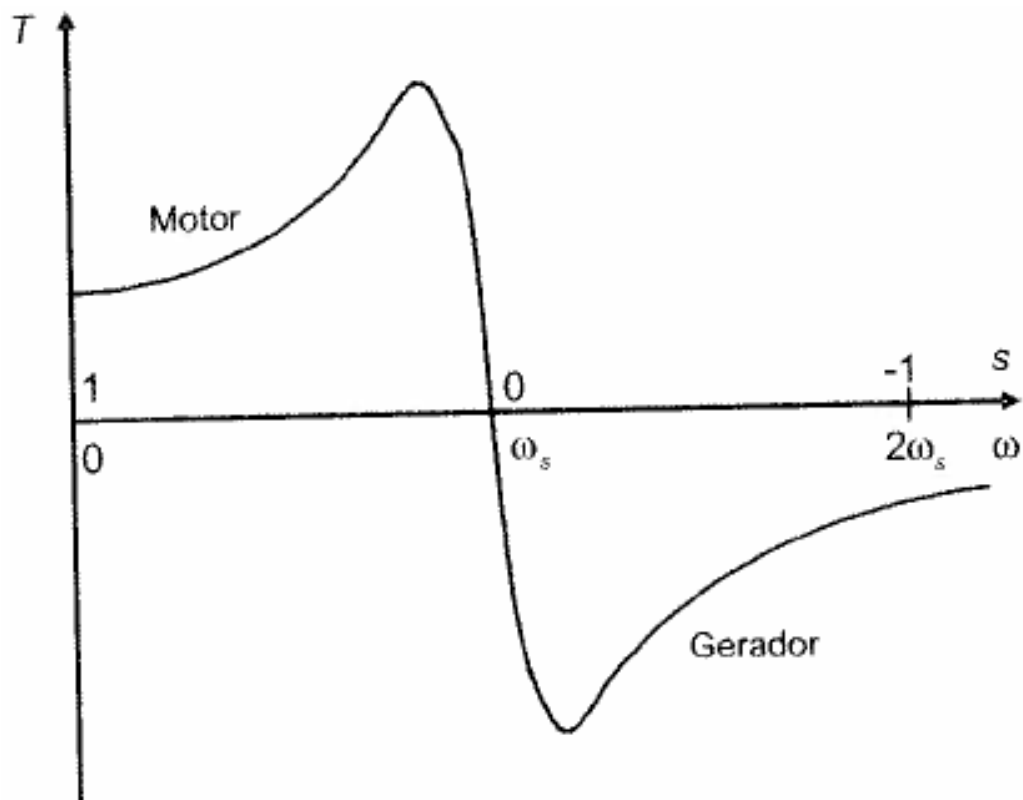


Figura 23 – Comportamento binário de uma máquina assíncrona[18]

No entanto, devido aos atritos, a velocidade do rotor (n) é inferior à velocidade de sincronismo (s), sendo essa diferença caracterizada pelo deslizamento (S), como apresentado na Equação 16.

$$S = \frac{n_s - n_i}{n_s}$$

Equação 16

Quando a velocidade (n_i) é superior à de sincronismo (n_s), a máquina atua como gerador elétrico. A potência mecânica fornecida pela turbina é convertida em potência elétrica alternada, cuja frequência é determinada pela rede. A rede elétrica fornece a energia reativa necessária para manter o campo magnético do gerador de indução. A velocidade de rotação do gerador varia ligeiramente com a carga elétrica, sem afetar a tensão ou frequência do sistema, pois o campo magnético do estator é controlado pela rede. Esta indiferença só muda se a potência do gerador for significativa em relação à potência total da rede. O funcionamento como gerador é caracterizado pelo deslizamento ($s < 0$), o que também afeta a resistência equivalente, Equação 17.

$$R_s \frac{(1-s)}{s} < 0 \quad \text{Equação 17}$$

Posteriormente relaciona-se a potência mecânica com a potência ativa, Equação 18

$$P_M = P_r - 3R_s I_r^2 = 3 \frac{(1-s)}{s} R_s I_r^2 < 0 \quad \text{Equação 18}$$

A ligação do gerador assíncrono à rede pode ser realizada de duas formas. A primeira consiste em conectá-lo diretamente com a máquina a operar a uma velocidade próxima da nominal, o que provoca um pico de corrente devido ao campo magnético no entreferro ser nulo. A segunda forma envolve autoexcitar a máquina utilizando uma bateria de condensadores de valor adequado e, em seguida, ligá-la em paralelo de maneira semelhante a uma máquina síncrona, evitando assim qualquer sobre corrente.[18]

3.2.3. Turbomáquinas hidráulicas

O objetivo fundamental das máquinas hidráulicas é promover a troca de energia mecânica entre o fluido, que nas situações mais comuns é a água. O principal motivo das instalações hidráulicas é a elevação ou transporte de água a grandes distâncias, utilizam-se vários tipos de máquinas hidráulicas, nomeadamente turbomáquinas, rodas de água, bombas de êmbolo, carneiros hidráulicos e injetores.

As máquinas hidráulicas, como bombas e turbinas, são classificadas tanto por aspetos comuns como por características distintas.

- Bombas rotativas e alternativas: o líquido recebe força diretamente de um pistão ou êmbolo. Exemplos incluem bombas de engrenagens, helicoidais, de palhetas e de pistão giratório.
- Bombas hidráulicas: transferem energia ao líquido através da aceleração provocada por um rotor com pás. A transferência de energia deve-se às forças dinâmicas resultantes das diferenças de velocidades entre o fluido e as partes móveis da máquina.

- Turbinas de impulso: a roda é atuada pela água à pressão atmosférica.
- Turbinas de reação: a roda é atravessada pelo escoamento sob pressão.

Classificação comum das turbomáquinas hidráulicas (bombas hidráulicas e turbinas de reação):

- Turbomáquinas radiais (centrífugas ou centrípetas): linhas de corrente perpendiculares ao eixo.
- Turbomáquinas axiais: linhas de corrente em superfícies de revolução, paralelas ao eixo da turbomáquina.
- Turbomáquinas mistas: velocidades com componentes axiais e radiais, também chamadas helicoidais (helico centrífugas e helico centrípetas).

Pontos a considerar importantes.

- As bombas de deslocamento positivo não têm análogos entre as turbinas.
- As turbinas de impulso não têm correspondentes entre as bombas hidráulicas.
- As turbinas Francis (helico centrípetas ou radiais-axiais) e as turbinas mistas propriamente ditas (diagonais) são classificadas conforme a componente axial do escoamento

A Tabela 10, apresenta as classificações de Turbomáquinas.

Tabela 10 – Classificação das turbomáquinas hidráulicas[19]

Turbomáquinas	Modos de ação	Direção do escoamento	Designação corrente
Turbinas	Impulso	-	Pelton
	Reação	Radiais-Axiais	Francis
		Mista	Dériaz
		Axiais	Kaplan
Bombas	Hidráulicas	Radiais	Bombas centrífugas
		Mistas	Bombas mistas
		Axiais	Bombas axiais
	Deslocamento Positivo	-	Rotativas ou alternativas

As turbinas Dériaz e Francis, que podem funcionar tanto como turbinas como bombas, são utilizadas em aproveitamentos hidroelétricos para bombear água para reservatórios a montante durante as horas de vazio, aproveitando o excesso de produção de energia. No entanto, a turbina Dériaz é mais adequada para aproveitamentos hidroelétricos de grande escala.[19]

- **Turbinas de impulso (turbinas Pelton)**

As turbinas Pelton são consideradas turbinas de ação, uma vez que utilizam a energia cinética da água para gerar movimento rotativo. Estas turbinas são compostas por um disco circular, conhecido como roda, que possui pás de em forma de conchas montadas na sua periferia. Um jato de água é direcionado tangencialmente sobre estas pás através de um ou mais injetores, distribuídos uniformemente ao redor da roda, Figura 24. Através de uma válvula de agulha, o injetor controla o fluxo de água que atinge a roda, o que permite ajustar a potência fornecida pela turbina, Figura 25.

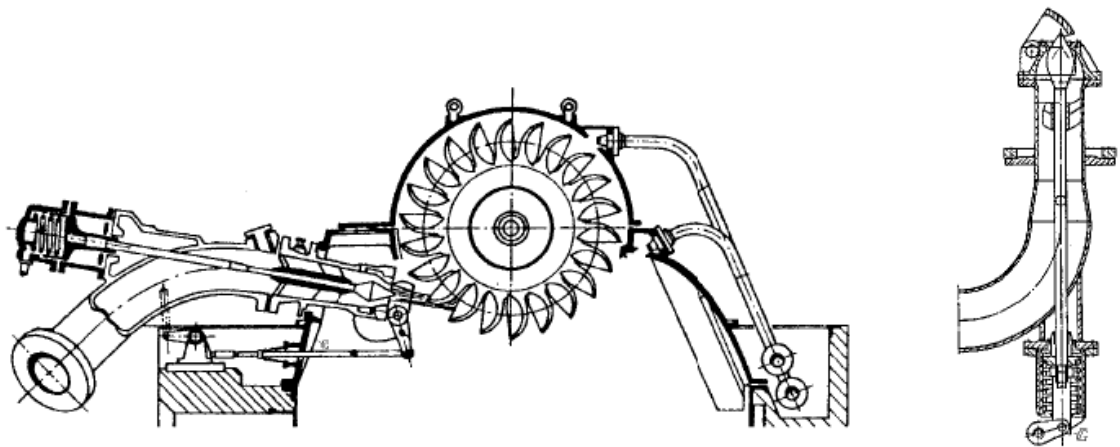


Figura 24 – Representação esquemática de uma turbina Pelton com um injetor[20]

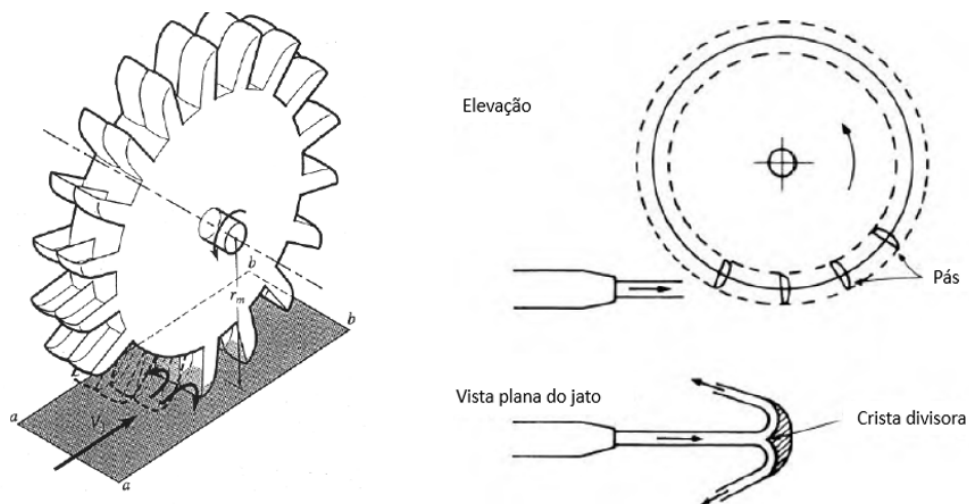


Figura 25 – Exemplificação do pormenor do jato das turbinas de Pelton e Turgo[21]

Esta turbina, pode ser usada em eixo horizontal ou vertical, é utilizada em aproveitamentos com caudais reduzidos e uma altura de queda elevada. Em projetos hidroelétricos de pequena escala, costuma-se preferir turbinas de eixo horizontal, uma vez que permitem o uso de geradores de eixo horizontal, que são mais comuns e têm um custo menor. Em grandes aproveitamentos, estas turbinas são normalmente consideradas apenas para quedas superiores a 150 metros.[20]

A eficiência para turbina Pelton com um injetor é considerado boa para um caudal de 30 a 100% do caudal máximo, enquanto para uma de jatos múltiplos, Figura 26, já é eficiente a partir dos 10%.[22]

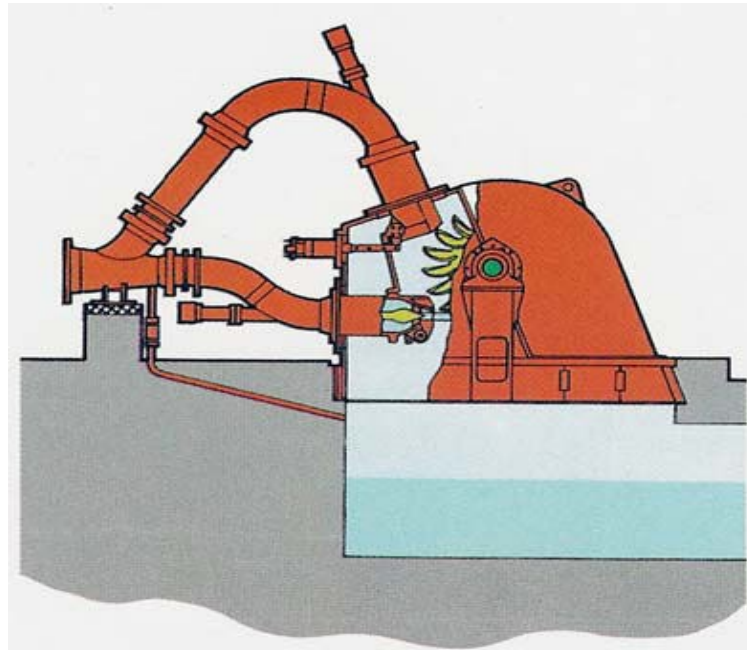


Figura 26 – Turbina Pelton de eixo horizontal com dois injetores[23]

- **Turbinas de impulso (turbinas Turgo)**

A turbina Turgo é muito semelhante à turbina Pelton, visto que ambas operam com o mesmo princípio de funcionamento. Contudo, apresentam diferenças notáveis nas pás e no ângulo de incidência do jato de água que, na Turgo, é tipicamente 20 graus em relação à perpendicular, como demonstrado na Figura 27.

Ao contrário da Pelton, na Turgo, a água entra por um lado e sai pelo outro, o que elimina a interferência do fluido residual na admissão do fluxo. Isso permite que a Turgo tenha um diâmetro menor do que a Pelton para a mesma potência, embora necessite de operar a uma velocidade de rotação mais elevada.

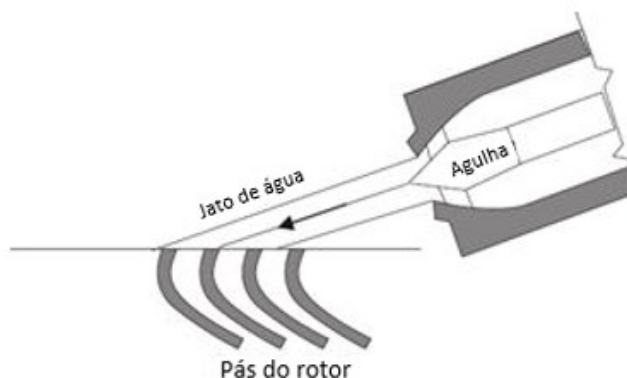


Figura 27 – Princípio de funcionamento de uma turbina Turgo[21]

As turbinas Turgo podem ser uma alternativa às turbinas Francis em situações de grande variação de fluxo ou quando ligadas a longos canais de adução. Isso acontece porque os deflectores nelas presentes evitam que a água dos jatos atinja diretamente a turbina, permitindo que esta seja desligada caso ocorra uma súbita perda de carga. Isso protege o gerador e a turbina contra danos causados por velocidades excessivas que poderiam ocorrer sem esse mecanismo de proteção.

No entanto, as Turgo também têm desvantagens. Comparadas com as turbinas Pelton, o seu rendimento máximo é cerca de 5 a 6% inferior e a sua fabricação é mais complexa devido à complexidade das conchas ou canais, são mais frágeis.

Além disso, as turbinas Turgo estão sujeitas a uma carga significativa no eixo de rotação devido ao esforço dos jatos, causando uma reação axial nos mancais para além do esforço radial normal. Isso requer o uso de mancais de rolamentos auto compensadores ou até mesmo de rolos cônicos, em vez dos simples rolamentos de esferas normalmente utilizados. A Figura 28 demonstra um exemplo de montagem da turbina Turgo.[23]

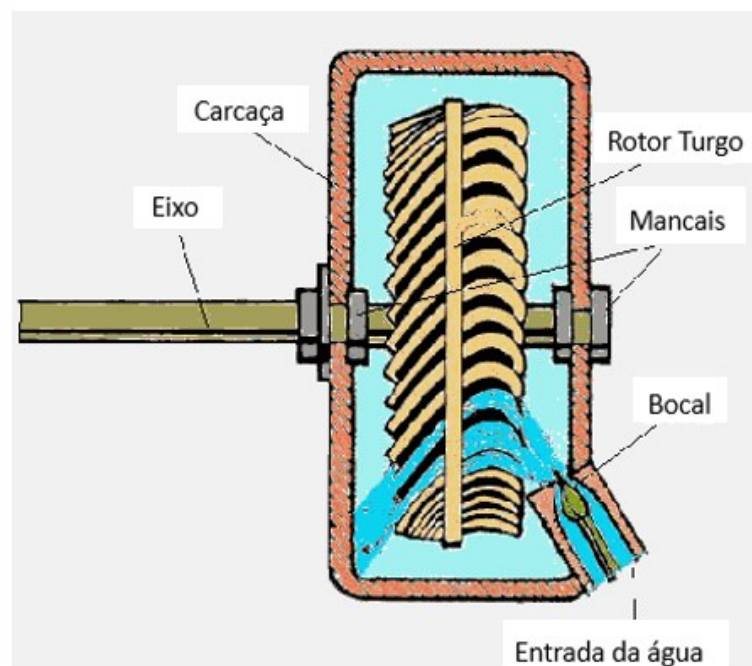


Figura 28 – Composição e princípio de funcionamento de uma turbina Turgo[22]

- **Turbinas de impulso (turbinas de fluxo cruzado/cross-flow)**

As turbinas de fluxo cruzado, também conhecidas como Banki-Mitchell ou Ossberger, são frequentemente utilizadas em aplicações de baixa potência. Embora tenham um rendimento ligeiramente inferior às turbinas convencionais, mantêm um desempenho elevado ao longo de uma ampla gama de caudais de água, o que as torna adequadas para operar em diversas condições de fluxo.

Estas turbinas possuem eixos horizontais e funcionam a baixas velocidades de rotação, normalmente entre 60 e 600 rotações por minuto (rpm). É comum a necessidade de usar multiplicadores de velocidade entre as turbinas e os geradores para ajustar a velocidade de rotação de acordo com as exigências específicas do sistema.

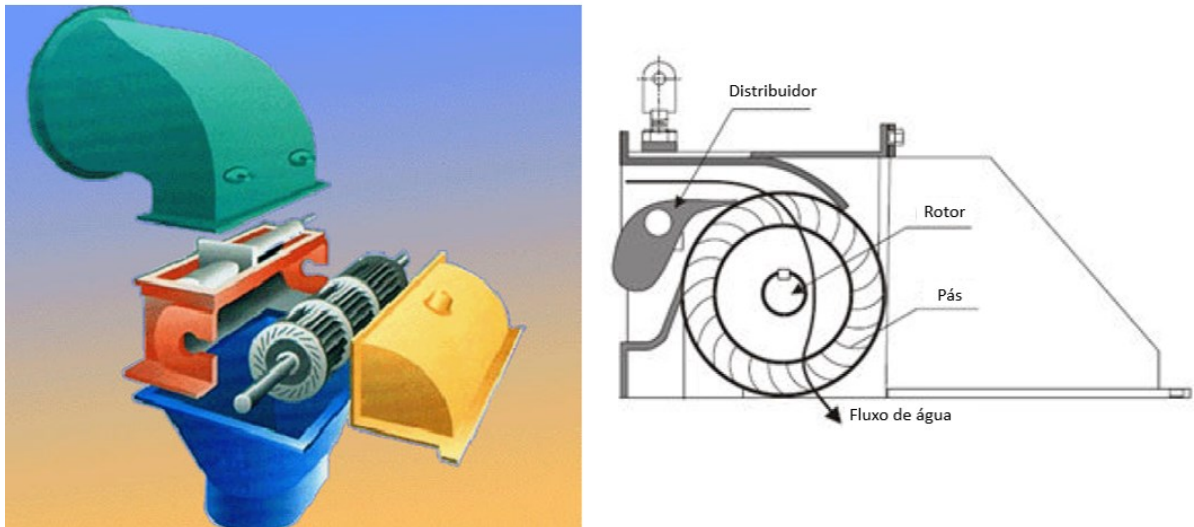


Figura 29 – Esquema de composição e o princípio de funcionamento de uma turbina de fluxo cruzado[23]

Para melhorar o rendimento de uma turbina com o mesmo caudal, pode-se criar uma diferença de pressão (vácuo parcial) entre o canal de entrada e o de saída da turbina. Isso não só reduz os danos nos rolamentos do eixo, causados pelo “spray”, como também melhora a circulação do ar pelos rolamentos, o que faz com que se remova as águas residuais.

Devido à simetria das turbinas de fluxo cruzado, teoricamente, o seu comprimento pode ser aumentado para qualquer tamanho sem afetar as suas características hidráulicas. Assim, ao duplicar o tamanho da turbina, duplica-se a potência fornecida para a mesma velocidade. Isso significa que, quanto menor a queda de água, maior será o tamanho da turbina, e que se tornará mais compacta à medida que a queda de água aumenta.

No entanto, existem limites para ambos os casos. Pás muito longas podem tornar-se demasiado flexíveis e apresentar fadiga nas junções. Por outro lado, se a turbina for muito compacta em projetos de alta queda, as perdas nos bordos podem afetar significativamente o seu rendimento.

A eficiência de uma turbina de fluxo cruzado depende do seu projeto sofisticado. Recorrer à criação de vácuo torna todo o sistema mais caro, pois é necessário garantir a diferença de pressão desejada. As máquinas mais sofisticadas podem atingir eficiências de cerca de 85%, enquanto as mais simples ficam entre 60 e 75%, Figura 30.

A eficiência da turbina pode ser mantida alta mesmo em situações de caudal parcial, até cerca de 50% do caudal total. Para isso, é necessário incluir um dispositivo distribuidor de caudal, que determina quais partes da turbina são utilizadas, ou através da orientação de um defletor de caudal, que gere o fluxo a ser turbinado.[22]

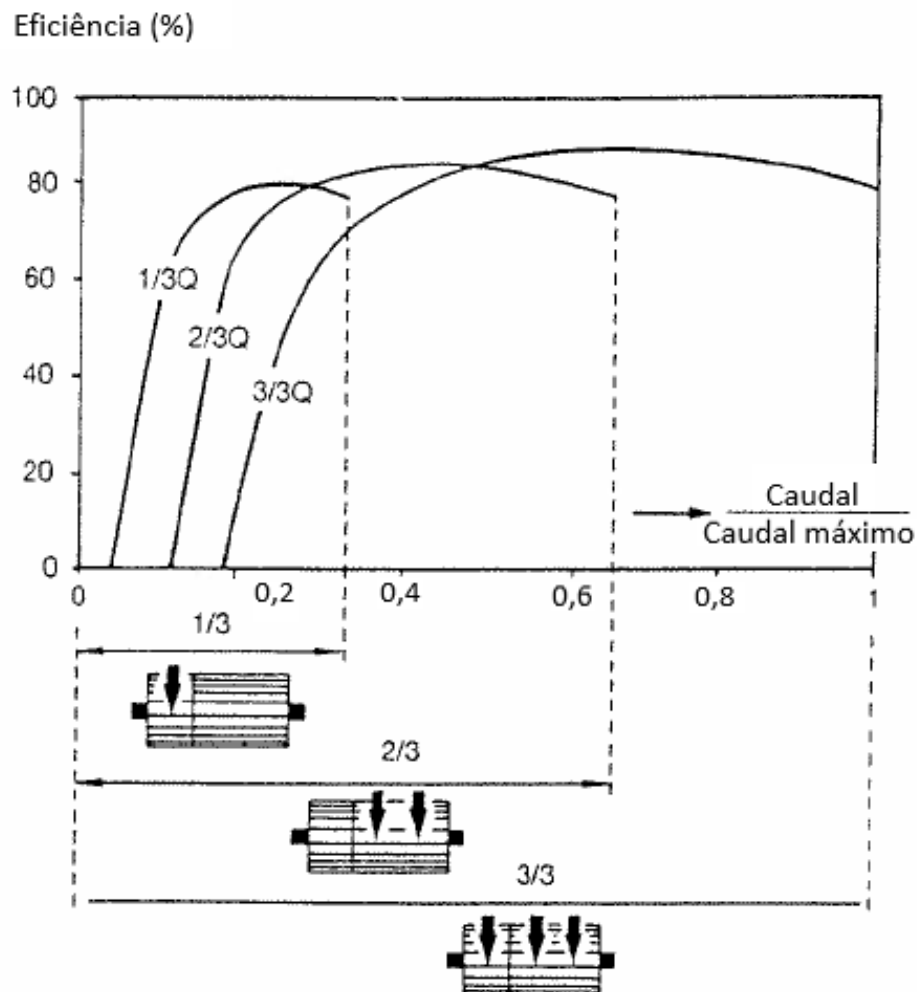


Figura 30 – Eficiência de uma turbina de fluxo cruzado de caudais diferentes[22]

As turbinas de fluxo cruzado são uma opção atrativa para projetos hidroelétricos de pequena escala devido à sua versatilidade do projeto e à facilidade de construção. São especialmente indicadas para áreas em desenvolvimento, onde podem ser instaladas com métodos de construção simples. Além disso, a sua estrutura simples facilita a manutenção e reparação, mesmo em caso de danos no rotor.

No entanto, estas turbinas têm uma eficiência inferior em comparação com outros tipos de turbinas e sofrem perdas significativas devido ao espaço entre o rotor e a água abaixo. Isso pode ser problemático em locais com quedas de água baixas ou médias e pode afetar a sua fiabilidade em quedas de água mais altas, devido a resistência da própria turbina contra a energia potencial transformada em energia cinética da água.

Apesar destas limitações, as turbinas de fluxo cruzado oferecem uma alternativa interessante para regiões com recursos hídricos adequados, necessidades energéticas específicas e orçamentos limitados, como em programas de eletrificação rural.[22]

- **Turbinas de reação (Turbinas Francis)**

As turbinas Francis são turbinas de reação, nas quais a água flui pela roda a uma pressão inferior à atmosférica. A roda possui alhetas fixas que formam canais hidráulicos, que recebem a água numa direção radial com a saída do rotor axialmente.

Os principais componentes da turbina Francis são a câmara de entrada, que pode ser aberta ou fechada em forma de espiral, a roda distribuidora, com alhetas fixas ou móveis que regulam o caudal da água, as pás do rotor, onde o fluido atua com a pressão da água de forma tangencial, é convertida em energia cinética e energia mecânica no veio da turbina. Por fim, a tubeira de descarga, que reduz a velocidade da água para reduzir a perda de energia cinética na saída da turbina.

A turbina Francis é muito versátil, funciona bem com diferentes alturas de queda e variações de caudal. É adequada para quedas superiores a 20 metros. Para quedas inferiores, utilizam-se turbinas de caixa aberta. Esta turbina pode operar eficientemente com variações significativas na altura de queda, entre 60% e 125%, e no valor de caudal nominal, entre 40% e 105%. [23]

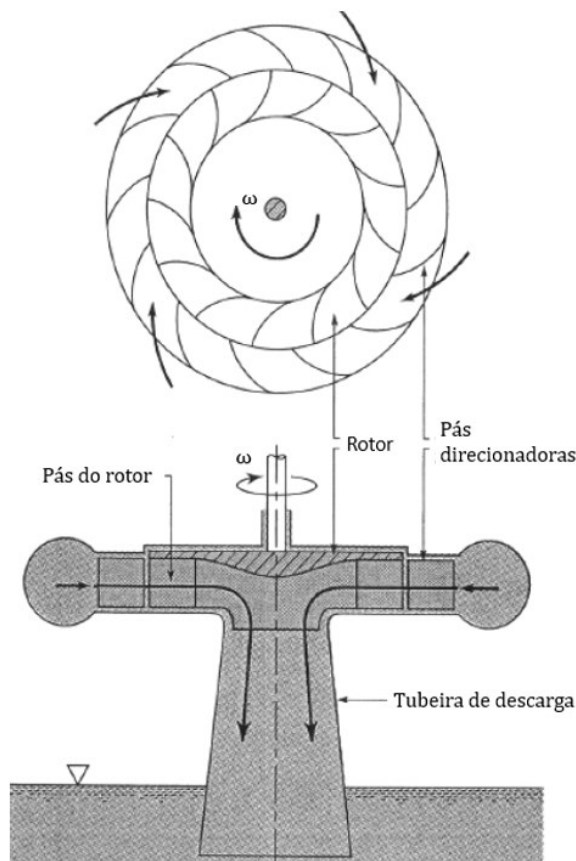


Figura 31 – Composição da turbina Francis [21]

As turbinas Francis apresentam um rendimento máximo mais elevado, velocidades maiores e dimensões mais pequenas relativamente as turbinas Pelton.

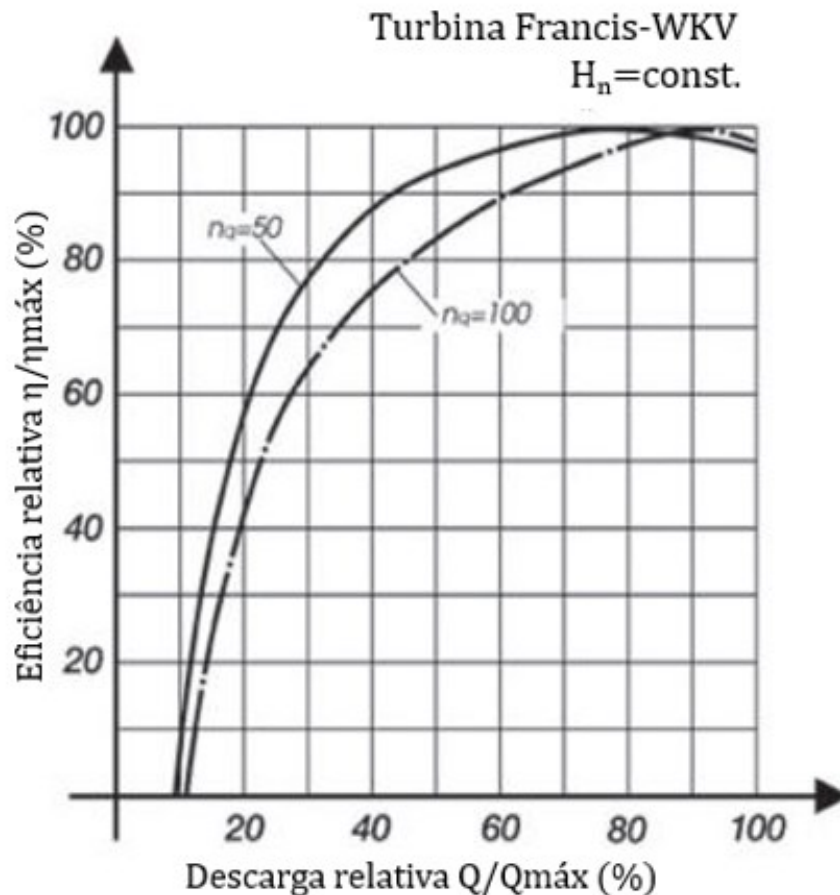


Figura 32 – Rendimento de uma turbina Francis de várias velocidades com quedas constantes[23]

- **Turbinas de reação (Turbinas Kaplan)**

As turbinas Kaplan e hélice são outro tipo da turbina de reação além das turbinas Francis. Estas são utilizadas especialmente para quedas de água pequenas e caudais elevados, sendo constituídas por uma câmara de entrada (aberta ou fechada), um distribuidor e uma roda com quatro ou cinco pás em forma de hélice. Se as pás são fixas, a turbina é chamada de turbina hélice. Se as pás são ajustáveis, permitindo variar o ângulo de ataque através de um mecanismo controlado pelo regulador da turbina, é chamada de turbina Kaplan.

As turbinas Kaplan são reguladas tanto pelo distribuidor quanto pelo ângulo de ataque das pás do rotor, proporcionando-lhes uma grande capacidade de ajuste. São usadas em quedas de água inferiores a trinta metros e podem operar com eficácia quando existem variações na queda útil entre 60% e 140% e no caudal entre 15% e 110% do valor nominal. Contudo, esta diversificação implica um custo mais elevado.[23]

As turbinas hélice e Kaplan geralmente têm um eixo vertical, embora também existam variantes com eixo horizontal e fluxo axial, como as turbinas do tipo bolbo, demonstrado na Figura 33.

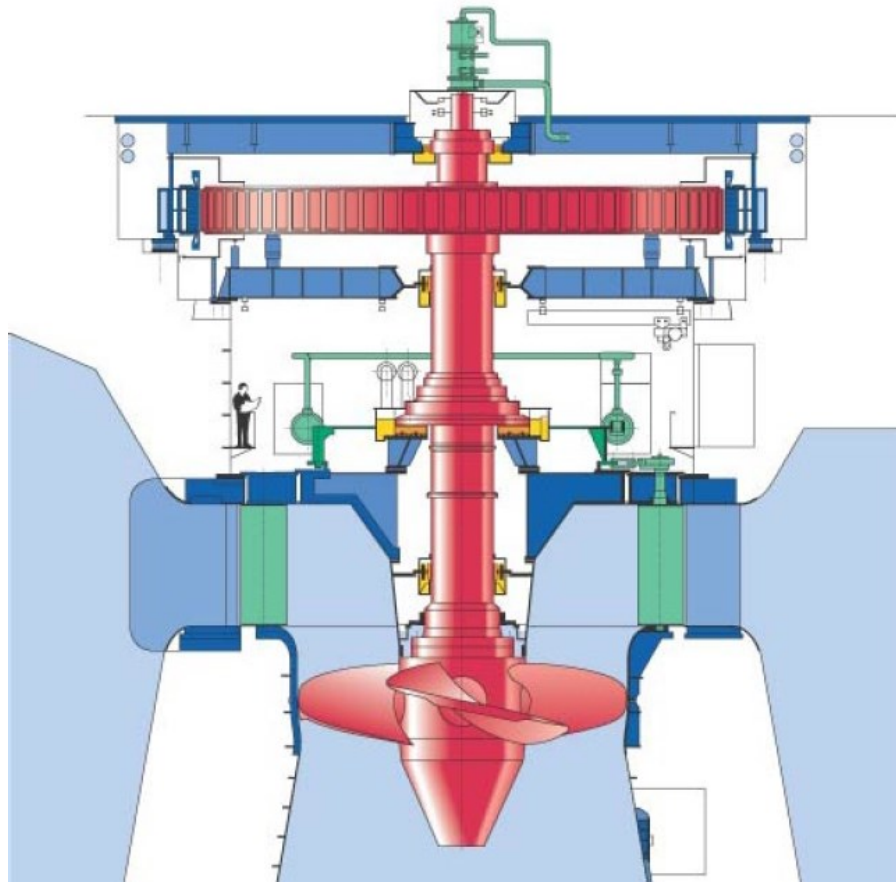


Figura 33 -Figura esquemático de uma turbina Kaplan[21]

- **Escolha das turbinas**

Os fabricantes de turbinas costumam disponibilizar ábacos ou diagramas que representam as áreas de aplicação dos diferentes tipos de turbinas que produzem. Isso torna mais fácil escolher a turbina certa para um determinado projeto hidroelétrico.

Atualmente, nos projetos hidroelétricos de pequena escala, os fabricantes tendem a oferecer conjuntos completos de turbina e gerador, argumentando que as unidades devem ser compatíveis.

Além disso, como parte do sistema de regulação pode influenciar as características de funcionamento da turbina, os fabricantes também oferecem sistemas de regulação e controle da turbina para venda.

A escolha da turbina é fundamental para garantir o bom desempenho da central e deve considerar três parâmetros principais: altura útil da queda, caudal e potência do aproveitamento.[23]

A Figura 34, ilustra um gráfico usado para orientar na seleção de turbinas em projetos hidroelétricos de pequena escala.

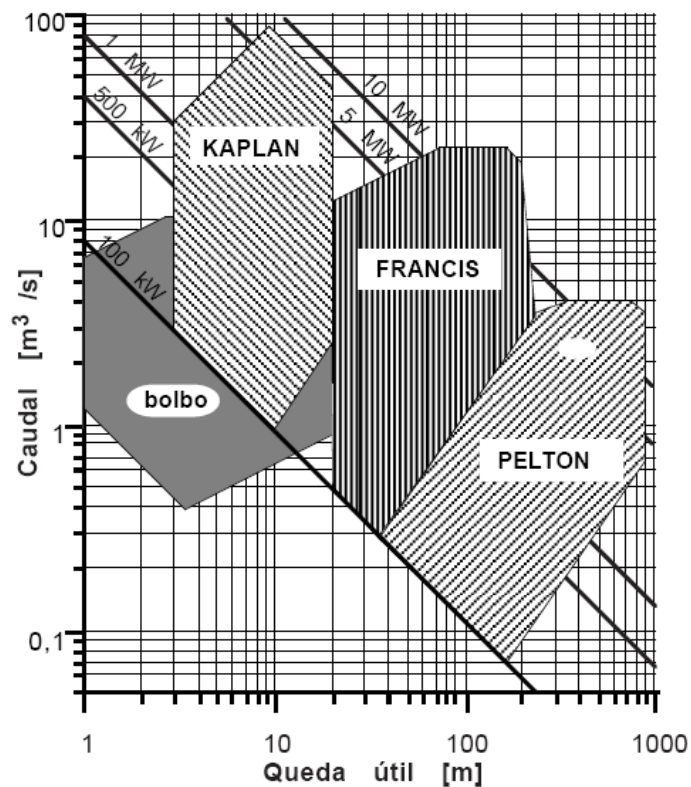


Figura 34 – Gráfico de seleção de turbinas[20]

Por fim, apresenta-se na Tabela 11, o quadro de síntese para um resumo dos diversos tipos da turbina.

Tabela 11 – Características de turbinas de impulso[23]

Turbinas de impulso	
Pelton	São classificadas como turbinas de ação por possuírem a característica de transformar a energia cinética no jato injetor.
	O uso adequado para locais onde haja altas quedas e pequeno caudal.
	Apresenta bons rendimentos onde há grande variação de carga, podendo ser operadas entre 10 e 100% da sua potência máxima
Banki-Mitchell ou fluxo cruzado	O seu rendimento é inferior aos das turbinas de projeto convencional, mas mantém-se num valor elevado ao longo de uma extensa gama de caudais.
	De tecnologia bastante simples requer poucos equipamentos para o seu fabrico e manutenção.
	O seu campo de aplicação atende quedas de 3 a 100 metros, caudais de 0,02 a 2,0 m³/s e potência de 1 a 100 kW.
	Devido à sua facilidade de padronização pode apresentar rotações específicas entre 40 e 200 rpm.

Turbinas de reação	
Kaplan e Hélice	As turbinas de hélice não são reguláveis, este tipo de turbinas permite pouca variação no caudal apenas controlado pelo distribuidor.
	As Kaplan são reguláveis, esta regulação pode ser dupla, com mobilidade das pás da roda e do distribuidor.
	Usadas para grandes caudais e baixas quedas.
	Dificuldade de dimensionamento e custo de fabrico elevado.
Francis	São turbinas adequadas para operação com condições intermédias de queda e de caudal.
	É a turbina de maior uso em quedas e caudais médios.
	Apresentam um alto rendimento (80% a 90%), tanto mais alto quanto maior for a potência.
	Esta turbina pode ser instalada em caixa espiral (queda de altura média, acima de 10 m), ou em caixa aberta (baixa queda, abaixo de 10 m).

- Bombas como turbinas (Pumps as turbines [PAT])**

Em micro centrais de baixa potência, pode-se utilizar bombas hidráulicas a funcionar como turbinas. Isto é possível quando operam em paralelo com uma grande rede elétrica, pois um motor assíncrono pode funcionar como gerador assíncrono ao girar acima da sua velocidade síncrona.

Quando estas unidades estão ligadas a uma rede isolada, é necessário regular a potência. Como a regulação hidráulica tradicional muitas vezes não é viável, é necessário recorrer a uma regulação eletrónica para dissipar o excesso de energia.[22]

O funcionamento de uma bomba centrífuga como turbina depende das suas características específicas, sendo necessário definir os pontos de funcionamento ideal e o caudal mínimo para ser turbinado. O rendimento máximo da bomba a funcionar como a turbina com o mesmo caudal e queda, é cerca de 40% superior a funcionar como bomba.

Usar uma bomba normalizada como turbina tem várias vantagens, como o baixo custo devido à produção em massa, a pequena dimensão do equipamento e a montagem em monobloco, evita problemas de alinhamento entre a turbina e o gerador.[23]

As bombas como turbinas (PATs) são ideais para locais com quedas médias, onde normalmente se utiliza uma turbina Pelton de multijactos e baixa velocidade específica ou uma pequena turbina de fluxo cruzado. Para potências abaixo de 10 kW e quedas inferiores a 30 metros, uma PAT é significativamente mais barata que uma turbina de fluxo cruzado ou Pelton.[24]

A Figura 35 e a Figura 36 demonstram a diferença entre dois tipos de funcionamento da bomba.

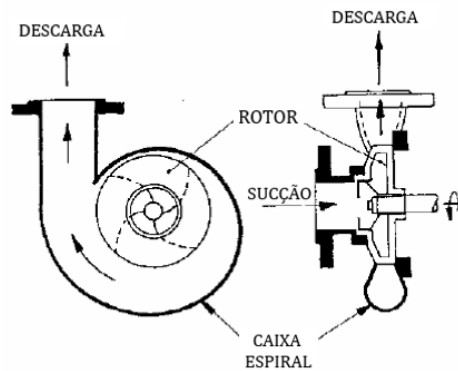


Figura 35 - Bomba centrífuga a funcionar como bomba[23]

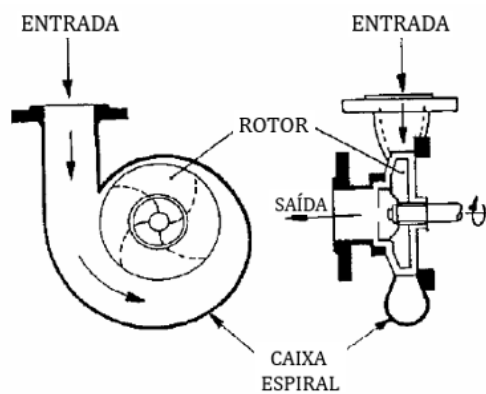


Figura 36 Bomba centrífuga a funcionar como turbina[23]

Posto isto, é demonstrada na Figura 37 as curvas típicas de rendimento dos vários tipos de turbomáquinas hidráulicas.

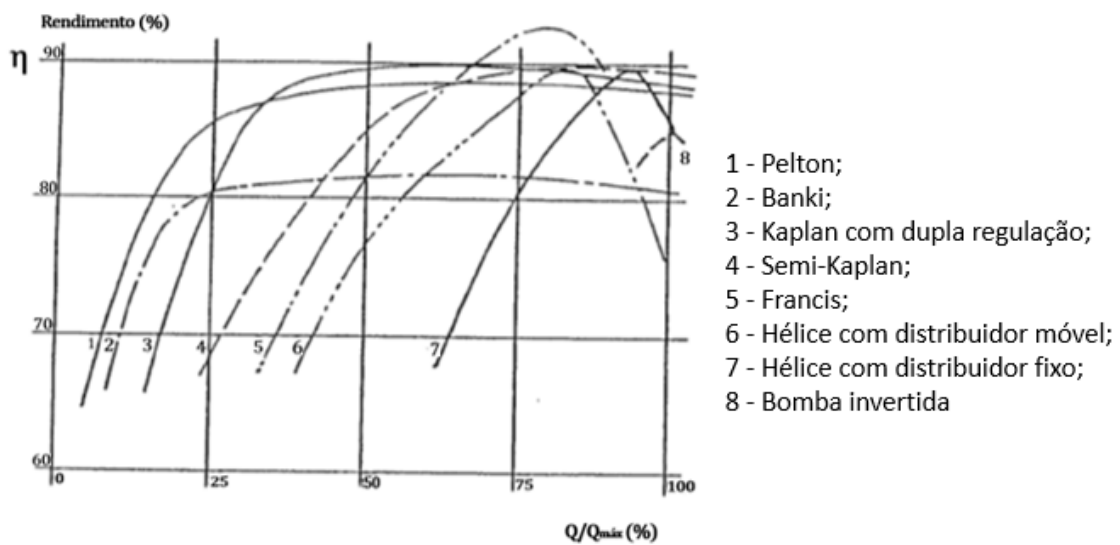


Figura 37 – Curvas típicas de rendimento dos diversos turbinas - adaptado[23]

3.3. Principais tecnologias aplicadas para o aproveitamento de energias solar térmicas

A energia solar térmica é uma fonte renovável que aproveita o calor do sol para diversas aplicações, como o aquecimento de água e a produção de eletricidade através de processos termodinâmicos. São diferentes dos painéis solares fotovoltaicos, que convertem a luz solar diretamente em eletricidade, o painel solar térmico concentra a radiação solar no ponto específico para aquecer o fluido (ar, água ou óleo térmico) em altas temperaturas. Este fluido de alta temperatura é utilizado em ciclos termodinâmicos convencionais, semelhantes aos das centrais termoelétricas que usam combustíveis fósseis. A utilização desta energia solar exige tecnologias avançadas para a captação da radiação solar, o armazenamento do calor gerado, a sua distribuição e consumo eficiente.

Além disso a energia solar na sua conversão é usada em diferentes faixas de temperatura:

- Temperaturas baixas (até 90°C):

-Utilizada para aquecimento de água em moradias, hotéis, hospitais, aquecimento de piscinas e pré-aquecimento industrial.

-Tecnologias bem desenvolvidas, com coletores estacionários, planos ou de baixa concentração.

-Vantajosa do ponto de vista energético e ambiental, reduzindo emissões de gases de efeito estufa.

- Temperaturas médias (90°C a 150°C):

-Aplicações incluem produção de vapor na indústria, condicionamento de ar, produção de eletricidade com turbinas de baixa temperatura e dessalinização.

-Utilizam-se coletores estacionários com mecanismos de redução de perdas térmicas e concentradores parabólicos compostos (CPC).

- Temperaturas altas (150°C a 300°C):

-Aplicações industriais e produção de energia elétrica.

-Necessitam de tecnologias que acompanhem o movimento do Sol, como coletores cilindro-parabólicos.

- Temperaturas muito altas (> 300°C):

-Necessárias para produção de energia elétrica com ciclos termodinâmicos de alta temperatura.

-Utilizam coletores cilindro-parabólicos, tipo torre ou discos parabólicos, sendo os cilindro-parabólicos os mais promissores.[25]

3.3.1. Coletores solares

Neste subcapítulo são apresentados exemplos dos vários tipos de coletores solares mais utilizados, conforme os requisitos apresentados anteriormente.

- **Coletor solar plano**

Os coletores planos recebem e aproveitam a radiação solar diretamente na mesma superfície. Comparativamente aos coletores de concentração, estes operam a temperaturas mais baixas, geralmente abaixo dos 93°C. As suas vantagens incluem a simplicidade de construção, custo reduzido, facilidade de manutenção e capacidade de operar eficientemente mesmo em dias nublados, sendo também bastante fiáveis.

Estruturalmente, um coletor plano é composto por uma placa absorvedora, que converte a energia solar em calor. Este calor é transferido para tubos por onde circula o fluido a ser aquecido. O coletor possui ainda uma cobertura transparente que reduz as perdas por convecção, cria-se um efeito de estufa ao refletir de volta a radiação de ondas longas para a placa absorvedora, garantindo ao mesmo tempo a estanquicidade do sistema à água e ao ar. Alguns modelos podem incluir vidro duplo para aumentar a eficiência na redução das perdas térmicas. O material isolante do coletor deve ser capaz de suportar temperaturas até 204°C sem emitir substâncias voláteis.[25]

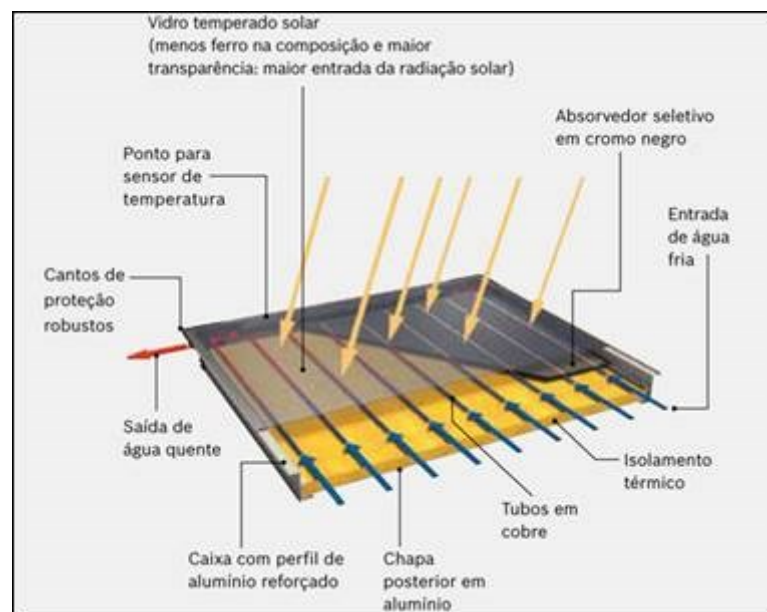


Figura 38 – Composição de um painel solar térmico plano[26]

- **Coletor solar de concentração**

Os coletores de concentração direcionam a energia solar para um pequeno absorvedor que contém água ou outro fluido, alcança assim temperaturas mais altas do que os coletores planos devido à alta concentração de energia. Estes coletores necessitam de um sistema de rastreamento solar para que a radiação incida no ângulo correto, aumentando assim a eficiência, mas por outro lado aumentando também os custos e a complexidade da manutenção.

Um problema comum destes coletores é a fadiga do material nos tubos do absorvedor, provocada pela variação de temperatura dos tubos. No entanto, se substituir o aço por cobre nos tubos, consegue-se melhorar a condutibilidade térmica e eliminar a fadiga térmica.[25]

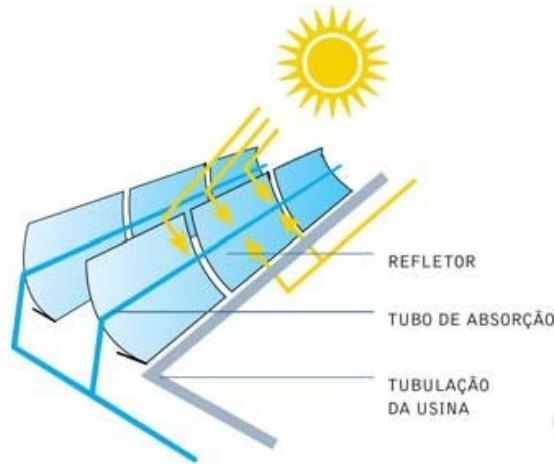


Figura 39 - Coletor solar térmico de concentração do tipo parabólico[27]

- **Coletor solar de tubo vácuo**

Os coletores de tubo vácuo são compostos por um conjunto de tubos de vidro transparente que contêm tubos metálicos no seu interior que funcionam como absorvedores. O interior destes tubos está sob vácuo, elimina assim as perdas de calor por convecção, e com a redução da pressão, as perdas por condução térmica também são minimizadas. Isto resulta numa redução significativa das perdas de calor para a atmosfera, de forma que, mesmo com uma temperatura de absorção de 120°C ou mais, a parte externa dos tubos de vidro permanece fria. A eficiência média anual de um sistema com coletores de tubos de vácuo situa-se entre 45% e 50%.[25]

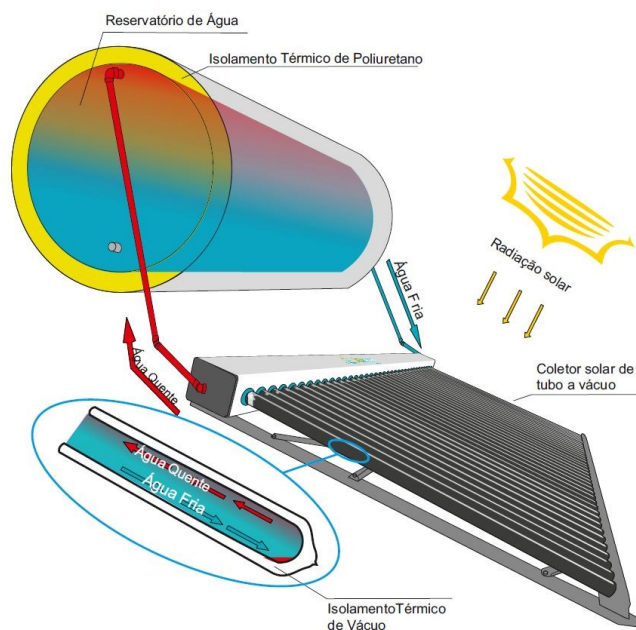


Figura 40 – Coletor solar térmico de tubo vácuo[28]

3.3.2. Tecnologias de aplicação

Com base nos diferentes tipos de coletores solares existentes, foram desenvolvidas tecnologias específicas para cada um deles. Assim, este subcapítulo aborda algumas das tecnologias derivadas dos sistemas de coletores solares.

- **Tecnologia de cilindro-parabólico (coletor solar de concentração)**

A tecnologia cilindro-parabólico é uma solução limpa e madura, com um longo historial de sucesso em instalações de grande escala desde os anos oitenta. Esta tecnologia tem demonstrado um desempenho excecional e tem melhorado significativamente a sua eficiência e custo ao longo dos anos.

O sistema de captação solar é composto pelo coletor e pelo absorvedor. Tal como outros coletores de concentração, os coletores cilindro-parabólicos (CCP) só aproveitam a radiação solar direta. Assim, para maximizar a captação de energia, os coletores precisam de ajustar a sua posição ao longo do dia, e giram em torno de um eixo paralelo à sua linha focal.

O absorvedor destes coletores é um tubo de vidro revestido a negro que contém um fluido térmico. Este revestimento tem alta capacidade de absorção da radiação solar e baixa capacidade de reflexão. A superfície refletora concentra a radiação solar no tubo e aquece o fluido térmico no seu interior. O fluido quente é bombeado para permutadores de calor, onde é gerado vapor sobreaquecido a alta pressão. Este vapor é utilizado num ciclo de Rankine para produzir eletricidade. O vapor de exaustão da turbina é condensado e devolvido aos permutadores para ser novamente convertido em vapor. Após arrefecer nos permutadores, o fluido é recirculado pelo sistema de captação solar para repetir o processo, como demonstrado na Figura 41.[29]

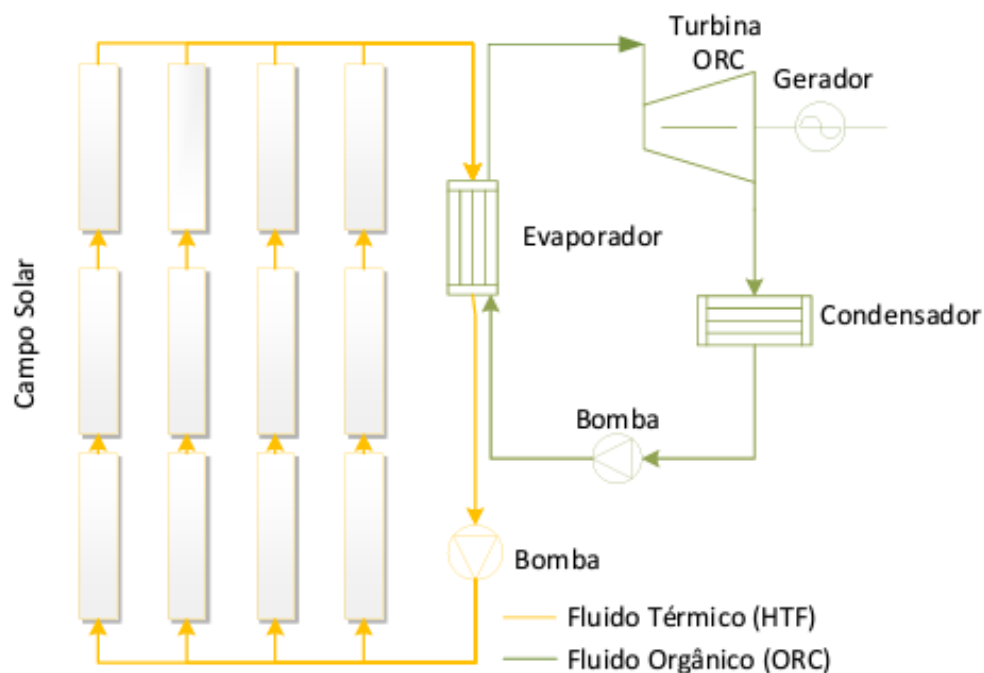


Figura 41 - Representação esquemática de um campo solar da tecnologia cilindro-parabólico[29]

- **Tecnologia de disco parabólico**

Em sistemas de tecnologia de disco parabólico, o coletor é um disco com uma superfície espelhada que reflete e concentra a luz solar diretamente para o absorvedor, e gera o calor suficiente para a produção de eletricidade. Os espelhos de vidro conseguem refletir entre 90% a 94% da radiação solar incidente.

A unidade de conversão de energia consiste no absorvedor térmico e no motor/gerador. O absorvedor térmico atua como interface entre o disco refletor e o gerador, absorve a energia solar concentrada e converte-a em calor. Este calor é transferido para gerador através de tubos que contêm um fluido de refrigeração, como hidrogênio ou hélio.

O sistema de gerador utiliza o calor do absorvedor para produzir eletricidade. Um tipo comum de motor utilizado é o motor de Stirling, que utiliza o calor de uma fonte externa para mover pistões e gerar energia mecânica. Esta energia mecânica, na forma de rotação do motor, é utilizada para acionar o gerador e produzir eletricidade.[25] e[30]

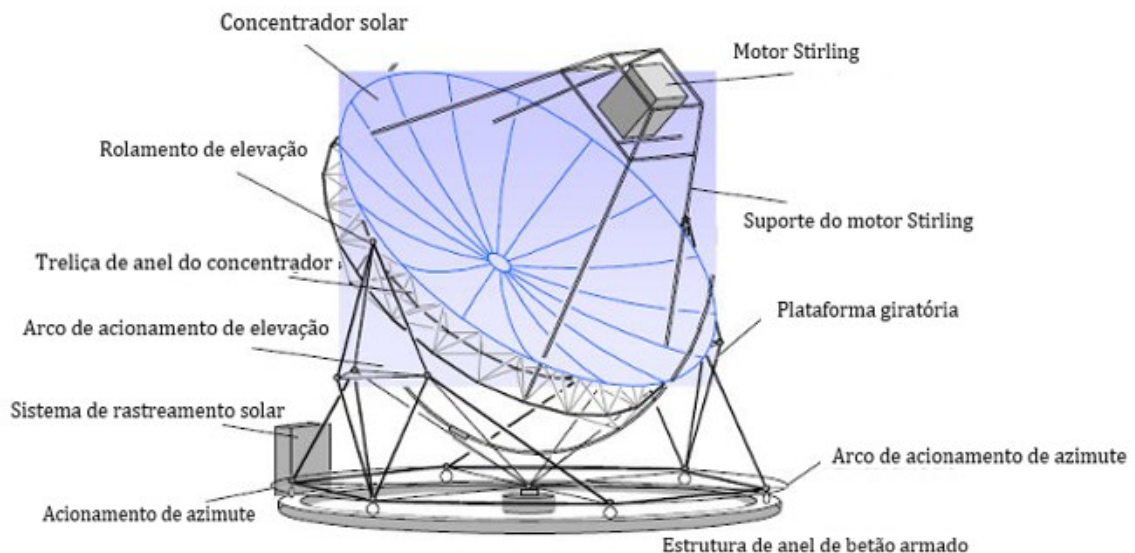


Figura 42 – Componentes de um painel solar térmico de disco parabólico - adaptado[30]

- **Tecnologia de torre solar**

Os sistemas de torre para energia solar térmica são compostos por grandes espelhos móveis chamados heliostatos, que refletem a luz solar em direção a um absorvedor que posiciona no topo de uma torre central. Esses heliostatos são ajustados por um programa computacional para seguir o movimento do sol, e assim maximiza-se a captura de energia ao longo do dia.

O absorvedor, localizado no ponto mais alto da torre, recebe a luz solar concentrada pelos heliostatos, gerando-se calor, que depois aquece um fluido como água ou sais fundidos. Esse calor é utilizado para gerar eletricidade por meio de um ciclo de vapor de Rankine, que opera em altas temperaturas para aumentar a eficiência na conversão de calor em eletricidade.

A torre serve como suporte para o absorvedor, que situa num ponto acima dos heliostatos para evitar sombreamentos e bloqueios que possam reduzir a eficiência do sistema. Além disso, o

armazenamento de energia solar é uma funcionalidade importante desses sistemas, permite que a energia seja utilizada mesmo quando não há luz solar suficiente, o que ajuda a garantir uma produção estável de eletricidade ao longo do tempo.

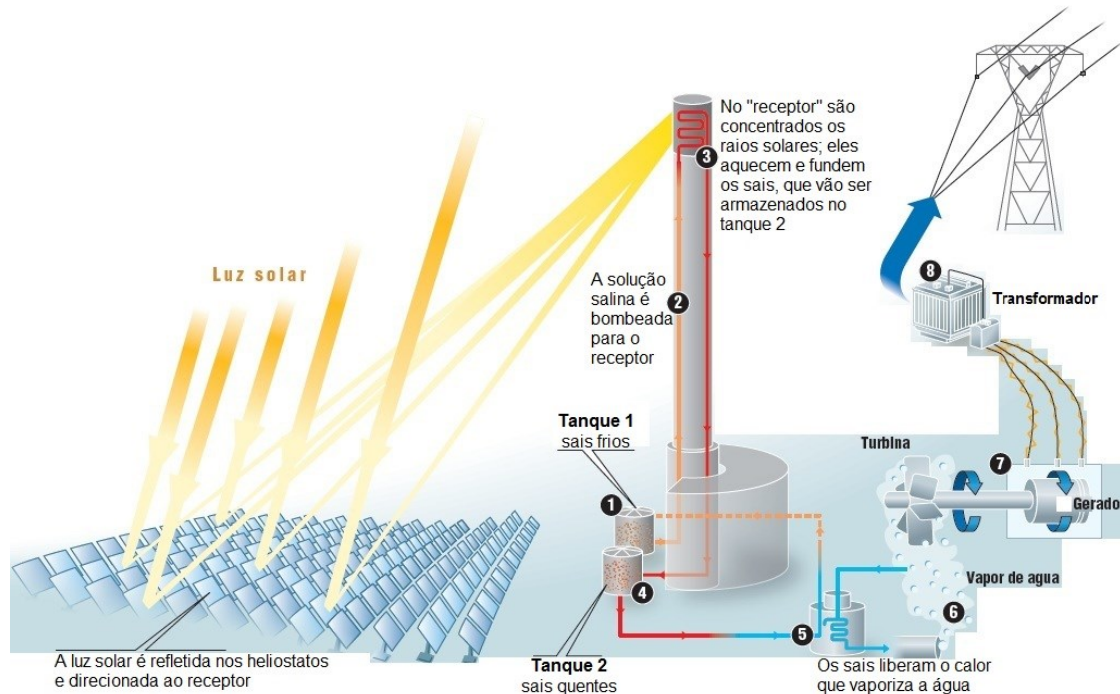


Figura 43 -Esquema do ciclo de funcionamento de tecnologia de torre solar[31]

Em resumo, os sistemas de torre para energia solar térmica são projetados para captar eficientemente a energia solar e convertê-la em eletricidade limpa e sustentável. Devido à complexidade e ao tamanho dos seus componentes, como os heliostatos e o absorvedor, os sistemas de torre têm um custo de instalação mais elevado em comparação com outras tecnologias de energia solar térmica. No entanto, essa tecnologia oferece uma eficiência significativa na captura e uso da energia solar, que contribui para a redução das emissões de carbono e para a sustentabilidade energética a longo prazo.[25]

3.4. Principais tecnologias aplicadas da produção e armazenamento de hidrogénio

O hidrogénio, tal como referido anteriormente, é uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis, com o potencial de ser uma fonte de energia limpa, fiável e acessível, pois a sua combustão com oxigénio produz apenas água, como demonstrado na Figura 44. Pode ser usado diretamente em motores de combustão interna, turbinas e caldeiras de processo com pequenas modificações, ou em células de combustível para gerar eletricidade com uma eficiência de até 60%. Em sistemas de cogeração, pode alcançar eficiências energéticas totais de até 80%.

Embora as células de combustível sejam atualmente mais caras que os motores de combustão interna, espera-se que os custos diminuam com o desenvolvimento e produção em maior

escala. A "economia do hidrogénio" promove o uso do hidrogénio como principal combustível, regenerável diretamente da água por eletrólise, proporcionando uma alternativa sustentável e limpa.[1]

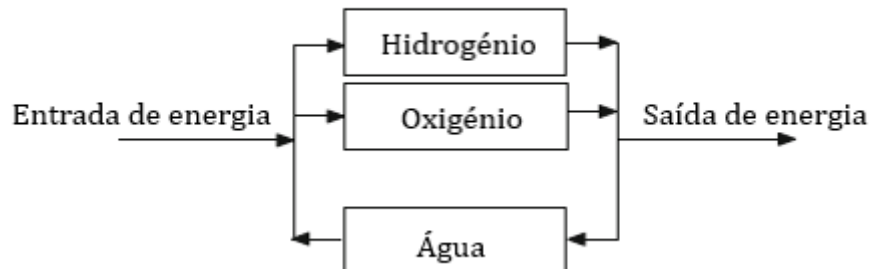


Figura 44 -Esquema adaptado da produção de hidrogénio[1]

3.4.1. Produção de hidrogénio

Neste subcapítulo, serão abordadas várias metodologias de produção de hidrogénio, incluindo o processo de reformação a vapor, a reação do vapor com o carbono, a produção eletrolítica de hidrogénio e a decomposição térmica da água para produção de hidrogénio. Apesar de existirem mais tecnologias de produção de hidrogénio, nesta tese irá se focar nos processos mencionados anteriormente.

- **O processo de reformação a vapor/reação de vapor com carbono**

O processo de reformação a vapor consiste em eliminar as impurezas, como o enxofre, do gás natural que contém metano. Desta forma, o metano reage com o vapor de água a uma temperatura elevada, utilizando óxido de níquel como catalisador. A Equação 19 representa o desenvolvimento deste procedimento.



De seguida, é acrescentado ar para converter o metano residual que não reagiu durante a reação, Equação 20.



Deste modo, segue-se uma reação de mudança água-gás a uma temperatura mais baixa, obtendo-se assim uma produção de maior quantidade de hidrogénio, a partir do monóxido de carbono e vapor de água.



Esta reação segue-se através a variação de energia livre de formação de Gibbs com a variação de temperatura, que obtém resultados diferentes em cada situação, a Figura 45 demonstra esta evolução na produção de hidrogénio.

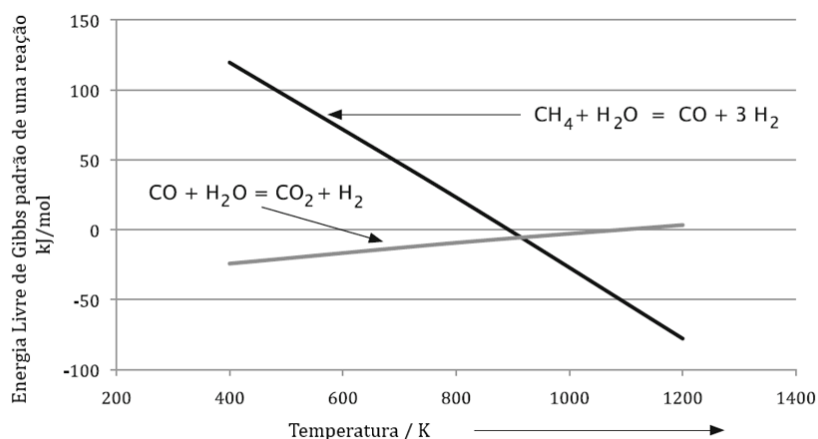


Figura 45 -Variação de energia livre de Gibbs com a evolução de temperatura na reação da extração do hidrogénio através do metano[1]

Em países que possuem grandes quantidades de carvão, o carvão pode ser utilizado como fonte de energia para a produção de gás de síntese, que é uma mistura de monóxido de carbono e hidrogénio, através da reação do vapor de água com carbono sólido. O monóxido de carbono gerado pode reagir com vapor de água, produzindo-se dióxido de carbono e hidrogénio.

As centrais elétricas que utilizam carvão para gerar hidrogénio através desse processo têm uma eficiência global de cerca de 34%. No entanto, se o dióxido de carbono resultante da reação água-gás for capturado, a eficiência dessas centrais pode aumentar para mais de 40%.

A energia livre de Gibbs para esta reação do vapor com o carbono diminui à medida que a temperatura aumenta, sendo que essa reação só ocorre de forma favorável acima de 940 K. Já a reação de água-gás é favorável apenas em temperaturas mais baixas, tal como é ilustrado na Figura 46.[1]

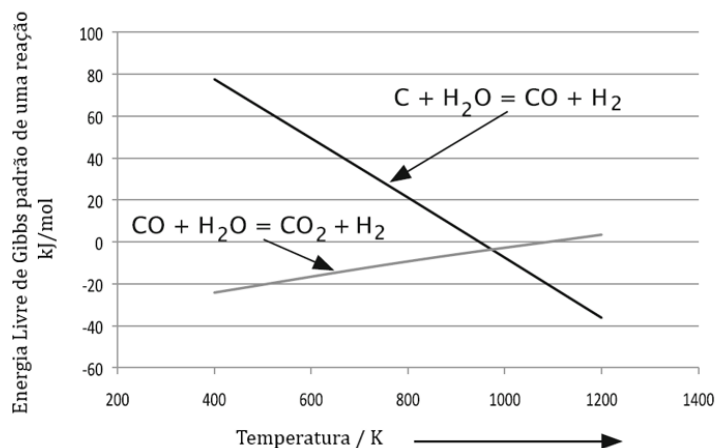


Figura 46 - Variação de energia livre de Gibbs com a evolução de temperatura na reação da extração do hidrogénio através do carbono[1]

- **A produção eletrolítica de hidrogénio**

A eletrólise da água é um processo usado para produzir hidrogénio e oxigénio, que aplica uma tensão entre dois elétrodo, Equação 22. No elétrodo negativo forma-se hidrogénio, Equação 23, enquanto no elétrodo positivo forma-se oxigénio, Equação 24. Ambos os gases podem ser recolhidos separadamente e têm valor comercial significativo.



Apesar deste método poder gerar hidrogénio puro e aproveitar o vasto fornecimento de água na Terra, só cerca de 4% do hidrogénio global é atualmente produzido pela esta forma, devido aos custos elevados. Contudo, a eletrólise apresenta a vantagem de permitir a geração descentralizada de hidrogénio em pequenas unidades próximas aos locais de utilização, o que reduz os custos associados ao armazenamento e transporte do mesmo.[1]

- **Decomposição térmica da água para produção de hidrogénio**

Uma outra forma para produzir hidrogénio a partir da água é a sua decomposição térmica, onde a água é aquecida a uma temperatura muito elevada. A estabilidade da água em relação aos seus componentes, hidrogénio e oxigénio, pode ser descrita pela sua energia livre padrão de formação, que depende da temperatura. Essa energia pode ser expressa pela Equação 25.

$$\Delta G_f^0 = \Delta H_f^0 - T\Delta S_f^0 \quad \text{Equação 25}$$

Assim, através dos dados de livro “Dados Termodinâmicos de Substâncias Puras”[32] constrói-se um gráfico que demonstra a variação da energia livre padrão de Gibbs com a evolução de temperatura na formação de água, que é mostrada na Figura 47.

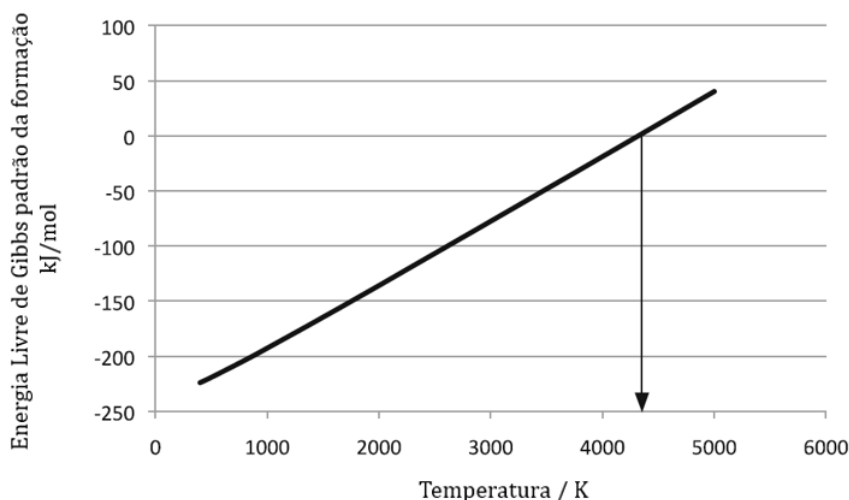


Figura 47 - Variação de energia livre de Gibbs com a evolução de temperatura na formação de água[1]

3.4.2. Armazenamento de hidrogénio

O hidrogénio pode ser armazenado como gás comprimido, líquido e até em forma sólida. Essa variedade de métodos de armazenamento simplifica e amplia as formas de uso do hidrogénio. Apesar das dificuldades na inovação das tecnologias de produção, esse elemento tem um grande potencial futuro, impulsiona o desenvolvimento da economia do hidrogénio.

- **Armazenamento de hidrogénio em gás comprimido**

O método mais prático para armazenar hidrogénio é comprimi-lo como gás. Os principais desafios deste método são a necessidade de grandes volumes para armazenar o gás, mesmo quando comprimido, e os recipientes que possam resistir a impactos. Esses recipientes têm normalmente formato de cilindro, os cilindros atuais são fabricados com ligas de aço resistentes à fragilização por hidrogénio. Procura-se maior rigidez e materiais mais leves, recipientes mais avançados são feitos de alumínio e revestidos com fibra de carbono. Além disso, estão a ser desenvolvidos cilindros totalmente compósitos, que utilizam fibra de carbono impregnada com resina ou outro material ligante. A Figura 48 apresenta a secção transversal de um cilindro de hidrogénio comprimido.

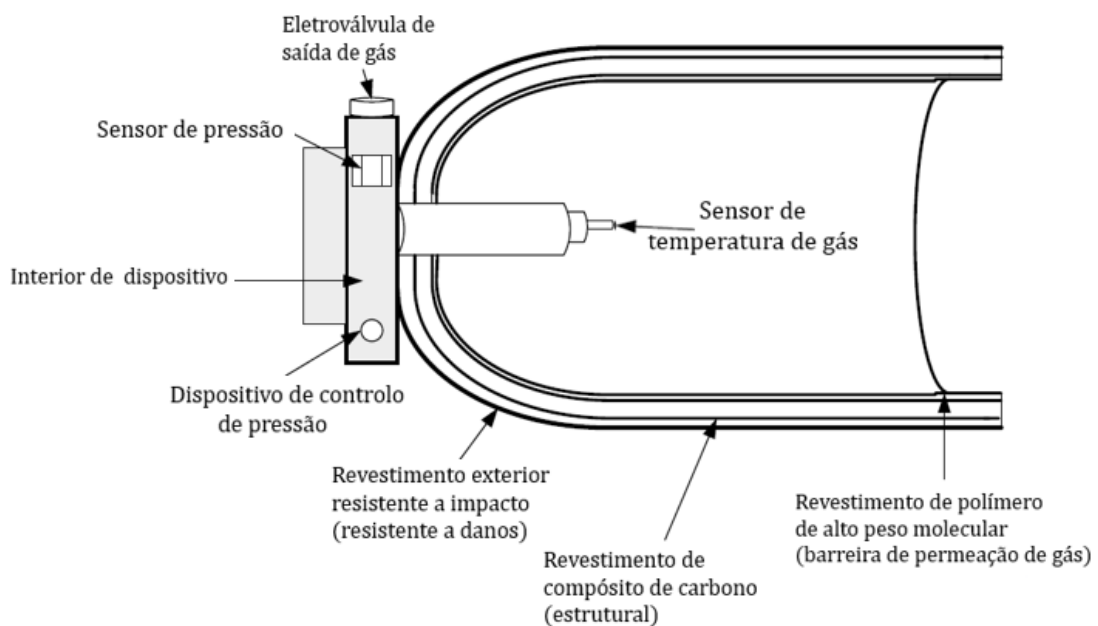


Figura 48 – Representação esquemática de um depósito para armazenamento de hidrogénio comprimido[33]

Os atuais desafios dos tanques de gás hidrogénio comprimido incluem o alto custo, peso elevado e grande volume necessário. No entanto, a pesquisa está focada em encontrar fibras de carbono mais acessíveis para manter a espessura ideal do tanque sem aumentar o peso ou volume. Existem duas abordagens que estão a ser exploradas, o uso de tanques criogénicos, que aumentam a capacidade volumétrica à medida que a temperatura do gás é reduzida, e o desenvolvimento de tanques adaptáveis que otimizam o espaço nos veículos utilizando estruturas de suporte flexíveis. Essas inovações têm o objetivo de tornar o armazenamento de hidrogénio mais eficiente e viável como fonte de energia alternativa.[33]

- **Armazenamento de hidrogénio líquido**

O hidrogénio líquido é preferido em sistemas de células de combustível devido à sua maior densidade de energia em comparação com o hidrogénio comprimido. Os tanques de hidrogénio líquido podem armazenar mais hidrogénio por volume do que os tanques de gás comprimido, com uma capacidade volumétrica de 0,070 kg/L.

No entanto, o uso de hidrogénio líquido apresenta desafios significativos. Isso inclui a evaporação do hidrogénio, o elevado consumo de energia necessário para liquefação do hidrogénio, além dos custos elevados, volume e peso dos tanques. A liquefação do hidrogénio requer uma quantidade considerável de energia, o que torna os custos operacionais elevados. A evaporação contínua do hidrogénio também deve ser minimizada por questões de segurança e eficiência.

Para armazenar hidrogénio líquido, são necessários tanques criogénicos com isolamento térmico avançado e sistemas de arrefecimento criogénico, como o uso de nitrogénio líquido para manter temperaturas extremamente baixas, 22 K. Recentemente, o desenvolvimento de tanques híbridos que combinam características de armazenamento de alta pressão e criogénico tem sido explorado como uma alternativa mais compacta e eficiente, Figura 49.

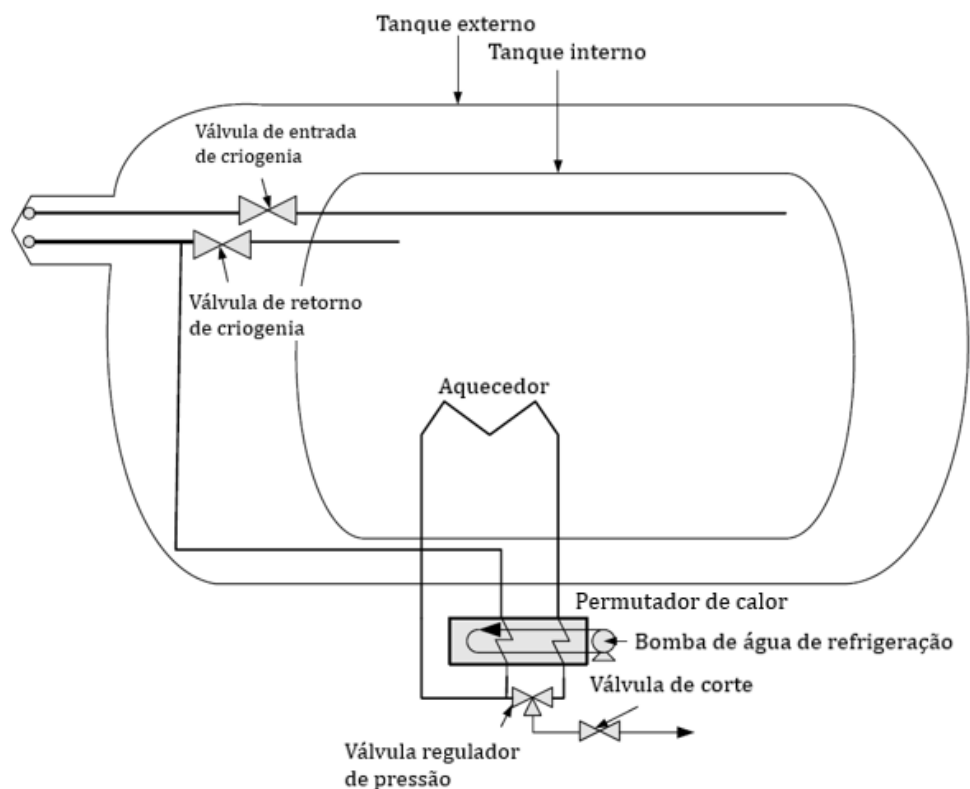


Figura 49 - Esquema de um depósito para armazenamento de hidrogénio líquido - adaptado[33]

Em resumo, enquanto o hidrogénio líquido oferece vantagens significativas em densidade de energia, os desafios técnicos e energéticos relacionados à sua liquefação e armazenamento continuam a ser áreas críticas de pesquisa e desenvolvimento na tecnologia de células de combustível a hidrogénio.[33]

- **Armazenamento de hidrogénio em nanotubos de carbono**

As tecnologias de nanotubos de carbono são exploradas para o armazenamento de hidrogénio devido às suas propriedades especiais que permitem armazenar pequenas quantidades de hidrogénio em condições normais de temperatura e pressão. Este campo de pesquisa visa alcançar metas ambiciosas estabelecidas pelo “Departamento de Energia dos EUA” [34] para veículos movidos a célula de combustível.

Existem três tipos principais de nanotubos de carbono estudados: nanofibras gráficas, nanotubos de carbono de parede única (SWNTs) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWNTs). As nanofibras gráficas são produzidas pela quebra de hidrocarbonetos sobre catalisadores, que resultam em estruturas variadas com diferentes capacidades de absorção de hidrogénio.

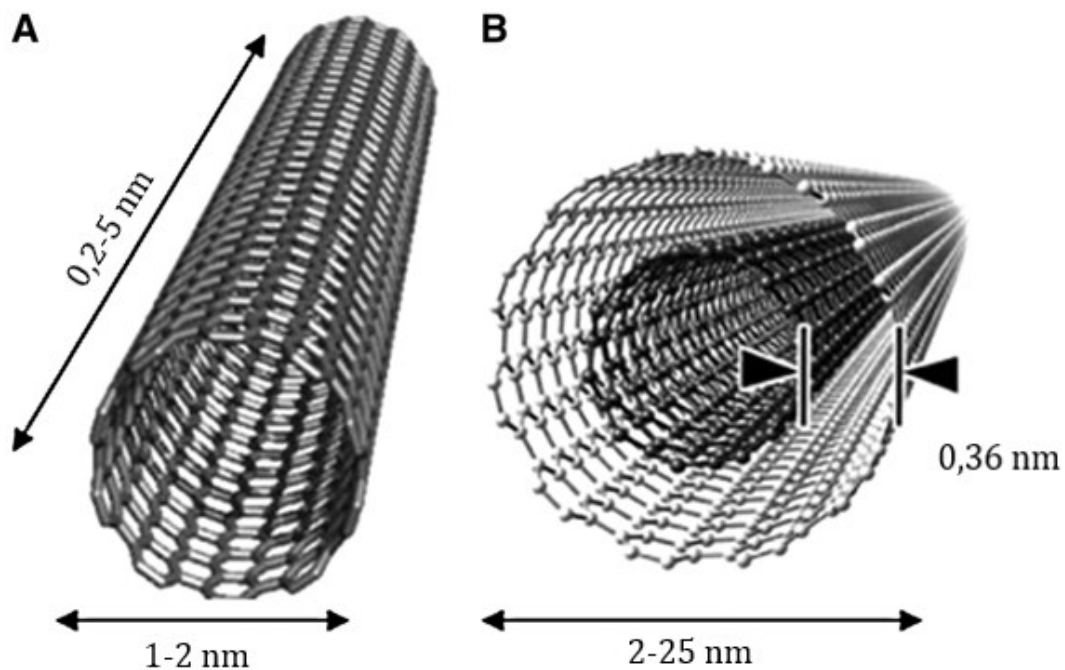


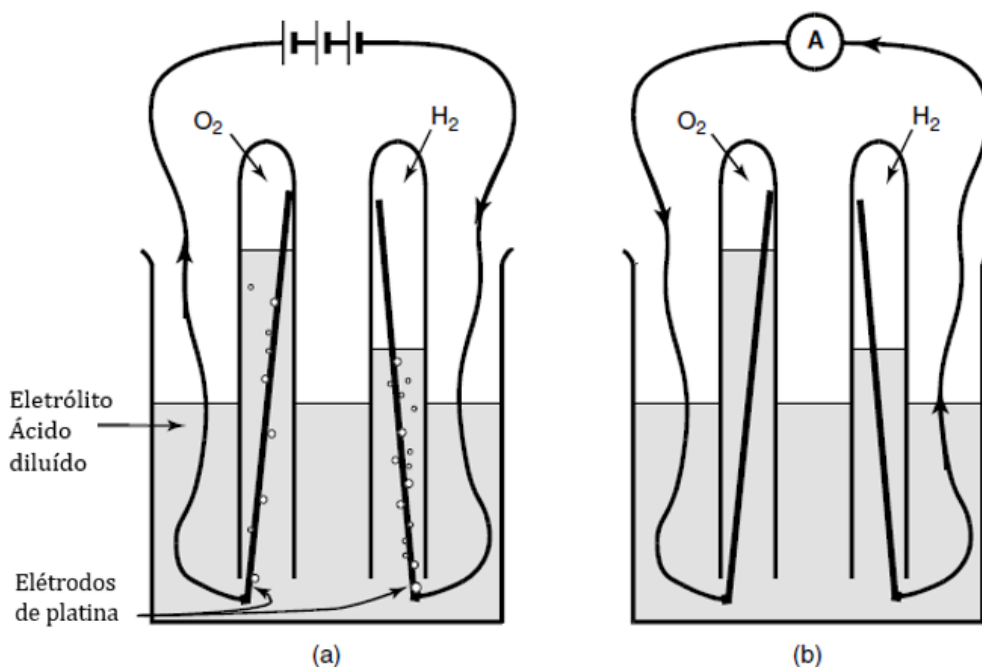
Figura 50 -Representação esquemática de nanotubo de parede única (A) e de paredes múltiplas (B)[35]

Por outro lado, os nanotubos de carbono de parede única são fabricados pela decomposição catalítica de hidrocarbonetos a altas temperaturas, que resultam assim em tubos com uma única camada de carbono. Esta abordagem gera nanotubos com potencial significativo para o armazenamento eficiente de hidrogénio, devido às suas propriedades estruturais únicas e capacidades físico-químicas.[33]

3.4.3. Células combustíveis de hidrogénio

A célula de combustível de hidrogénio gera eletricidade combinando hidrogénio e oxigénio, reação semelhante à inversa do eletrólise da água, cujo produto é água e energia. No ânodo, o hidrogénio é separado em prótons e eletrões. Os prótons atravessam o eletrólito até o cátodo, enquanto os eletrões fluem pelo circuito externo, gerando eletricidade. No cátodo, os prótons e eletrões combinam-se com o oxigénio para formar água. Esse processo é eficiente e limpo, produzindo energia elétrica sem poluição.

A Figura 51 demonstra o princípio básico da célula de combustível de hidrogénio, onde o hidrogénio e o oxigénio se combinam para produzir energia elétrica em vez de energia térmica. No entanto, esta reação gera correntes muito pequenas devido à baixa área de contacto entre o gás, o eletrodo e o eletrólito, e à grande distância entre os eletrodos, que causa resistência ao fluxo de corrente.



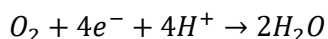
Observe que as setas representam o fluxo de elétrons negativos do - para +.

Figura 51 - Representação esquemática de reação de eletrólise de água (a) e produção de energia a partir da reação inversa com hidrogénio e oxigénio(b)[36]

Para resolver esses problemas, os eletrodos de células combustíveis são geralmente planos e porosos, com uma camada fina de eletrólito, que permite maximizar o contato entre o eletrodo, o eletrólito e o gás. No ânodo de uma célula de combustível, com eletrólito ácido, Equação 26, o hidrogénio ioniza-se, liberta eletrões e forma iões de (H^+). Na reação do cátodo, Equação 27, o oxigénio reage com os eletrões de iões de (H^+) para formar água.[36]



Equação 26



Equação 27

Os eletrões passam pelo circuito elétrico do ânodo para o cátodo, e os iões (H^+) atravessam o eletrólito. Certos polímeros também podem servir como membranas de troca de protões. Para equilibrar o sistema, são necessárias duas moléculas de hidrogénio para cada molécula de oxigénio. O eletrólito permite apenas a passagem de iões (H^+), impede assim a passagem de eletrões pelo eletrólito para garantir que eles fluam pelo circuito externo, a Figura 52 faz uma ilustração simples deste processo de funcionamento de uma célula combustível de hidrogénio.[36]

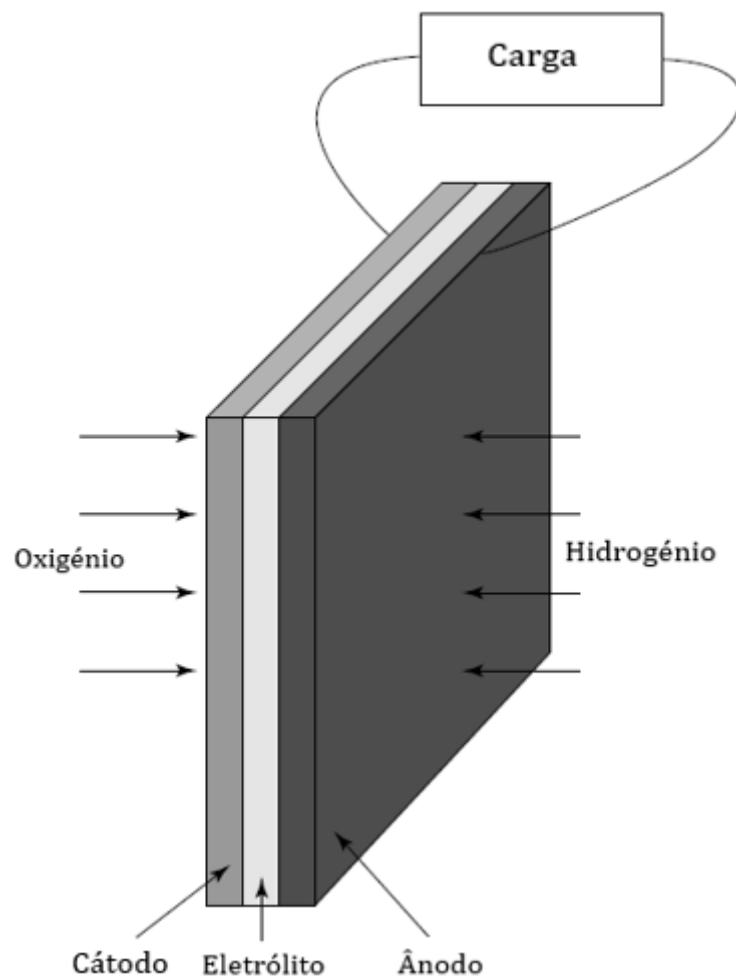


Figura 52 - Representação esquemática de uma célula combustível de hidrogénio[36]

4. Análise e comparação dos dados obtidos

Neste capítulo, apresenta-se uma análise e comparação da capacidade energética de vários tipos de sistemas de armazenamento através dos gráficos de GED (Densidade Gravimétrica de Energia) e VED (Densidade Volumétrica de Energia), que podem proporcionar uma noção visual das diferentes potencialidades dos sistemas de armazenamento.

4.1. Apresentação dos dados

Na Tabela 12, apresentam-se os resultados de densidade energética de vários sistemas de armazenamento de energia, que mostram de forma geral os materiais mais comuns e que podem ser utilizados em métodos de armazenamento de energia a longo prazo.

Tabela 12 - Dados de densidade energética aproximados de vários sistemas de armazenamento de energia [33], [34], [37], [38]

Sistema de armazenamento	Densidade Gravimétrica (kWh/kg)	Densidade Volumétrica (kWh/L)
Hidrogénio comprimido (350bar)	33,60	0,85
Hidrogénio comprimido (700bar)	33,60	1,40
Hidrogénio líquido	33,60	2,36
Hidretos químicos	1,40	0,95
Hidretos metálico	0,30	0,90
Metano	15,40	0,36
Metanol	6,40	4,60
Etanol	7,85	6,10
Propano	13,90	6,60
Gasolina	12,70	9,70
Gasóleo	11,80	10,70
Baterias de iões de lítio	0,15	0,40
Baterias de chumbo-ácido	0,04	0,07

Os valores de densidade energética, mostrado na Figura 53, é importante para avaliar a eficiência de combustíveis e sistemas de armazenamento. O hidrogénio líquido tem uma densidade energética de 33,6 kWh/kg em massa e 2,36 kWh/L em volume, exige uma condição de armazenamento mais crítico, a uma temperatura de 253°C negativos. O hidrogénio gasoso comprimido tem a mesma densidade em massa, com 0,85 kWh/L a 350 bar e 1,4 kWh/L a 700 bar, sendo mais prático, contudo apresenta menor densidade volumétrica. O metano tem uma densidade energética de 15,4 kWh/kg e 0,36 kWh/L a 200 bar, o que limita a eficiência volumétrica. Combustíveis fósseis como a gasolina têm 12,7 kWh/kg e 9,7 kWh/L, enquanto o gasóleo tem 11,8 kWh/kg e 10,7 kWh/L, estes oferecem altas densidades volumétricas e armazenamento fácil.

As baterias de chumbo-ácido têm uma densidade energética de 0,04-0,07 kWh/kg e 0,06-0,11 kWh/L, sendo económicas, mas com baixa densidade, enquanto as baterias de iões de lítio têm 0,10-0,26 kWh/kg e 0,25-0,73 kWh/L, ideais para aplicações móveis. Os hidretos químicos, como o hidreto de sódio e o hidreto de potássio, têm densidades energéticas de cerca de 1,0-1,5 kWh/kg, cuja dificuldade destes elementos são o armazenamento e liberação de hidrogénio. Os hidretos metálicos, como o hidreto de ferro e o hidreto de lítio, têm 1,2-1,5 kWh/kg e oferecem soluções compactas, mas com requisitos específicos para a liberação de hidrogénio.

A escolha entre estes métodos depende das necessidades específicas de armazenamento, custo e eficiência, com o hidrogénio a destacar-se pela alta densidade em massa, os combustíveis fósseis pela eficiência volumétrica e as baterias de iões de lítio pela alta densidade energética para aplicações móveis.

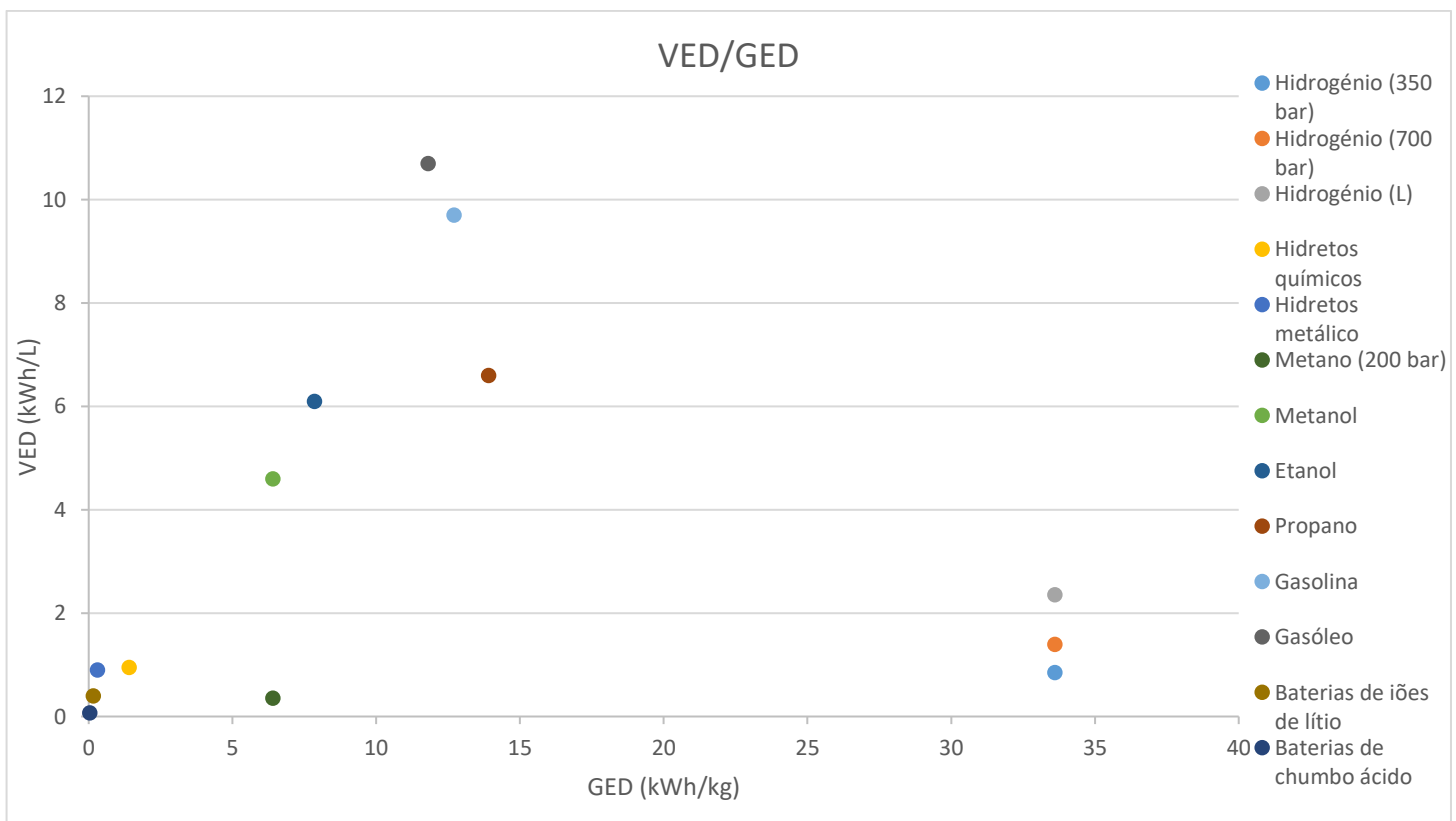


Figura 53 - Gráfico de comparação de VED por GED dos diversos combustíveis

5. Conclusão

Neste último capítulo, apresenta-se a conclusão deste trabalho, destacando-se as pesquisas realizadas e os resultados obtidos. Em seguida, um breve ponto de situação que inclui as limitações encontradas e sugestões para trabalhos futuros, que podem ser realizados com maior disponibilidade e mais cuidado na investigação dos assuntos científicos.

5.1. Conclusões finais

Neste trabalho, explorou-se diversos sistemas de armazenamento de energia, destacando-se as tecnologias mais comuns, como baterias, armazenamento mecânico, térmico e hidrogénio.

As baterias, são amplamente reconhecidas pela alta eficiência e densidade de energia, sendo ideais para aplicações móveis e sistemas de pequena a média escala. Em contraste, os sistemas de armazenamento mecânico, como o ar comprimido, bombagem hidráulica, etc, são mais econômicos para grandes volumes de armazenamento e têm uma vida útil prolongada, mas possuem menor densidade de energia. O armazenamento térmico é eficaz para aplicações que envolvem calor, enquanto o hidrogénio oferece flexibilidade e potencial para armazenamento em larga escala, apesar dos custos elevados e da menor eficiência de conversão.

Em suma, cada tecnologia tem as suas vantagens e limitações, e a escolha ideal depende das necessidades específicas de cada aplicação, como eficiência, custo e escala. Muitas vezes, uma combinação de diferentes sistemas pode oferecer a melhor solução para equilibrar as ofertas e a demanda de energia de forma sustentável.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

As pesquisas realizadas e os resultados obtidos fornecem uma visão geral das tecnologias disponíveis e das suas aplicações. Torna-se importante reconhecer que o conhecimento atual ainda é limitado e insuficiente para uma avaliação completa de todos os aspetos envolvidos. A tecnologia de armazenamento de energia está em constante evolução, sendo que diferentes inovações são continuamente procuradas e desenvolvidas.

Portanto, é importante que as futuras investigações se aprofundem na análise de tecnologia não referida neste trabalho, abordando aspetos que ainda não são completamente explorados, como a integração com sistemas existentes e o impacto ambiental em cada solução. A continuação da pesquisa permitirá uma compreensão mais detalhada das vantagens e limitações de cada sistema e contribuirá para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis para o armazenamento de energia.

Referências

- [1] R. Huggins, *Energy Storage*, Second Edi. London: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-21239-5.
- [2] M. A. Dinçer, Ibrahim & Rosen, *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, 2°. United Kingdom: A John Wiley and Sons, Ltd, 2011. doi: 10.1002/9780470970751.
- [3] A. Khyad, H. Samrani, M. B.-J. M. M. A. Ciências, e undefined 2016, «Revisão do estado da arte de sistemas de armazenamento de energia térmica usando PCM operando com pequenas diferenças de temperatura: Foco em Parafina», *jmaterenvironsci.com* A Khyad, H Samrani, MN BargachJ. *Matéria. Meio Ambient. Ciências*, 2016•*jmaterenvironsci.com*, vol. 7, n. 4, pp. 1184–1192, 2016, Acedido: 16 de Dezembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N4/133-JMES-2276-2015-Khyad.pdf
- [4] O. S. Burheim, «Engineering energy storage», *Eng. Energy Storage*, pp. 1–223, Jul. 2017, doi: 10.1016/C2017-0-01046-7.
- [5] G.Genta, «Kinetic Energy Storage», *Kinet. Energy Storage*, 1985, doi: 10.1016/C2013-0-00901-2.
- [6] C. de S. F. Gomes, «Águas minerais engarrafadas», *Rev. Ciência Elem.*, vol. 11, n. 1, Mar. 2023, doi: 10.24927/RCE2023.004.
- [7] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, e Y. Ding, «Progress in electrical energy storage system: A critical review», *Progress in Natural Science*, vol. 19, n. 3. Elsevier, pp. 291–312, 10 de Março de 2009. doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
- [8] A. : Helder, A. Sousa, F. Orientador, F. Pradelle, e M. Energia, «Um Estudo Sobre o Aproveitamento da Energia dos Oceanos-Energia das Ondas: Renovável, Economicamente Viável e Limpa», *peteetricaufu.com.br*, Acedido: 9 de Dezembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://www.peteetricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2014/ceel2014_artigo041_r01.pdf
- [9] A. Arabkoohsar, «Mechanical Energy Storage Technologies», *Mech. Energy Storage Technol.*, pp. 1–196, Jan. 2020, doi: 10.1016/C2019-0-01241-1.
- [10] A. Poullikkas, «A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 778–788, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.07.017.
- [11] C. Wen, B. Boukamp, ...RA Huggins -... de The Electrochemical, e undefined 1979, «Propriedades termodinâmicas e de transporte de massa de “LiAl”», *iopscience.iop.org*, Acedido: 30 de Maio de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2128939/meta>
- [12] C. J. Wen, C. H. B. A. Boukamp, I. D. Raistrick, W. Weppner, e R. A. Huggins, «Use of electrochemical methods to determine chemical-diffusion coefficients in alloys: Application to ‘lial’», *Int. Met. Rev.*, vol. 26, n. 1, pp. 253–268, Jan. 1981, doi: 10.1179/IMTR.1981.26.1.253.
- [13] C. J. Wen, W. Weppner, B. A. Boukamp, e R. A. Huggins, «Electrochemical investigation

- of solubility and chemical diffusion of lithium in aluminum», *Metall. Trans. B*, vol. 11, n. 1, pp. 131–137, Mar. 1980, doi: 10.1007/BF02657182.
- [14] M. S. Whittingham, «Electrical energy storage and intercalation chemistry», *Science* (80-.), vol. 192, n. 4244, pp. 1126–1127, 1976, doi: 10.1126/science.192.4244.1126.
- [15] «UNIPEDE - União Internacional dos Produtores e Distribuidores de Energia Elétrica | Perfil do Anuário UIA | União de Associações Internacionais». Acedido: 26 de Maio de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://uia.org/s/or/en/1100065583>
- [16] «NREL, National Renewable Energy Laboratory., Small Hydropower Systems. USA : s.n., 2001.» Acedido: 15 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/small-hydropower-systems-energy-efficiency-and-renewable-energy-c>
- [17] «Association, The British Hydropower., A GUIDE TO UK MINI-HYDRO. s.l. : BHA, 2001.» Acedido: 15 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: british-hydro.org/wp-content/uploads/2023/09/BHA-Micro-Hydro-Guide-2024-2.pdf
- [18] J. P. S. Paiva, *Livro Redes de Energia Elétrica. Uma Análise Sistêmica*. 2007.
- [19] O. Uso De Bombas, F. C. Turbinas, F. Manuel, e O. Piqueiro, «Recuperação de energia hidráulica em sistemas de distribuição de água: o uso de bombas a funcionar como turbinas», 2008, Acedido: 15 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59943/1/000129809.pdf>
- [20] M. G.-P. U. do Porto e undefined 1996, «O alternador síncrono trifásico», *paginas.fe.up.pt*, p. 76, 1995, Acedido: 15 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/maquel/AD/AST_model.pdf
- [21] L. da Costa, «Turbinas_Hidraulicas». Acedido: 2 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://moodle.isep.ipp.pt/mod/folder/view.php?id=91916>
- [22] A. Harvey, A. Brown, P. Hettiarachi, e A. Inversin, «Micro-hydro design manual», 1993, Acedido: 15 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/7206235>
- [23] J. P. do C. P. Rocha, «Metodologia de projecto de sistemas de produção de electricidade descentralizada baseados em Energia Hídrica», 2008, Acedido: 25 de Maio de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60014/1/000136106.pdf>
- [24] F. M. O. Piqueiro, «Efeito da Regulação e da Forma e Dimensões da Câmara de Carga na Produtibilidade Energética de um Pequeno Aproveitamento Hidroeléctrico.pdf», 1991. Acedido: 15 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12918/1/Resumo.pdf>
- [25] P. T. S. Pereira, «Energia solar térmica: perspectivas do presente e do futuro», 2010, Acedido: 22 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60373/1/000142688.pdf>
- [26] J. P. S. M. Fonseca, E. M. M. Ferrari, e R. B. Cardoso, «Análise dos impactos energéticos e económicos do programa brasileiro de etiquetagem energética (PBE/Inmetro) em coletores solares térmicos do Brasil», *Res. Soc. Dev.*, vol. 7, n. 1, p. e1071180, Jan. 2018, doi: 10.17648/RSD-V7I1.101.
- [27] «Esquema de uma planta CSP de calhas parabólicas (IEA, 2010). | Baixar Diagrama

- Científico». Acedido: 30 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-de-uma-planta-CSP-de-calhas-parabolicas-IEA-2010_fig1_323951059
- [28] «Aquecedor Solar a Vácuo: simples e com o máximo de eficiência». Acedido: 30 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://instaline.com.br/aquecedor-solar-a-vacu-maxima-eficiencia/>
- [29] V. Andrés, P. Mantilla, J. Restrepo, e O. J. Venturini, «ANÁLISE TÉCNICA E ECONÓMICA DA INTEGRAÇÃO DA TECNOLOGIA DE CONCENTRAÇÃO SOLAR DE POTÊNCIA DE MÉDIA TEMPERATURA COM», *researchgate.net*, doi: 10.20906/CPS/CON-2016-1426.
- [30] M. Stirling, «ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE DISCO PARABÓLICO CON», 2009, Acedido: 30 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/77e8ca31-db91-48fc-b3f9-82ebc12bcf61>
- [31] «O Frio que vem do Sol: Eletricidade solar na Espanha: usina com tecnologia pioneira entra em operação». Acedido: 7 de Julho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ofrioquevemdosol.com.br/2011/11/eletricidade-solar-na-espanha-usina-com.html>
- [32] I. Barin, «Thermochemical Data of Pure Substances», *Thermochem. Data Pure Subst.*, Out. 1995, doi: 10.1002/9783527619825.
- [33] C. Spiegel, *Designing and Building Fuel Cells*, 1º. 2007.
- [34] «Department of Energy». Acedido: 7 de Agosto de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.energy.gov/>
- [35] «Conceptual diagram of single-walled carbon nanotube (SWCNT) (a) and... | Download Scientific Diagram». Acedido: 13 de Julho de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Conceptual-diagram-of-single-walled-carbon-nanotube-SWCNT-a-and-multiwalled-carbon_fig1_313626116
- [36] J. Larminie, A. Dicks, e M. McDonald, «Fuel cell systems explained», 2003, Acedido: 14 de Julho de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://sv.20file.org/up1/482_0.pdf
- [37] D. Linden e T. B. Reddy, *Handbook of batteries*, vol. 33, n. 04. 1995. doi: 10.5860/choice.33-2144.
- [38] G. Pinto, J. Monteiro, A. Baptista, L. Ribeiro, e J. Leite, «Study of the permeation flowrate of an innovative way to store hydrogen in vehicles», *Energies*, vol. 14, n. 19, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/en14196299.

Declaração de Integridade

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P. PORTO ISEP,

NOME:

Fu Gui Yang

Porto, 09 de setembro de 2024

