

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 30



Aula 30: Aproveitamento do hidrogénio como combustível.

Tópicos a Apresentar

1. O Hidrogénio
2. A Proveniência do Hidrogénio
3. Classificação do Hidrogénio
4. A Produção do Hidrogénio
5. Armazenamento do Hidrogénio
6. Uso do Hidrogénio



1. O Hidrogénio

O **hidrogénio** é o elemento químico de símbolo H e número atómico 1 da tabela periódica. Trata-se do elemento mais simples conhecido, cujo átomo é formado apenas por um protão e nenhum neutrão.

Embora esteja localizado no primeiro período e acima dos metais alcalinos (Grupo 1), este elemento não é um metal. Ele também não se enquadra em nenhum outro grupo, pois não apresenta características físicas e químicas semelhantes aos demais elementos.

A posição do hidrogénio na tabela periódica deve-se à sua distribuição electrónica $1s^1$, ou seja, o átomo apresenta um electrão na electrosserra.



1. O Hidrogénio

A massa atómica do hidrogénio é 1,008 u (unidades de massa atómica unificada). Ela é obtida a partir da média ponderada da massa de seus isótopos deutério, trítio e prótio.

A palavra "hidrogénio", de origem grega, é composta pelos termos *hydro* e *genes* e significa gerador de água.

Elemento: Hidrogênio

H

1 1s¹

H

1,008

Aplicações

- Combustível
- Indústria
- Produtos químicos

Metadados:

- Número atômico
- Distribuição eletrônica
- Símbolo
- Massa atômica
- Estado físico



1. O Hidrogénio

O hidrogénio é um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável em CNTP, caracterizado por possuir a maior quantidade de energia por unidade de massa 120,7 kJ/g, tem cerca de três vezes a energia da gasolina, o que o torna atractivo no mercado de energia.

Ele é um dos elementos mais abundantes no planeta terra, no entanto, está normalmente associado a outros elementos químicos, formando moléculas. Para obtenção de energia de Hidrogénio (H_2), é necessário o uso de tecnologias apropriadas. A tecnologia de armazenamento de energia na forma de Hidrogénio está relacionada com a forma como este gás é obtido.



2 A Proveniência do Hidrogénio

A Comissão Europeia (2020) definiu os seguintes conceitos utilizados na classificação do hidrogénio, conforme a sustentabilidade do seu processo produtivo:

- **Hidrogénio baseado em electricidade** é o que se refere ao hidrogénio produzido através da electrólise da água independentemente da fonte de electricidade. As emissões de gases de efeito estufa, durante todo o ciclo de vida da produção de hidrogénio, com base na electricidade, dependem de como esta é produzida;
- **Hidrogénio renovável** é o produzido através da electrólise da água e com a electricidade proveniente de fontes renováveis. As emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida completo da produção do hidrogénio são praticamente zero. O hidrogénio renovável também pode ser produzido por meio do biogás (ao invés do gás natural) ou da conversão bioquímica da biomassa, desde que em conformidade com os requisitos de sustentabilidade;



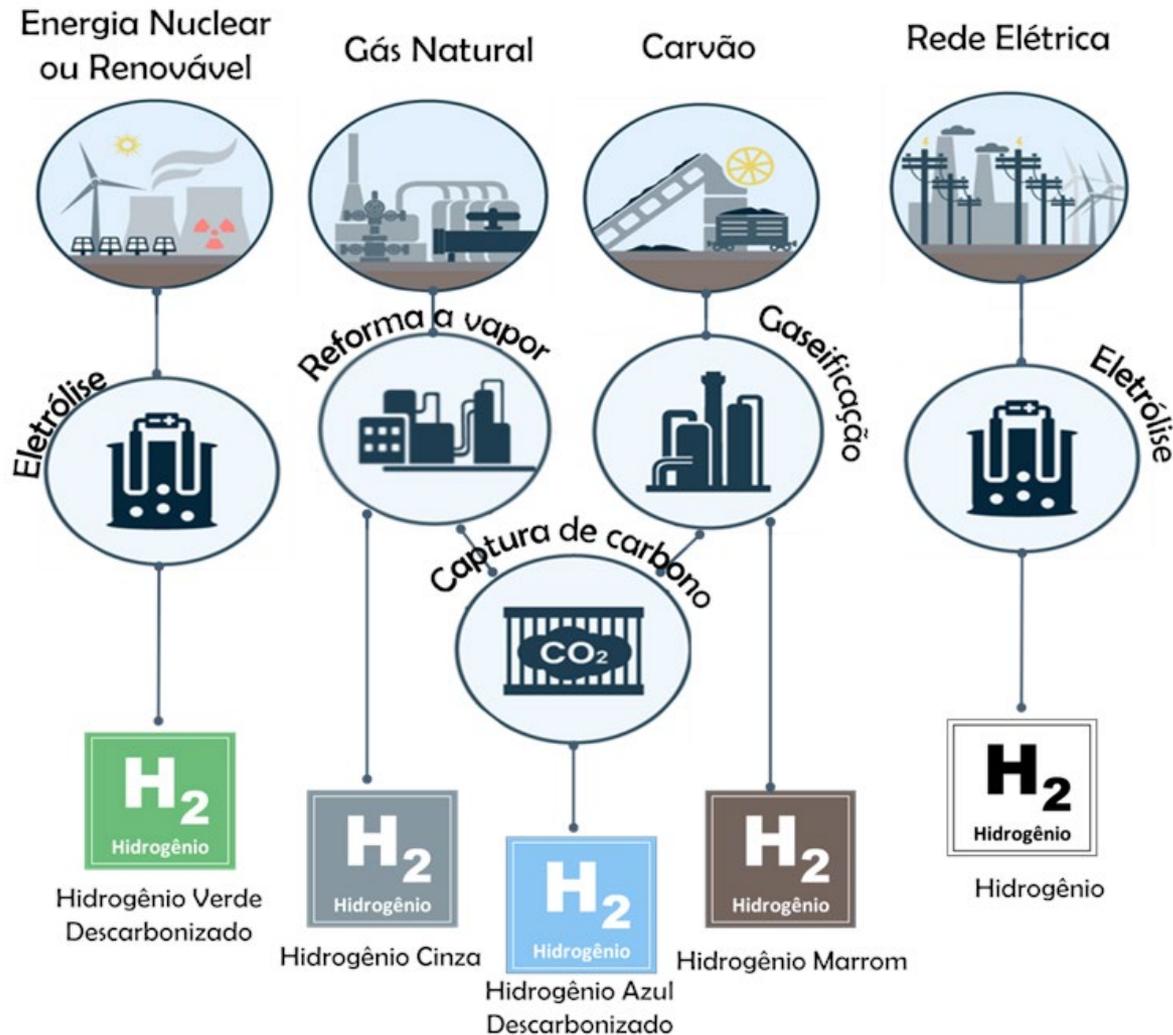
2. A Proveniência do Hidrogénio

Hidrogénio baseado em fósseis refere-se ao hidrogénio produzido através de uma variedade de processos, usando combustíveis fósseis como matéria-prima, principalmente, a reforma do gás natural ou a gaseificação do carvão. Isso representa a maior parte do hidrogénio produzido actualmente. As emissões de gases de efeito estufa decorrentes da produção de hidrogénio fóssil são altas;

Hidrogénio de base fóssil com captura de carbono é uma subparte do hidrogénio de base fóssil, em que os gases de efeito estufa emitidos como parte do processo de produção de hidrogénio são capturados. As emissões de gases de efeito estufa da produção de hidrogénio de base fóssil, com captura de carbono ou pirólise, são menores que para o hidrogénio de combustível fóssil, porém, a eficácia variável da captura de gases de efeito estufa (máximo de 90%) precisa ser considerada;



2. A Proveniência do Hidrogênio



3. Classificação do Hidrogénio

Hidrogénio Castanho refere-se ao hidrogénio produzido do carvão mineral sem a captura, utilização e sequestro de carbono “Carbon Capture, Utilization, and Storage” (CCUS);

Hidrogénio Cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis, principalmente gás natural, sem CCUS;

Hidrogénio Azul, produzido a partir de fontes fósseis, principalmente gás natural, mas com CCUS;

Hidrogénio Verde (hidrogénio renovável), produzido por electrólise, com electricidade oriunda de fontes de energia renováveis, tais como solar, eólica, hídrica, geotérmica, de marés, etc.

Hidrogénio Turquesa é um tipo menos conhecido de hidrogénio que é produzido através de um processo chamado de pirólise de metano.

Hidrogénio Rosa refere-se ao hidrogénio produzido através do processo de electrólise, onde a electricidade necessária para a separação da água em hidrogénio e oxigénio é gerada por fontes de energia nuclear.



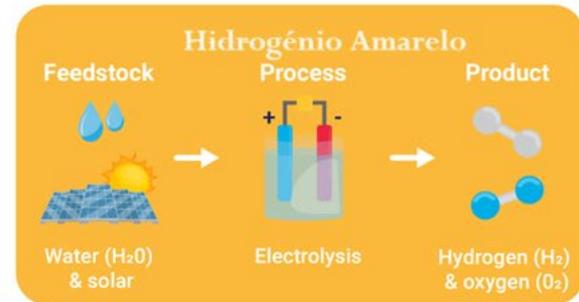
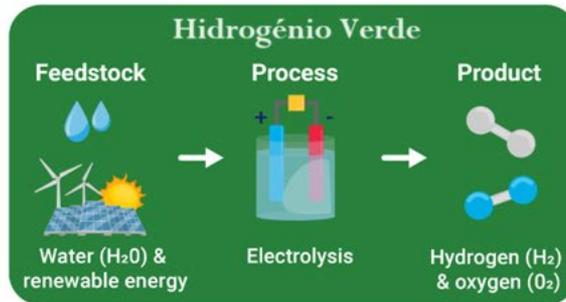
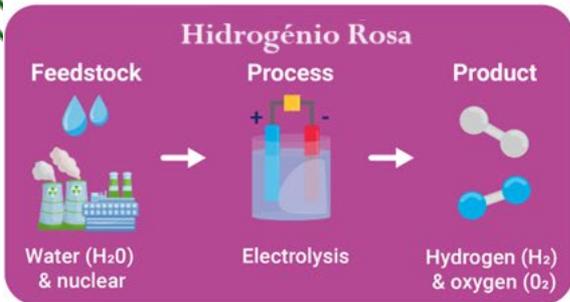
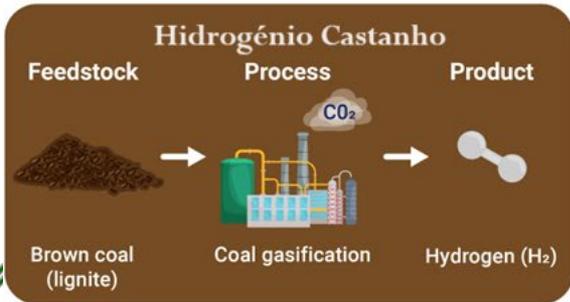
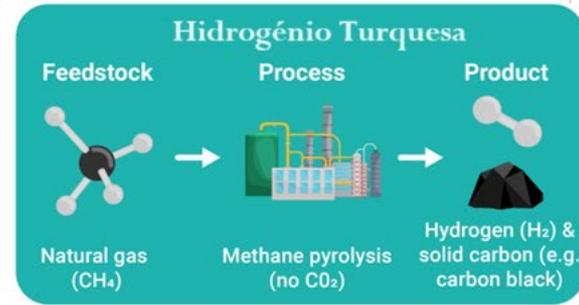
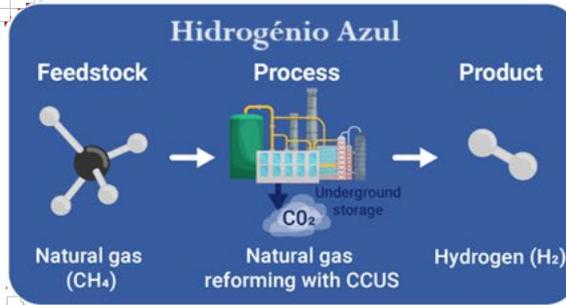
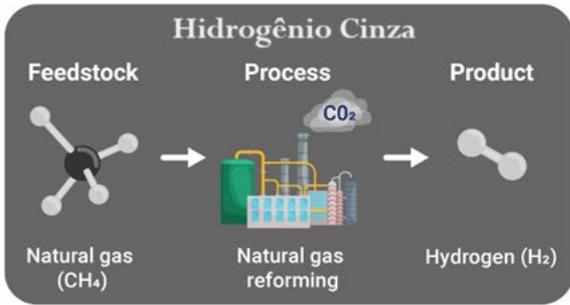


3. Classificação do Hidrogénio

O Hidrogénio branco - também designado por hidrogénio "natural", "dourado" ou "geológico" - é produzido naturalmente ou está presente na crosta terrestre e tornou-se uma espécie de santo graal do clima.



3.1 As cores do Hidrogénio



4. A Produção do Hidrogénio

O H_2 não existe na natureza no seu estado puro, pelo que tem de ser obtido através de processos que consomem energia, para depois ser utilizado de diferentes formas, seja na combustão directa ou em células de combustível. A forma como é produzido pode ser “verde” ou não. Os processos mais comuns de produção de Hidrogénio (H_2) são:

- **Reformação:** funciona através da aplicação de altas temperaturas em que o vapor reage com um combustível hidrocarboneto (gás natural, gasóleo, carvão, etc.) para produzir hidrogénio. Hoje, cerca de 95% do hidrogénio é produzido através do vapor e do gás natural.
- **Electrólise:** usa-se uma corrente eléctrica para separar a água em hidrogénio e oxigénio. Estes processos ocorrem com um electrolisador, que tem a capacidade de criar H_2 a partir de moléculas de água.

O processo do gás natural dá origem ao hidrogénio cinzento, porque emite CO_2 . Quando a energia eléctrica, que alimenta a electrólise, é 100% de origem renovável tem-se o hidrogénio verde - um processo sem qualquer emissão de CO_2 , desde a origem até ao seu uso final. Este é o objectivo num futuro bem próximo: uma produção completamente limpa e amiga do ambiente.



4.1 Reformação a Vapor de Metano

A reformação de hidrogénio é um processo químico importante para a produção de hidrogénio. Esse processo envolve a reacção de hidrocarbonetos (como o metano) com vapor de água para produzir hidrogénio. É comumente usado na indústria para a produção de hidrogénio em larga escala, sendo essencial para diversas aplicações, como a síntese de amónia e a produção de combustíveis.

Existem diferentes métodos de reformação de hidrogénio, incluindo:

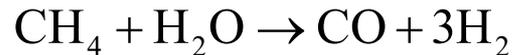
- **Reformação a Vapor de Metano (SMR):** É o método mais comum, onde o metano reage com vapor de água em alta temperatura para produzir hidrogénio, monóxido de carbono e uma pequena quantidade de dióxido de carbono.
- **Reformação Auto-Térmica (ATR):** Combina a reformação a vapor com a oxidação parcial, usando oxigénio. Isso ajuda a gerar o calor necessário para o processo.
- **Reformação com Oxidação Parcial (POX):** Aqui, os hidrocarbonetos são parcialmente oxidados com oxigénio, em vez de vapor de água, para produzir hidrogénio.
- **Reformação a Seco:** Utiliza dióxido de carbono em vez de vapor de água para reagir com os hidrocarbonetos.



4.1 Reformação de Metano à Vapor

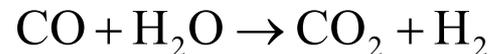
A reformação de metano à vapor (Steam Methane Reforming, SMR) é um processo comum para a produção de hidrogénio a partir do metano. Este processo envolve a reacção do metano com vapor de água a altas temperaturas (entre 700°C e 1100°C) e pressão elevada, usando um catalisador (geralmente níquel). O processo ocorre em duas etapas principais:

1. Reformação Primária (Endotérmica):



Nesta etapa, o metano reage com o vapor de água para produzir monóxido de carbono e hidrogénio. Esse processo é endotérmico, ou seja, requer energia, que é fornecida na forma de calor.

2. Reacção de Deslocamento de Gás (Exotérmica):



Nesta etapa, o monóxido de carbono formado na primeira reacção reage com mais vapor para formar dióxido de carbono e hidrogénio adicional. Essa reacção é exotérmica, libertando calor.



4.1 Reformação de Metano à Vapor

O resultado é uma mistura de hidrogénios e dióxido de carbono, que passa por uma purificação para obter hidrogénio de alta pureza, geralmente usando um processo de separação conhecido como Pressure Swing Adsorption (PSA).

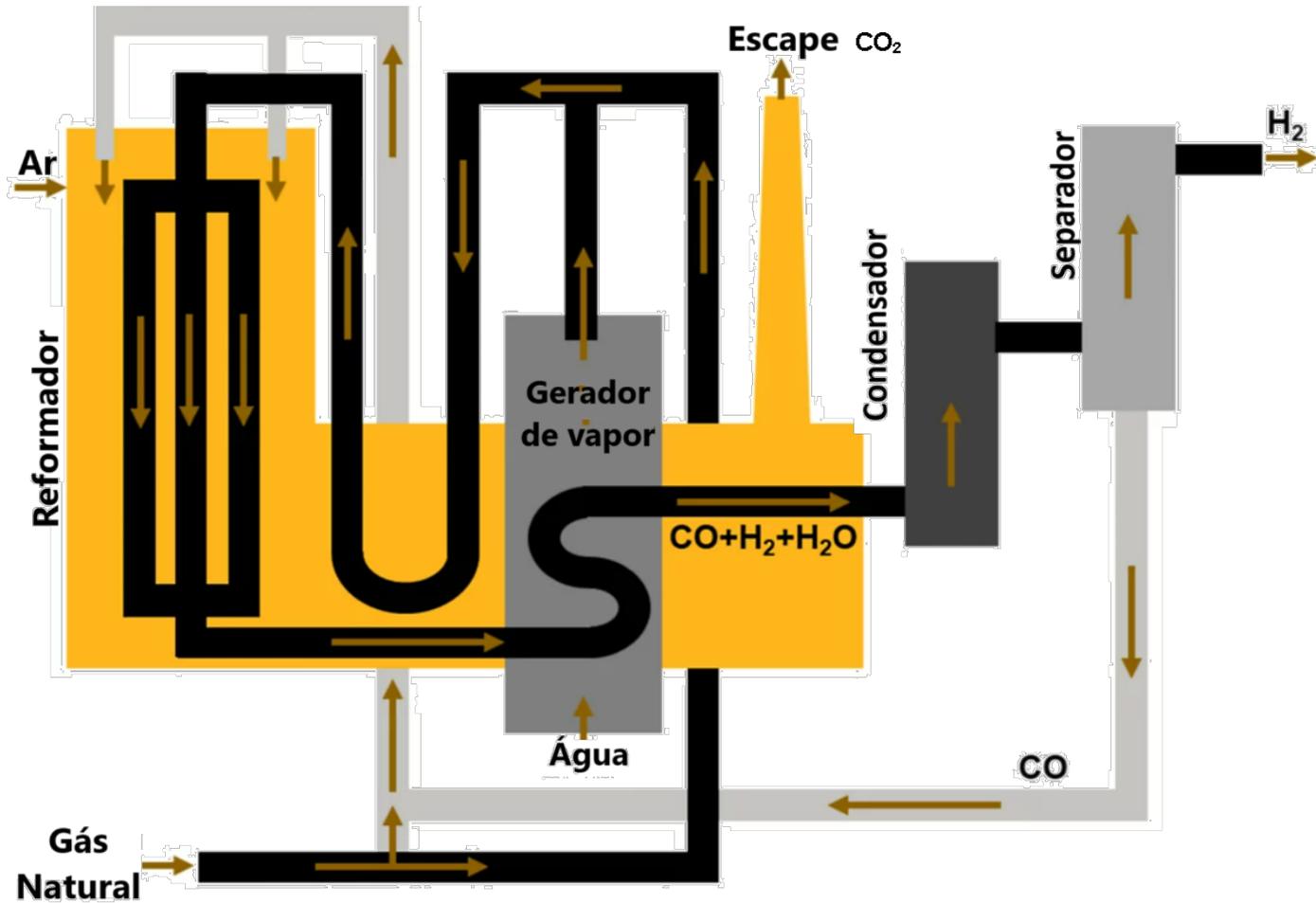
A reacção de reforma a vapor de metano é catalisada por metais, como o níquel, o cobalto e/ou o cobre. Os catalisadores ajudam a acelerar a reacção e a aumentar a sua eficiência.

A reforma a vapor de metano é um processo eficiente, com uma conversão de hidrogénio de até 90%.

Esse processo é amplamente usado em indústrias devido à abundância de metano e ao custo relativamente baixo. Contudo, a SMR gera CO₂ como subproduto, o que contribui para as emissões de gases de efeito estufa.



4.1 Reformação de Metano à Vapor



4.1 Reformação de Metano à Vapor

Os principais benefícios da reforma a vapor de metano incluem:

- É um processo eficiente, com uma conversão de hidrogénio de até 90%.
- É um processo relativamente simples, com equipamentos relativamente baratos.
- É um processo flexível, que pode ser utilizado para produzir hidrogénio a partir de uma variedade de fontes de metano.

Os principais desafios da reforma a vapor de metano incluem:

- Produz CO_2 , um gás de efeito estufa.
- É um processo endotérmico, o que significa que requer calor para ocorrer.
- Pode ser um processo poluente, se não for bem controlado.



4.2 Produção de Hidrogénio por Electrolise

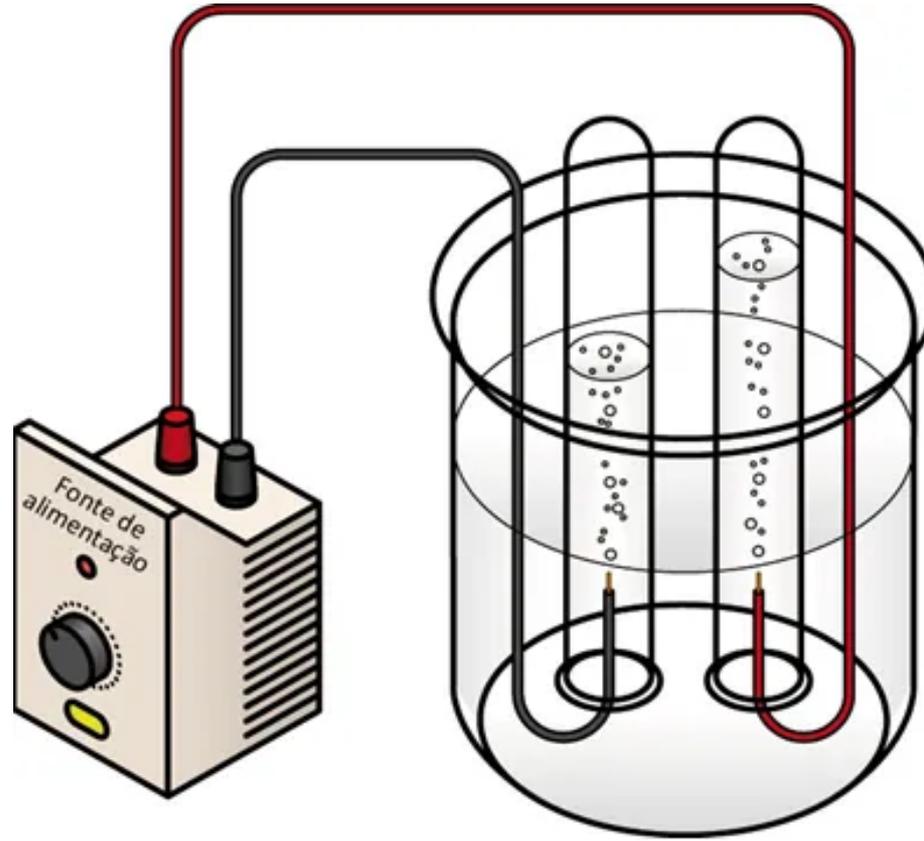
A produção de hidrogénio por electrólise é um método alternativo à reformação de hidrocarbonetos e é considerada uma abordagem mais sustentável, especialmente quando a electricidade utilizada vem de fontes renováveis. Neste processo, a água (H_2O) é decomposta em oxigénio (O_2) e hidrogénio (H_2) através da passagem de uma corrente eléctrica. O processo pode ser resumido em três etapas principais:

- **Electrólise da Água:** A água é colocada em um electrólito, que pode ser uma solução aquosa ou um meio sólido, e dois eléctrodos são submersos nela. Quando a corrente eléctrica é aplicada, a água se divide em seus componentes elementares - hidrogénio e oxigénio. O hidrogénio é colectado no cátodo (pólo negativo) e o oxigénio no ânodo (pólo positivo).





4.2 Produção de Hidrogénio por Electrolise



4.2 Produção de Hidrogénio por Electrolise



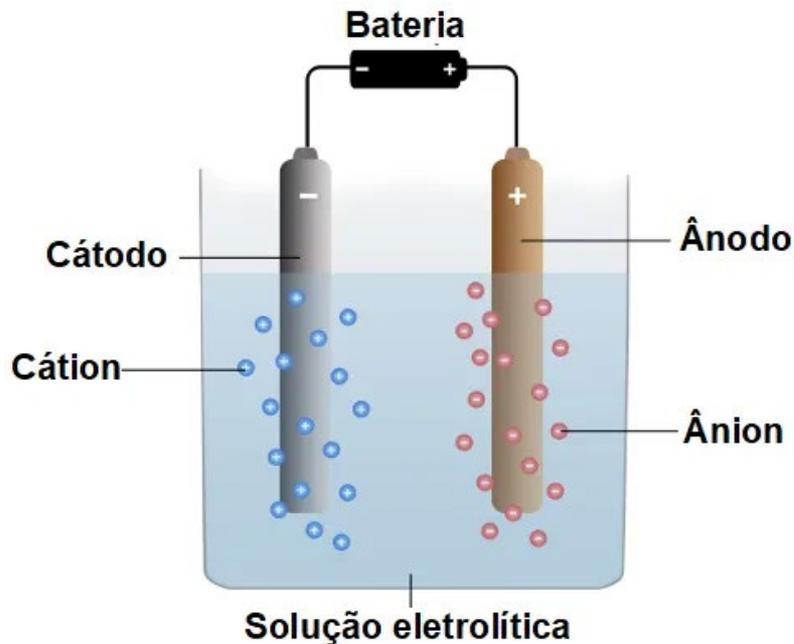
4.2 Produção de Hidrogénio por Electrolise

Tipos de Electrólise:

- **Electrólise Alcalina (AE):** Usa uma solução alcalina como electrólito e é uma das tecnologias mais maduras e amplamente utilizadas.
- **Electrólise de Membrana de Troca de Protões (PEM):** Utiliza uma membrana de polímero sólido como electrólito e é conhecida por sua alta eficiência e capacidade de operar a altas pressões.
- **Electrólise de Óxido Sólido (SOE):** Usa um electrólito de cerâmica sólida e opera a temperaturas muito altas, oferecendo eficiências térmicas elevadas.



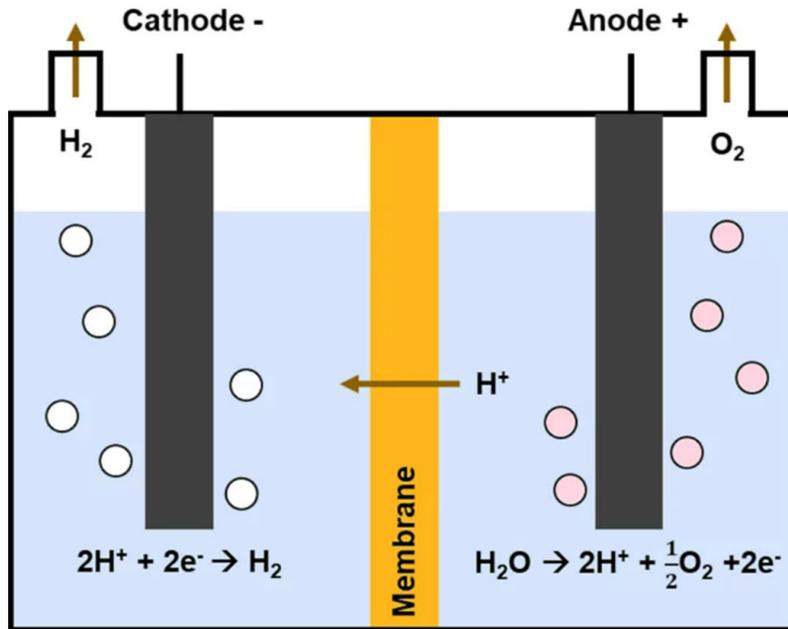
4.2.1 Electrólise Alcalina (AE)



A electrólise alcalina é um processo electroquímico no qual a água (H_2O) é decomposta em hidrogénio (H_2) e oxigénio (O_2) usando uma solução alcalina como electrólito. Esse processo é realizado em uma célula electroquímica conhecida como célula electrolítica alcalina. A principal característica da electrólise alcalina é o uso de um electrólito alcalino, geralmente uma solução de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH), que torna o ambiente da célula electrolítica alcalino (pH alto).



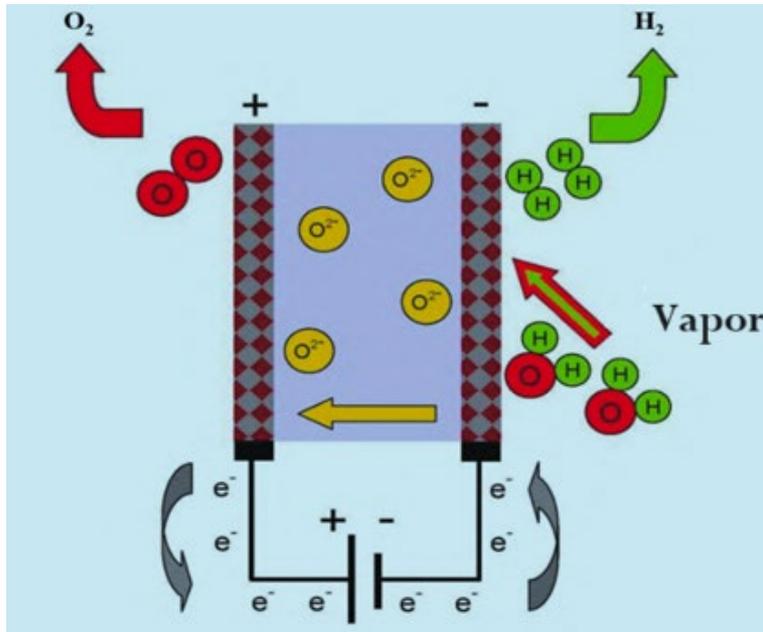
4.2.2 Electrólise de Membrana de Troca de Protões (PEM)



A Electrólise de Membrana de Troca de Protões (PEM, do inglês "Proton Exchange Membrane Electrolysis") é um processo de electrólise que utiliza uma membrana de troca de protões como parte fundamental da célula electrolítica. Ela é usada para decompor a água (H_2O) em hidrogénio (H_2) e oxigénio (O_2), semelhante ao processo de electrólise alcalina. No entanto, a PEM difere da electrólise alcalina em alguns aspectos importantes.



4.2.3 Electrólise de Óxido Sólido (SOE)



A eletrólise de óxido sólido (SOE) usa vapor de água de alta temperatura (600 ~ 900 ° C) para eletrólise, que é mais eficiente que o eletrólizador alcalino e o eletrólizador PEM. O hidrogênio reciclado e o vapor de água entram no sistema de reação a partir do ânodo. O vapor de água é eletrólise em hidrogênio no cátodo. O O_2 produzido pelo cátodo move-se através do eletrólito sólido até o ânodo, onde se recombina para formar oxigênio e libertar elétrons.





4.2.4 Vantagens e Desvantagens

- **Vantagens:** A principal vantagem da electrólise é a possibilidade de produzir hidrogénio sem emissões de carbono, especialmente quando alimentada por fontes de energia renováveis, como solar ou eólica.
- **Desafios:** Os desafios incluem os altos custos de capital para a instalação e a necessidade de fontes de energia eléctrica consistentes e confiáveis. A eficiência da conversão energética também é um factor importante.

4.2.5 Hidrogénio extraído do metano sem produzir CO₂

Foi recentemente inventada uma técnica para extrair hidrogénio do gás metano sem produzir CO₂ (dióxido de carbono) no processo.

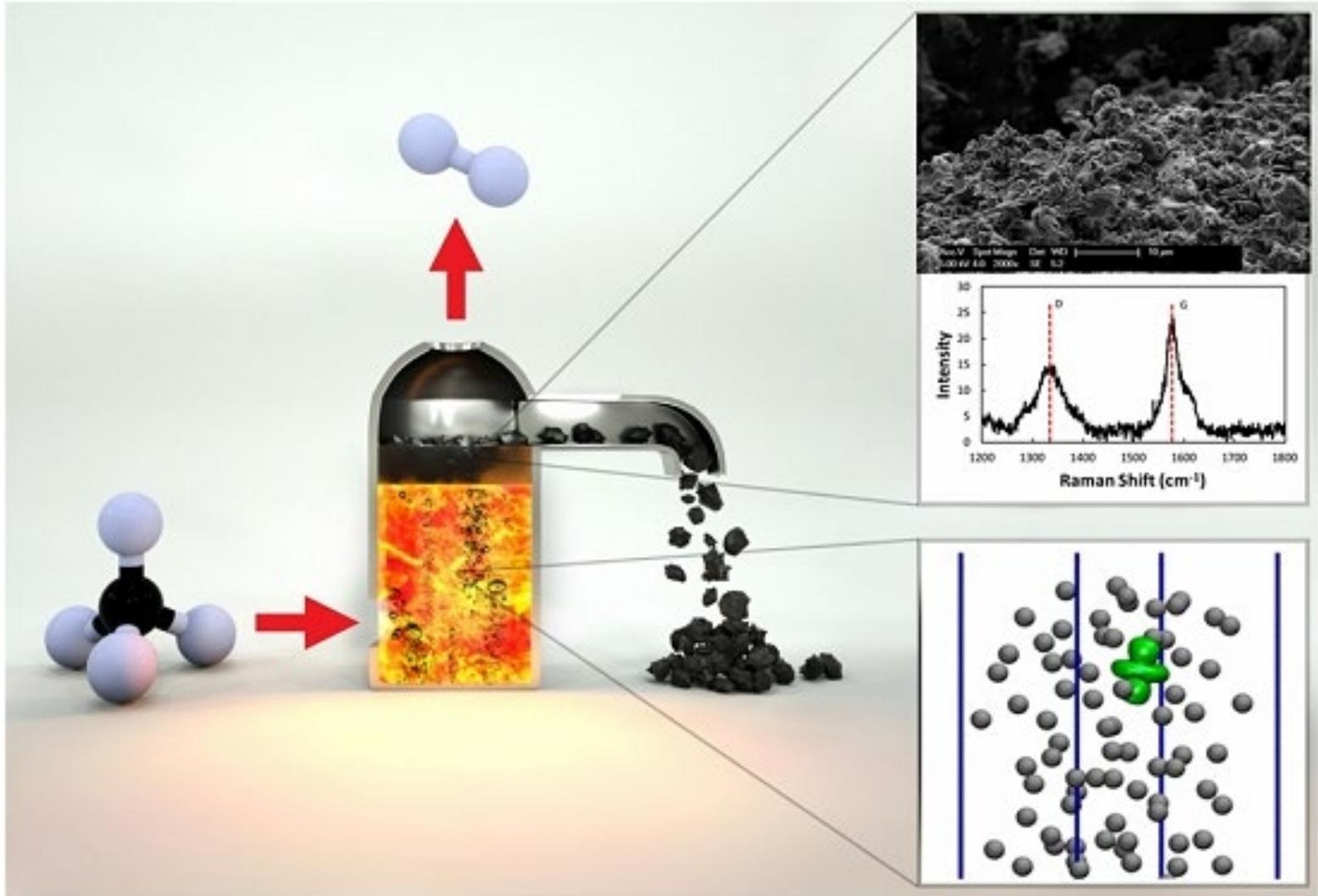
O segredo do processo desenvolvido pelo Professor David Upham e seus colegas da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara, nos EUA (publicado na revista Science em 2017), está no uso de metais e sais fundidos como sistemas catalíticos.

O processo consiste na introdução de uma bolha de gás metano na base de um reactor cheio de metal fundido cataliticamente activo (níquel (Ni), platina (Pt) ou paládio (Pd), com metais de baixo ponto de fusão, como bismuto (Bi), estanho (Sn), chumbo (Pb) ou índio (In)). Conforme a bolha sobe, as moléculas de metano atingem a parede da bolha e reagem para formar carbono e hidrogénio.

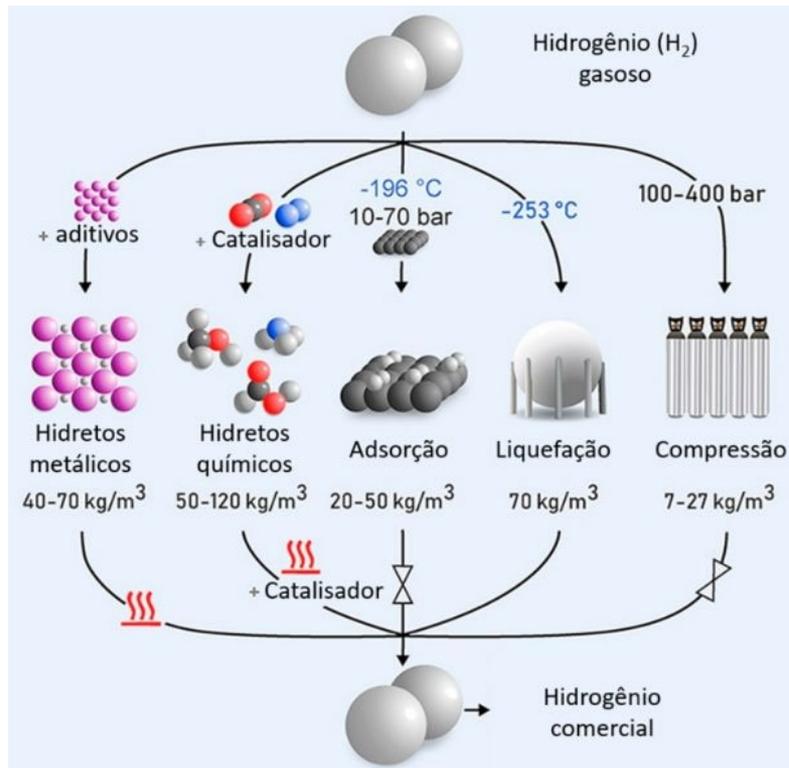
O hidrogénio sai pelo topo do reactor, enquanto o carbono sólido fica boiando no metal líquido, podendo ser retirado.



4.2.5 Hidrogénio extraído do metano sem produzir CO₂



5. Armazenamento do Hidrogénio



Há diversas opções possíveis para o armazenamento do hidrogénio. Porém, os processos não deixam de ser desafiadores, principalmente pela densidade do combustível, que é muito baixa. O armazenamento em estado gasoso já tem escala comercial quando feito em cavernas de sal, o que requer condições geológicas adequadas. As características físico-químicas do hidrogénio gasoso obrigam os produtores a usarem processos para reduzirem o volume do gás e dar mais segurança ao transporte e seu manuseio, o que envolverá o aumento de sua densidade.



5. Armazenamento do Hidrogénio

Sistemas de armazenamento

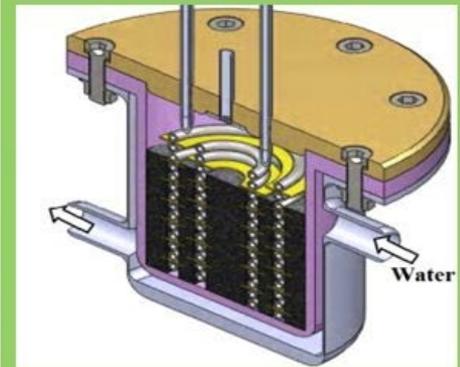


Tanques de alta pressão
(300 a 700 bar)
Armazenamento de ~ 33
 $\text{Kg H}_2/\text{m}^3$

Desvantagens da
relação tamanho e
equivalente energético
(Frenette, et al., 2009).



Tanque criogênico para
armazenamento de
hidrogénio líquido
(-253°C (20K))
 $\sim 71 \text{ Kg H}_2/\text{m}^3$, at 1 bar



(Mellouli, et al., 2010).

Armazenamento em
sólidos onde o hidrogênio
(H atômico) intersticial em
metais quando se trata de
hidretos - **Absorção**, ou
(H_2 molecular) com
ligações superficiais em
outros materiais -
Adsorção.



5.1 Armazenamento em Tanques de Alta Pressão

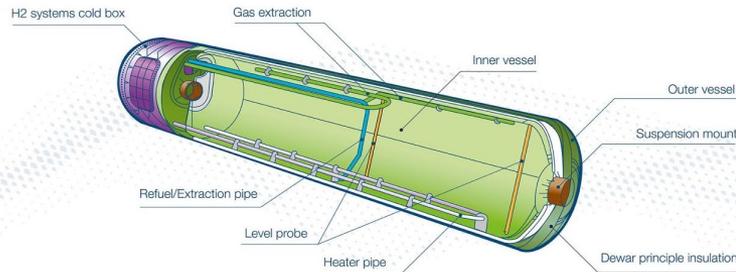


O hidrogénio gasoso pode ser comprimido a alta pressão e armazenado em tanques de aço ou materiais compostos reforçados. Essa é uma abordagem comum e eficaz para armazenar hidrogénio, mas requer tanques resistentes e seguros para suportar as pressões elevadas.



5.2 Armazenamento em Forma Líquida

Liquid H₂ tank



AIRBUS

O hidrogénio pode ser liquefeito a temperaturas muito baixas (cerca de -253°C) e armazenado em tanques criogénicos. O armazenamento líquido oferece uma densidade de energia maior em comparação com o armazenamento gasoso, mas requer equipamentos criogénicos caros e complexos.



5.3 Armazenamento em Sistemas Sólidos

O hidrogénio pode ser absorvido ou adsorvido em materiais sólidos, como metais ou compostos químicos, em uma técnica chamada de armazenamento sólido. Isso pode ser feito sob condições de temperatura e pressão mais amenas em comparação com o armazenamento gasoso ou líquido. O hidrogénio pode ser libertado desses materiais quando necessário.

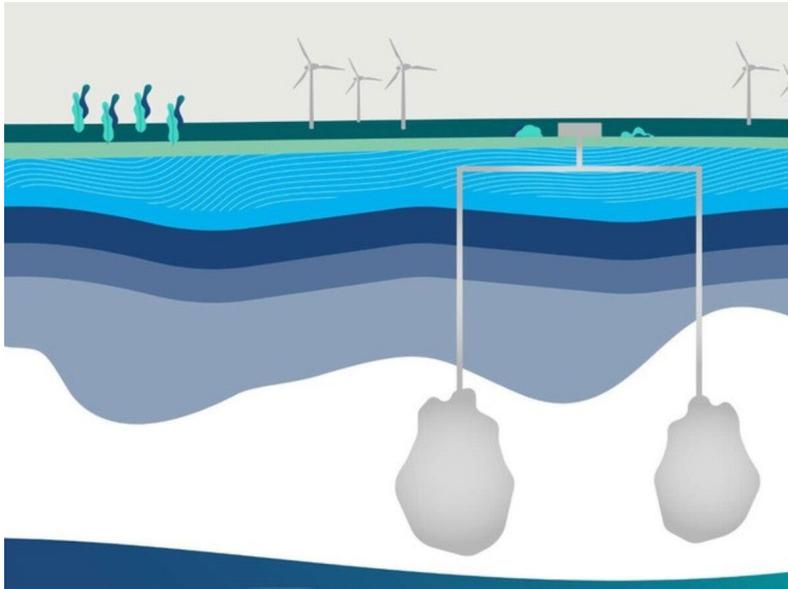
Os sistemas de armazenamento de hidrogénio através de hidretos metálicos são baseados no princípio de que alguns metais absorvem o hidrogénio gasoso sob condições de alta pressão e temperatura moderada para formar os hidretos metálicos.



Esses metais libertam o gás hidrogénio quando aquecidos em baixa pressão e em alta temperatura. Resumindo, os metais absorvem e libertam o hidrogénio como uma esponja.



5.4 Armazenamento em Sistemas Subterrâneos



O hidrogénio também pode ser armazenado em cavernas subterrâneas, aquíferos ou formações geológicas apropriadas, semelhante ao armazenamento de gás natural. Essa é uma opção para armazenamento em grande escala e pode ser usada para armazenar hidrogénio produzido por meio de energia renovável.





6. Uso do Hidrogénio

O Hidrogénio pode ser usado na aviação, produção de aço e fertilizantes, e também é útil em outras aplicações como:

- **Produtos químicos industriais:** o hidrogénio pode ser combinado com uma fonte sustentável de carbono para produzir plásticos limpos e produtos químicos utilizados no fabrico de tintas, tecidos e produtos farmacêuticos, entre outras coisas.
- **Transporte rodoviário e marítimo de longa distância:** da mesma forma, o hidrogénio pode produzir combustíveis com elevada densidade energética para transportar mercadorias através de continentes e oceanos, para além do alcance das baterias.
- **Armazenamento de energia de longa duração:** pode-se economizar a energia eólica e solar como hidrogénio durante meses seguidos e reutilizá-la como electricidade (de preferência usando uma célula de combustível ou outra forma de carbono zero para transformar H_2 novamente em electricidade) quando o sol não estiver a brilhar e o vento não estiver a soprar. Desta forma, o hidrogénio pode preencher uma necessidade crítica de armazenamento de energia sazonal.

6.1 A Combustão do Hidrogénio

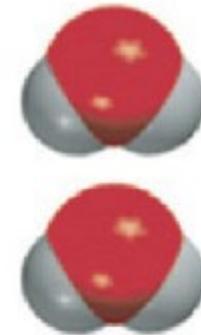
A combustão do hidrogénio é a reacção dessa substância com o oxigénio, resultando em duas moléculas de água. O hidrogénio é um óptimo combustível, pois o único produto da combustão desse gás é o vapor de água. A queima de hidrogénio pode ser feita de forma idêntica à de outros combustíveis, como Gás Liquefeito de Petróleo ou gás natural. A chama da queima do hidrogénio chega a 2.400 °C. Nas células a combustível, o hidrogénio sofre uma reacção electroquímica que gera energia de forma bem mais limpa que as formas convencionais de geração de energia.



+



→



Duas moléculas de hidrogênio + Uma molécula de oxigênio → Duas moléculas de água



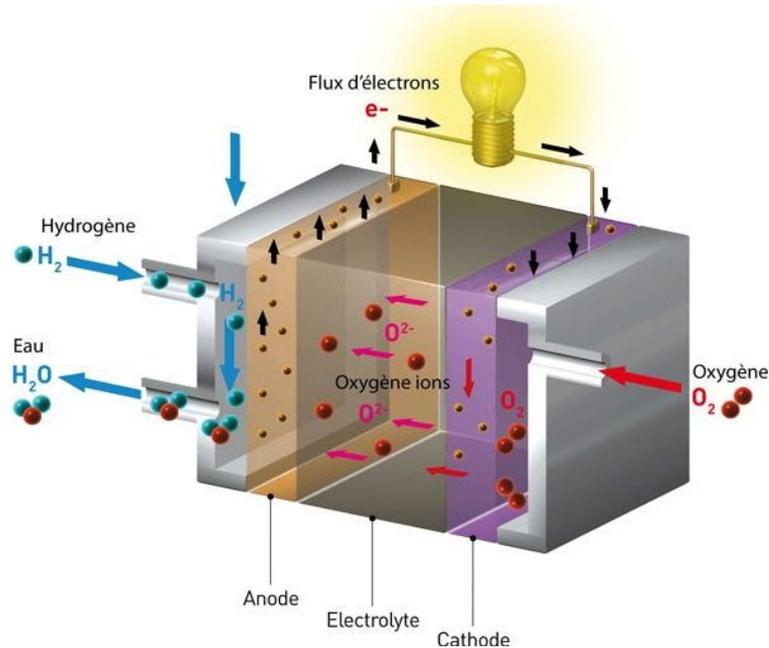
+



→



6.2 Uso em Células de Combustível



Células de combustível são dispositivos electroquímicos que convertem energia química directamente em energia eléctrica, utilizando um combustível e um oxidante, geralmente oxigénio do ar. Elas são projectadas para produzir electricidade de forma eficiente e limpa, com emissões reduzidas ou nulas de poluentes atmosféricos, dependendo do tipo de combustível utilizado. As células de combustível são uma tecnologia promissora para várias aplicações, incluindo geração de energia estacionária, propulsão de veículos e armazenamento de energia.



6.3 Uso em automóveis Eléctricos

Carro a hidrogênio

Os principais componentes do Mirai, da Toyota, que é movido a hidrogênio

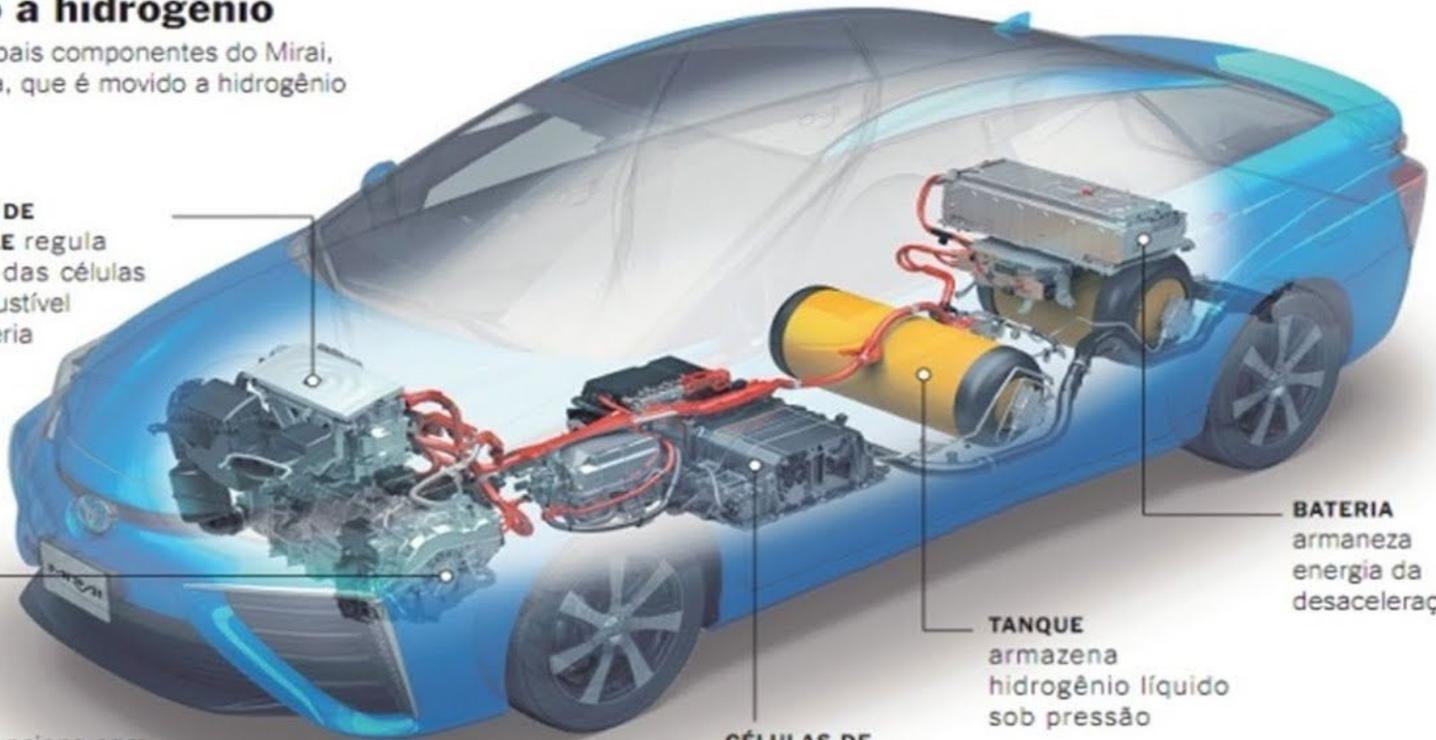
UNIDADE DE CONTROLE regula funções das células de combustível e da bateria

MOTOR funciona com a eletricidade das células de combustível e da bateria

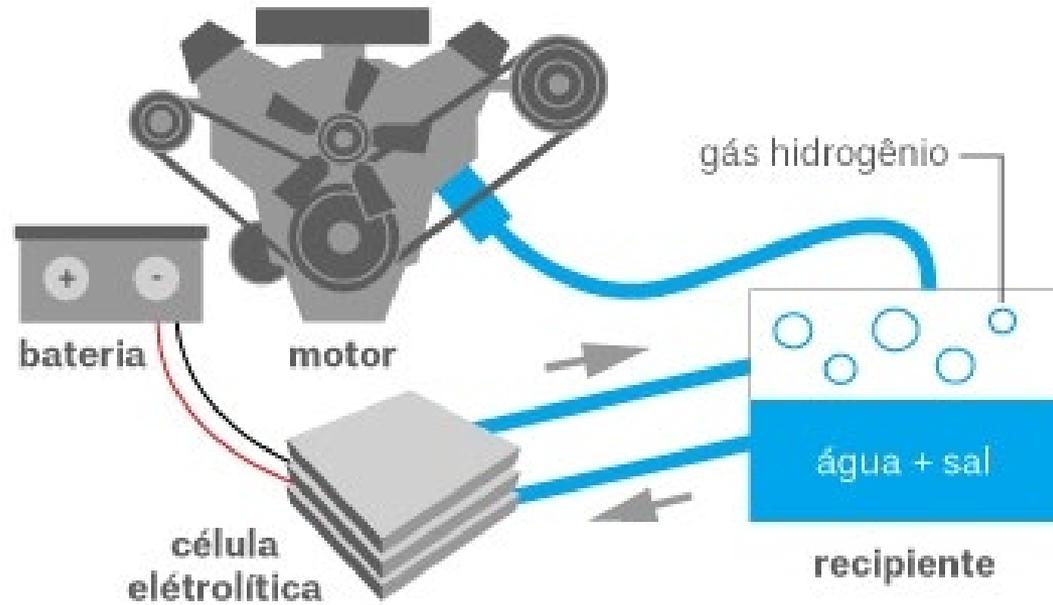
CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL geram eletricidade a partir do hidrogênio

TANQUE armazena hidrogênio líquido sob pressão

BATERIA armazena energia da desaceleração



6.4 Uso de Hidrogénio com mistura de combustível



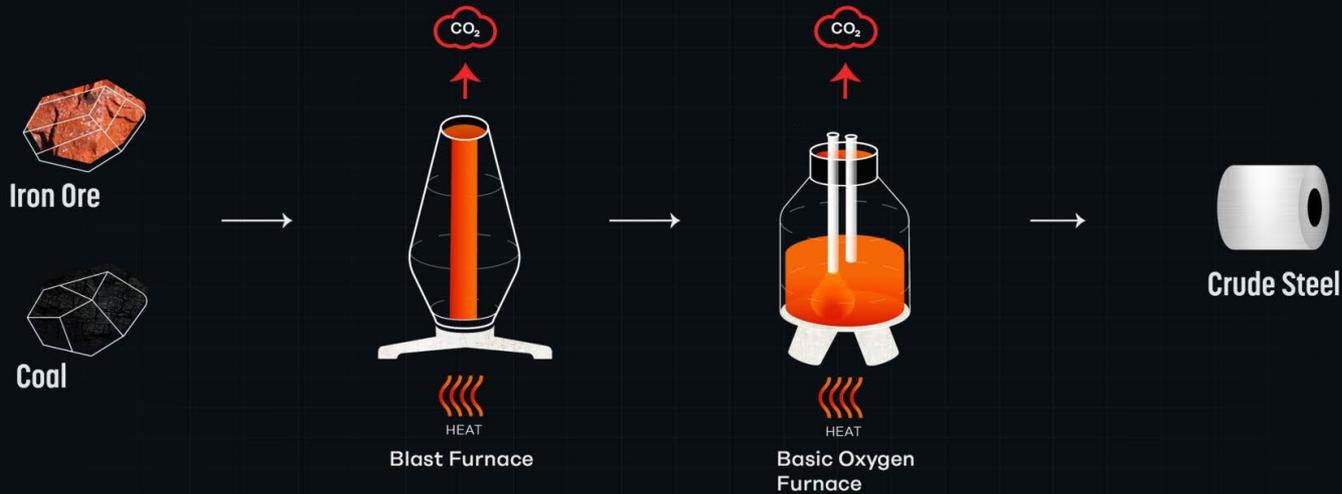
6.5 Uso do Hidrogénio na Fabricação de aço

A produção de aço hoje depende de enormes quantidades de combustíveis fósseis, e a produção de aço nos EUA, embora mais limpa do que a produção em outros países, gera 67 Mt CO₂ (milhões de toneladas de dióxido de carbono) anualmente. O hidrogénio limpo pode ser utilizado para reduzir directamente o ferro utilizado na produção de aço e como fonte de calor, o que pode reduzir drasticamente as emissões até 97% nesta indústria com utilização intensiva de carbono, essencial para a vida quotidiana, desde automóveis e edifícios até painéis solares. e turbinas eólicas.



6.5 Uso do Hidrogénio na Fabricação de aço

Traditional Primary Steel Making



Traditional bf-bof: **2.43**
tons **CO₂**/ton crude steel



6.5 Uso do Hidrogénio na Fabricação de aço

A redução directa do minério de ferro utilizando hidrogénio é uma alternativa promissora aos métodos tradicionais que empregam carbono, visando a produção de ferro metálico com menores emissões de CO₂. Este processo envolve a conversão dos óxidos de ferro (como hematite, Fe₂O₃, e magnetite, Fe₃O₄) em ferro metálico (Fe) através de reacções químicas com hidrogénio gasoso (H₂).

Etapas do Processo:

Preparação do Minério: O minério de ferro é inicialmente triturado e, frequentemente, aglomerado em pelotas ou briquetes para otimizar a eficiência da redução.

Aquecimento: As pelotas ou briquetes são aquecidos a temperaturas elevadas, geralmente entre 700 °C e 1000 °C, em reactores específicos.

Redução com Hidrogénio: O hidrogénio gasoso é introduzido no reactor, reagindo com os óxidos de ferro de acordo com as seguintes reacções:

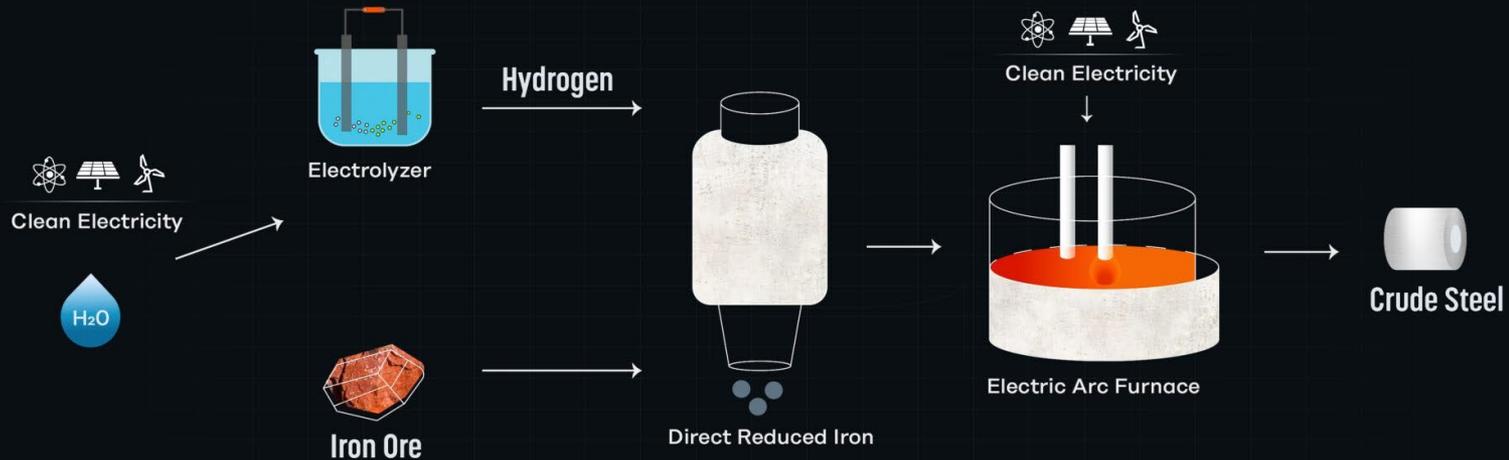
- ✓ Redução da Hematite a Magnetite: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
- ✓ Redução da Magnetite a Wüstite: $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 \rightarrow 3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$
- ✓ Redução da Wüstite a Ferro Metálico: $\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$

Estas reacções produzem vapor de água (H₂O) como subproduto, em vez de dióxido de carbono (CO₂), resultando numa pegada de carbono significativamente menor.



6.5 Uso do Hidrogénio na Fabricação de aço

Steel From H₂



97% reduction in CO₂



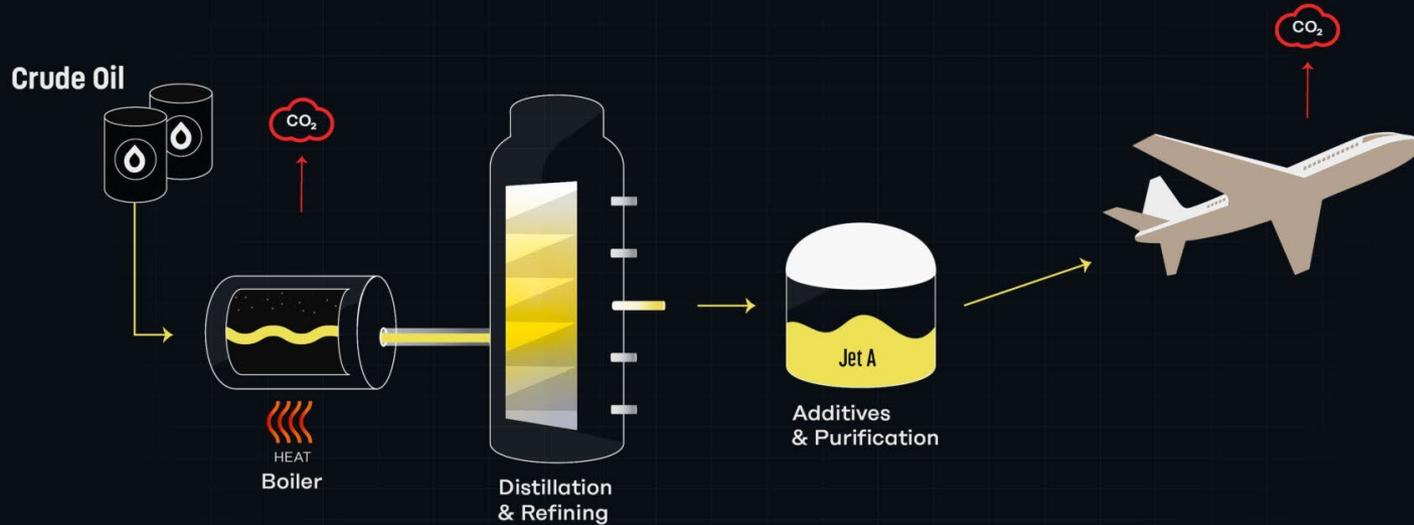


6.6 Uso do Hidrogénio na Aviação

O combustível de aviação tradicional é uma forma altamente purificada do mesmo petróleo bruto usado para produzir gasolina. A aviação comercial é actualmente responsável por 2,4% das emissões globais de carbono e está apenas a crescer, em 19 de Julho de 2024, o mundo registou 275.690 voos num único dia. O hidrogénio mostra-se muito promissor como combustível alternativo para aviões, seja processado através de uma célula de combustível ou queimado directamente, especialmente para voos de curto e médio alcance. Uma aspiração a longo prazo, é combinar o hidrogénio com uma fonte sustentável de carbono (incluindo CO₂ capturado) para produzir combustível de aviação sustentável que possa ser processado por aeronaves que queimam combustíveis fósseis. Embora seja necessária mais inovação para reduzir os custos deste processo, fazê-lo pode reduzir as emissões em comparação com o combustível fóssil para aviação em 75% a 99% e permitir-nos-ia continuar a utilizar aeronaves e infra-estruturas existentes actualmente.

6.6 Uso do Hidrogénio na Aviação

Traditional Jet Fuel



Jet fuel produces
22 pounds of CO₂ waste
per gallon on fuel burned.



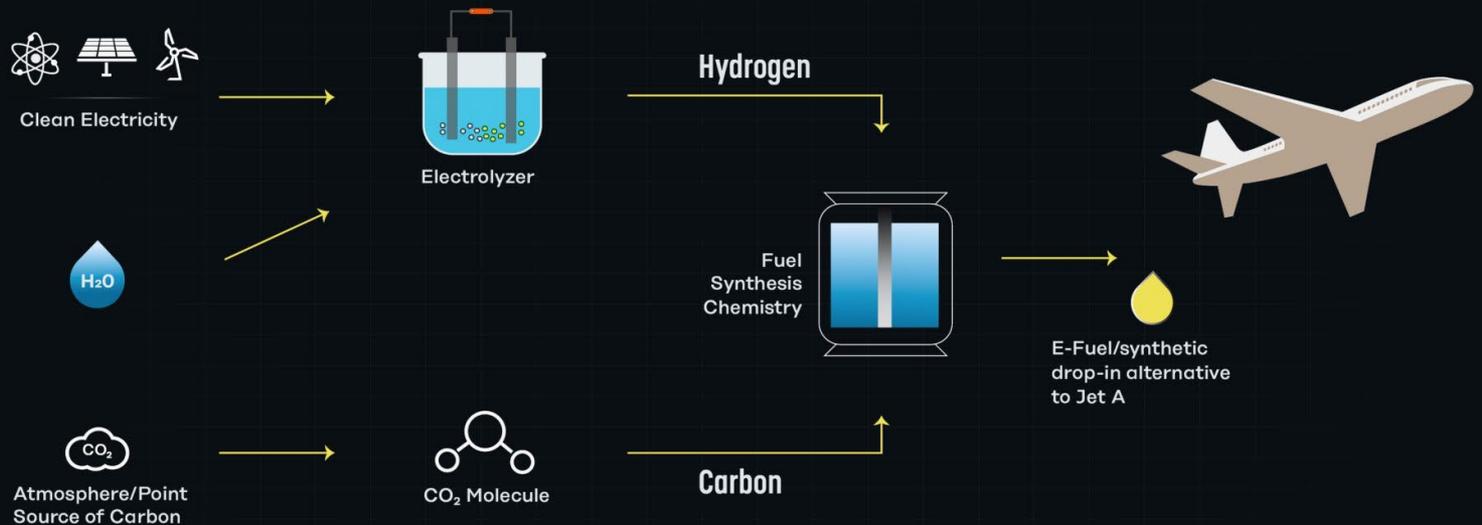
6.6 Uso do Hidrogénio na Aviação

- **Combustão Directa de Hidrogénio:** Nesta abordagem, o hidrogénio é queimado directamente nos motores, substituindo os combustíveis tradicionais. A Airbus, por exemplo, está a desenvolver conceitos de aeronaves que utilizam hidrogénio como combustível principal, com o objectivo de lançar um avião comercial de emissões zero até 2035.
- **Células de Combustível a Hidrogénio:** O hidrogénio é convertido em electricidade através de células de combustível, que alimentam motores eléctricos. Esta tecnologia é especialmente adequada para aeronaves de menor porte e voos regionais. A HY4, desenvolvida pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR), é um exemplo de uma aeronave de quatro lugares que utiliza células de combustível a hidrogénio.



6.6 Uso do Hidrogénio na Aviação (Combustão Directa)

Jet fuel from H₂



90% reduction in CO₂



6.6 Uso do Hidrogénio na Aviação (Células de Combustível)



6.6 Uso do Hidrogénio na Aviação (Células de Combustível)

