



Seminários de Desenvolvimento Sustentável

O hidrogénio como vector energético nos transportes



Trabalho realizado por:

Ana Rita Marques, nº 48556, LEQ

André Filipe Augusto, nº 50887, LEFT

Pedro Tiago Monteiro, nº 45558, LEIC

Lisboa, 20 de Janeiro de 2004

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	4
2	FONTES, APLICAÇÕES E PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO	7
2.1	FONTES E APLICAÇÕES DO HIDROGÉNIO	7
2.2	PRODUÇÃO DO HIDROGÉNIO A PARTIR DE DERIVADOS FÓSSEIS	8
2.2.1	<i>Steam Reforming</i>	9
2.2.2	<i>Oxidação Parcial de hidrocarbonetos pesados</i>	10
2.2.3	<i>Gaseificação do carvão</i>	11
2.2.4	<i>Pirólise</i>	11
2.3	PRODUÇÃO DO HIDROGÉNIO PELO PROCESSO DE ELECTRÓLISE	12
2.3.1	<i>Hidroeléctrica</i>	15
2.3.2	<i>Eólica</i>	16
2.3.3	<i>Geotérmica</i>	16
2.3.4	<i>Solar</i>	17
2.3.5	<i>Biomassa</i>	18
2.4	CICLO DE VIDA DOS SISTEMAS ENERGÉTICOS DO HIDROGÉNIO	21
2.4.1	<i>Emissões de CO₂ e custos associados</i>	22
3	MANUSEAMENTO DO HIDROGÉNIO	23
3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	23
3.2	SEGURANÇA	24
4	ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DO HIDROGÉNIO	25
4.1	ARMAZENAMENTO POR COMPRESSÃO DO H ₂	26
4.2	ARMAZENAMENTO POR LIQUEFAÇÃO	27
4.3	OUTROS MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO	28
4.4	TRANSPORTE	29
5	O HIDROGÉNIO COMO COMBUSTÍVEL	30
5.1	CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL	30
5.1.1	<i>Células de combustível alcalinas</i>	31
5.1.2	<i>Células de combustível de carbonato fundido</i>	32
5.1.3	<i>Células de combustível com membrana de permuta de protões</i>	33
5.1.4	<i>Células de combustível de ácido fosfórico</i>	34
5.1.5	<i>Células de combustível de óxido sólido</i>	35
5.2	OUTRAS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL	36
5.2.1	<i>Células de combustível de metanol directo</i>	36
5.2.2	<i>Células de combustível de zinco-ar</i>	37
5.2.3	<i>Células de combustível regenerativas</i>	39
5.3	O HIDROGÉNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	40

6	O FUTURO DO H₂: SOLUÇÕES PARA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL.....	43
6.1	SOLUÇÕES BASEADAS NAS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	43
6.2	SOLUÇÕES BASEADAS NA COMBUSTÃO INTERNA DE HIDROGÉNIO.....	50
7	PROJECTOS E INICIATIVAS	51
7.1	RELATÓRIO “WELL-TO-WHEEL”	51
7.2	O PROJECTO “HYDROGEN HIGHWAY”	51
7.3	O PROJECTO CUTE - CLEAN URBAN TRANSPORT FOR EUROPE	52
7.4	O HIDROGÉNIO EM PORTUGAL.....	53
7.4.1	<i>Porto</i>	53
7.4.2	<i>Ilha Terceira, Açores</i>	55
8	CONCLUSÃO	57

1 INTRODUÇÃO

A fase da implementação das tecnologias associadas ao hidrogénio está a ser cada vez mais necessária. Já dizia Cyrus Harding, em 1875, que “*quando se esgotarem os depósitos de carvão, seremos aquecidos com água, sendo esta decomposta nos seus elementos pela electricidade. A água será o carvão do futuro*”.

É previsível que a produção global de petróleo e de gás natural atinja o seu pico dentro de 10 anos ou, numa previsão optimista, dentro de 40 anos. O consumo de petróleo é três vezes superior à produção diária dos países da OPEC dado que um terço da humanidade ainda não tem acesso à electricidade; a existência de um consumo desmesurado de energia nos últimos 200 anos por parte do mundo ocidental e o consumo de 81 milhões de barris de petróleo por dia pela população chinesa são outras realidades que contribuem para o elevado consumo deste combustível. É então urgente pensar noutras fontes eficientes e ecológicas para a produção de energia.

O desenvolvimento tecnológico da qual a armazenagem de hidrogénio líquido em tanques é exemplo, e o desenvolvimento de parcerias entre empresas são um bom caminho para a sustentabilidade das fontes de energia. As emissões de CO₂, o aumento da temperatura global do planeta e a falta de energia são factores preponderantes no desenvolvimento da tecnologia do hidrogénio.

O hidrogénio é o elemento químico mais abundante no Universo e simultaneamente aquele que contém o maior valor energético, sendo por isso considerado o combustível renovável do futuro. Além de abundante, o hidrogénio é também menos poluente que os tradicionais combustíveis uma vez que a electricidade é produzida a partir das pilhas de combustível, sendo o vapor de água o produto da reacção. Desta feita, a emissão de gases de efeito de estufa, particularmente CO₂ é escassa.

Devido às suas propriedades físicas e químicas, o hidrogénio deve ser produzido no local de consumo. No entanto as suas mais variadas aplicações obrigam ao seu transporte na forma liquefeita dos locais de produção até aos locais de consumo, sendo mais comum, simples, e eficiente a sua armazenagem na forma gasosa. Ao nível de eficiência e de consumo, o hidrogénio consegue superar os tradicionais motores de combustão interna. Para além da utilização do hidrogénio e das células de combustível em pequenos sistemas electrónicos, o maior progresso é sem dúvida no sector dos transportes, sendo a GM e a Daimler-Chrysler as maiores impulsionadoras.

A nível europeu, está a decorrer o projecto *Clean Urban Transport for Europe* (CUTE) com o objectivo de implementar frotas de autocarros movidos a pilhas de combustível, exigindo em paralelo infra-estruturas para a produção de hidrogénio bem como estações de abastecimento. Este projecto envolve 9 cidades europeias, das quais participa a cidade do Porto.

Para além desta aposta, outras iniciativas nacionais estão a ser desenvolvidas. A Universidade de Coimbra está a coordenar um projecto europeu que envolve parceiros alemães e franceses para analisar as oportunidades de aplicação da tecnologia das pilhas de combustível nos edifícios de serviços e nas Pequenas e Médias Empresas (PME); a ilha Terceira nos Açores foi o local escolhido para a construção da primeira central de hidrogénio renovável.

O recente interesse público no hidrogénio tem provocado uma grande dose de comentários conflituosos, confusos e mal informados. Existe um documento muito detalhado publicado pelo *Rocky Mountain Institute* em Junho de 2003 onde figuram, entre outros assuntos, correcções a vinte dos mitos mais comuns sobre o hidrogénio.

Para estimular a crítica e aguçar a curiosidade enumeramos aqui resumidamente quais os mitos a que o documento dá resposta:

1. Toda uma indústria do hidrogénio teria de ser desenvolvida de raiz;
2. O hidrogénio é muito perigoso, explosivo ou volátil para ser usado como combustível;
3. Produzir hidrogénio gasta mais energia do que a energia que o hidrogénio armazena, por isso é ineficiente;
4. Entregar hidrogénio aos consumidores consumiria a maior parte da energia que ele contém;
5. O hidrogénio não pode ser distribuído nos *pipelines* existentes;
6. Não temos ainda formas práticas de aplicar o hidrogénio gasoso em automóveis, por isso os automóveis têm de continuar a usar combustíveis líquidos;
7. Falta uma forma segura e barata de armazenar hidrogénio nos automóveis;
8. Comprimir hidrogénio para os tanques de armazenamento gasta muita energia;
9. O hidrogénio é muito caro para competir com a gasolina;
10. Seria necessário toda uma infra-estrutura de produção, armazenamento e distribuição antes de vender o primeiro automóvel a hidrogénio, mas isso é impraticável e muito dispendioso;
11. Produzir hidrogénio suficiente para uma frota de veículos é uma tarefa exageradamente dispendiosa;
12. Visto que as energias renováveis são actualmente muito caras, o hidrogénio teria de ser produzido a partir de combustíveis fósseis ou energia nuclear;

13. A indústria petrolífera e automóvel opõem-se actualmente à ideia do hidrogénio ser uma ameaça competitiva, portanto o seu desenvolvimento do hidrogénio é mera fachada;

14. Uma economia do hidrogénio em larga escala iria danificar o clima da Terra, o balanço da água e a atmosfera;

15. Há formas mais atractivas do que o hidrogénio de conseguir mobilidade sustentável;

16. Uma vez que a frota de automóveis nos EUA leva cerca de 14 anos a pagar-se a ela própria, pouco pode ser feito para mudar a tecnologia automóvel a curto prazo;

17. Uma transição viável para o hidrogénio demoraria entre 30 a 50 anos a completar-se, e dificilmente se teriam mudanças significativas em menos de 20 anos;

18. A transição para o hidrogénio necessita de um programa federal na linha do programa *Apollo* ou do projecto *Manhattan*.

19. A única forma realista de nos livrarmos do petróleo é adoptar um programa radical de mudança para o hidrogénio.

20. O programa do hidrogénio da administração Bush é só uma forma de prejudicar a adopção dos eléctricos-híbridos e outros designs eficientes de automóveis disponíveis já hoje, envolvendo a energia fóssil e nuclear num disfarce "verde".

Pretende-se de seguida clarificar e encontrar resposta a estes mitos. No entanto, as respostas que o *Institute Rocky Mountain* encontrou encontram-se bem clarificadas em [29].

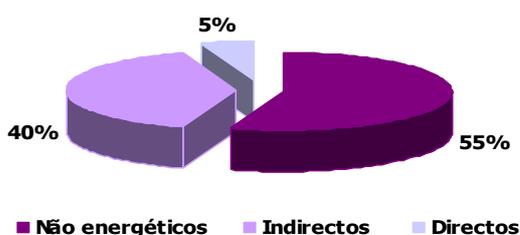
2 Fontes, aplicações e produção de Hidrogénio

O hidrogénio é usado como gás industrial à mais de 100 anos. Estima-se que a produção global de hidrogénio varia entre 600 e 700 biliões de m³, sendo o crescimento anual de 10 %. Cerca de 60 % desta produção destina-se a processos de indústria química e petroquímica. A aplicação do hidrogénio nas células de combustível representa um pequeno nicho no mercado deste combustível, nicho esse com um elevado potencial de crescimento.

2.1 Fontes e aplicações do hidrogénio [8]

A maior parte do hidrogénio produzido a nível mundial provém de derivados fósseis como o petróleo, gás natural e carvão. Cerca de 95% da produção mundial resulta de processos químicos ou das refinarias.

A maioria do hidrogénio produzido (55%) é aplicado para fins não energéticos, como é o caso da síntese da amónia ou do metanol, produção de ferro e aço, tratamento de óleos e gorduras e aplicado também na indústria do vidro e de componentes electrónicos. O hidrogénio é utilizado indirectamente para aplicações energéticas, especialmente nas refinarias, uma vez que é necessário proceder à dessulfuração do fuel de forma a que os novos limites máximos autorizados para compostos sulfúricos na gasolina e no diesel sejam cumpridos. Apenas 5% do hidrogénio produzido é aplicado directamente em energia.



Fonte: Zittel/Niebauer
Identification of hydrogen
By-Product Sources in the European Union, Ottobrunn 1998

Figura 1 – Aplicações do hidrogénio

2.2 Produção do hidrogénio a partir de derivados fósseis ^{[15],[16]}

Um dos aspectos que distingue o hidrogénio de outras fontes de energia é o facto deste não se tratar de uma fonte primária de energia, como tal tem que ser extraído a partir de outras fontes de energia. Sendo assim, a sua produção torna-se num vector essencial à sua viabilidade como fonte de energia. Cerca de 62% do hidrogénio é produzido directamente pelo *steam reforming* ou por oxidação parcial de óleos pesados; os restantes 38% resultam principalmente do *reforming* da gasolina e da produção de etileno, sendo o hidrogénio produzido como sub-produto.

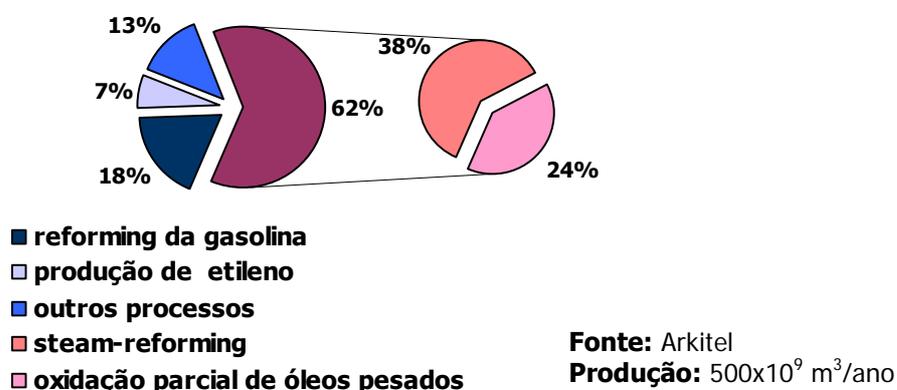


Figura 2 - Principais fontes de produção de hidrogénio ^[10]

Os processos mais comuns de produção de hidrogénio a partir de derivados fósseis são o *steam reforming* (reformação a vapor) para o gás natural, oxidação parcial para os hidrocarbonetos pesados e gaseificação para o carvão.

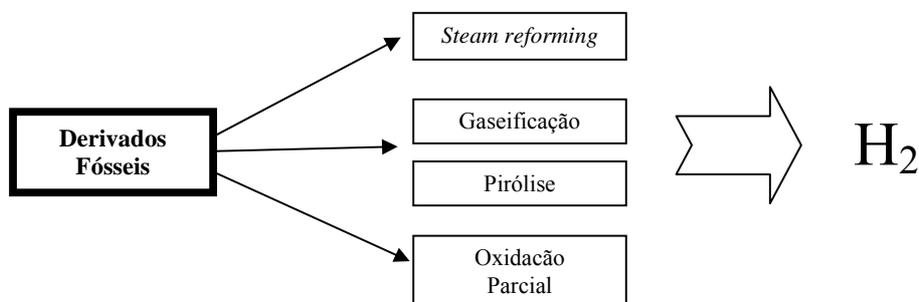


Figura 3 – Fontes de produção de H₂

2.2.1 *Steam Reforming*

Trata-se de um processo térmico que envolve a reacção do metano, CH₄, ou outro hidrocarboneto leve com vapor de água, processo este realizado em duas fases: numa primeira fase o metano reage com o vapor de água na presença de um catalisador a elevada pressão e temperatura (2,5MPa e cerca de 850-950°C), por forma a produzir hidrogénio e monóxido de carbono (CO), de acordo com as seguintes reacções endotérmicas:

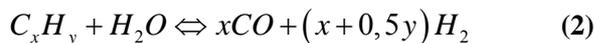
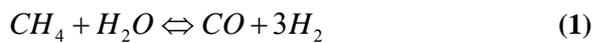
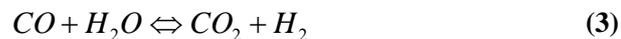
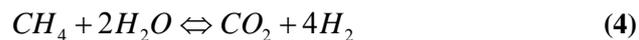


Figura 4 - *Steam Reforming* da indústria Linde

Numa segunda fase ocorre uma reacção catalítica exotérmica (reacção *shift*) onde o monóxido de carbono produzido na primeira fase, é combinado com vapor de água de forma a obter dióxido de carbono e hidrogénio.



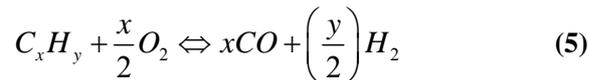
O balanço final deste processo pode ser expresso pela reacção



As unidades de *reforming* de grande dimensão têm capacidade para produzir cerca de $1 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{h}$, correspondendo a 960 GJ/h, com uma eficiência de 70-80%. Este é dos métodos mais eficazes para a produção de hidrogénio, embora do ponto de vista ambiental este sistema de produção não seja o mais sustentável, uma vez que o CO₂ emitido contribui para o efeito de estufa.

2.2.2 Oxidação Parcial de hidrocarbonetos pesados

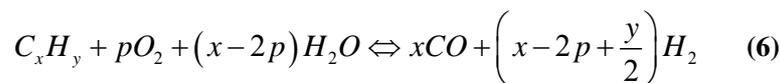
O processo de reforma por oxidação parcial é um dos métodos mais antigos de produção de hidrogénio e está a tornar-se cada vez mais popular. Neste processo o combustível reage com uma quantidade limitada de oxigénio para produzir o hidrogénio, que depois é purificado.



Na oxidação parcial, há semelhança do *steam reforming*, pode-se efectuar a reacção *shift* análoga à expressão (3) sem a necessidade de catalisadores. Pode ser aplicada em diferentes tipos de hidrocarbonetos, incluindo combustíveis pesados e hidrocarbonetos sólidos (menos nobres). Reagem na gama de temperaturas que varia entre 1300 e 1500°C e a pressões na ordem dos 30 a 100 bar, havendo libertação de calor. Actualmente a Shell e a Texaco destacam-se na produção de hidrogénio via oxidação parcial.

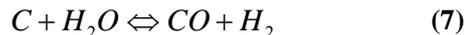
Devido às suas vastas reservas, o carvão assume um papel importante no sector energético. Nos países ricos neste combustível, como é o caso da África do Sul e da China, a oxidação parcial deste minério está comercialmente bem estabelecida. O processo é análogo ao descrito anteriormente, contudo é necessário preparar o carvão, transformá-lo em pó fino e misturá-lo com água de modo a formar uma pasta susceptível de ser bombeada.

Existe um processo, *reforming autotérmico*, que resulta da combinação da oxidação parcial e do *steam reforming*. Neste processo os hidrocarbonetos reagem com uma mistura de oxigénio e vapor num termo-reactor e na presença de catalisador. Aí ocorrem trocas de calor entre o processo endotérmico do *steam reforming* e entre a oxidação parcial, processo este exotérmico.



2.2.3 Gaseificação do carvão

Outro processo que permite extrair o hidrogénio a partir do carvão é a gaseificação. Consiste na decomposição térmica deste num combustível gasoso, o H_2 , formando-se ar, oxigénio, hidrogénio, vapor de água, ou uma misturas destes gases. De uma forma simplista a reacção que traduz a gaseificação pode ser expressa por



Para além do carvão, a biomassa ou combustíveis líquidos pesados também podem sofrer este tipo de gaseificação.

2.2.4 Pirólise ^[14]

A pirólise consiste na separação de hidrocarbonetos a elevadas temperaturas em carbono e hidrogénio, utilizando o *carbon felt* como catalisador. O carbono resultante pode ser sequestrado, porém, devido à energia necessária para o processo, ocorrem emissões de carbono.

O carbono sequestrado de elevada pureza, o *carbon black*, é usado na indústria do plástico, do tear e das baterias, sendo uma mais valia económica. A produção de hidrogénio por este processo poderá sair mais barato do que o *steam reforming*.

❖ Pirólise de hidrocarbonetos a plasma

O *reforming* de hidrocarbonetos gasosos pode ser auxiliado ou mesmo realizado por um arco eléctrico que transforma os hidrocarbonetos e outros reagentes em gás ionizado, ou seja, em plasma, a temperaturas superiores a 1500 °C . No *reforming* pirolítico a plasma, a energia necessária para que ocorram as reacções é fornecida aos reagentes na sua passagem pelo reactor, numa região denominada arco-plasmático, caracterizada pela presença de descargas eléctricas e pela sua alta densidade energética. O uso do plasma permite que a decomposição do hidrocarboneto em hidrogénio e carbono se faça na ausência de catalisadores. Este é o primeiro processo com combustíveis fósseis capaz de produzir uma quantidade mínima de gases de efeito de estufa (GEE).

2.3 Produção do hidrogénio pelo processo de electrólise [16], [17], [18]

Actualmente apenas 2% do hidrogénio produzido a nível mundial provêm da electrólise, sendo inferior a 1% o proveniente da electrólise da água.

A electrólise é um processo que separa os elementos químicos de um composto por aplicação de uma corrente eléctrica. Primeiramente dá-se a dissociação do composto em iões, segue-se uma passagem de corrente contínua através desses mesmos iões, obtendo-se finalmente os elementos químicos. Em muitos casos, dependendo da substância a ser electrolisada e do meio em que ela ocorre, para além de se formarem elementos também ocorre a formação de novos compostos. O processo da electrólise é uma reacção de oxidação-redução oposta àquela que ocorre numa pilha sendo, portanto, um fenómeno físico-químico não espontâneo.

A produção comercial do hidrogénio através deste processo tem uma eficiência entre 70 e 75% que pode ser melhorada por adição de sais ao electrolito de modo a aumentar a condutividade bem como utilizando a electrólise a vapor, por substituição parcial de electricidade em energia térmica. Dado que a quantidade de energia necessária à produção de hidrogénio é elevada (4,5 a 5 kWh/m³ H₂), o seu custo também é elevado, sendo a electricidade responsável por dois terços do mesmo. Por isso a produção do hidrogénio por esta via não é economicamente favorável.

❖ A electrólise na água

A reacção da electrólise pode ser expressa por



No eléctrodo negativo, o cátodo, existe uma carga negativa gerada por uma bateria, da qual resulta uma tensão eléctrica que repele electrões para a água. No eléctrodo positivo, o ânodo, existe uma carga positiva que absorve os electrões. Como a condutividade da água é fraca, em vez da criação de carga ao longo de todo o circuito, as moléculas da água que se situam junto do cátodo são separadas em protões e em iões hidróxido,

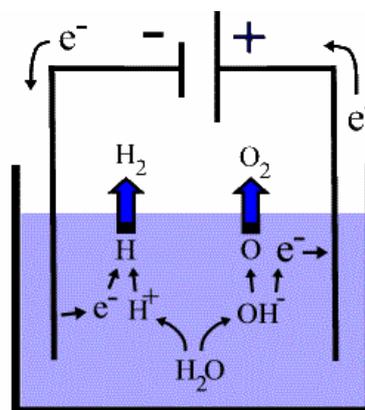
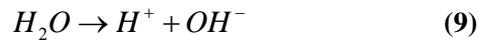


Figura 5 – Electrólise da água



Era de esperar que a água se separasse em partículas neutras (H e OH), mas tal não acontece dado que a electronegatividade do átomo de oxigénio é superior à do hidrogénio, ou seja, o oxigénio capta o electrão ao hidrogénio ficando na forma mais estável com as orbitais todas preenchidas.

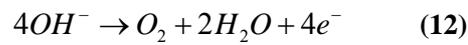
O H^+ é capaz de capturar um electrão do cátodo, dador de electrões, passando a átomo neutro:



Este átomo de hidrogénio encontra outro átomo de hidrogénio e forma uma molécula gasosa de hidrogénio.



O ião OH^- migra para o ânodo e aí perde o electrão capturado ao hidrogénio. A produção de oxigénio e de água é conseguida a partir de 4 iões OH^- de acordo com a seguinte reacção:



A libertação de oxigénio é observada pelo borbulhar que surge na solução. Assim, um circuito fechado é criado, envolvendo partículas negativamente carregadas – electrões no fio, iões de hidróxido na água. A energia cedida pela bateria é armazenada sobre a forma de hidrogénio.

A produção sustentável da electricidade torna-se um ponto vital na viabilidade da electrólise, dado que esta acarreta dois terços do seu custo. Sendo assim, as energias renováveis, tais como as estações hidroeléctricas, eólicas, geotérmicas, solares e a biomassa, protagonizam um papel fulcral.

Sociedade do Hidrogénio Renovável

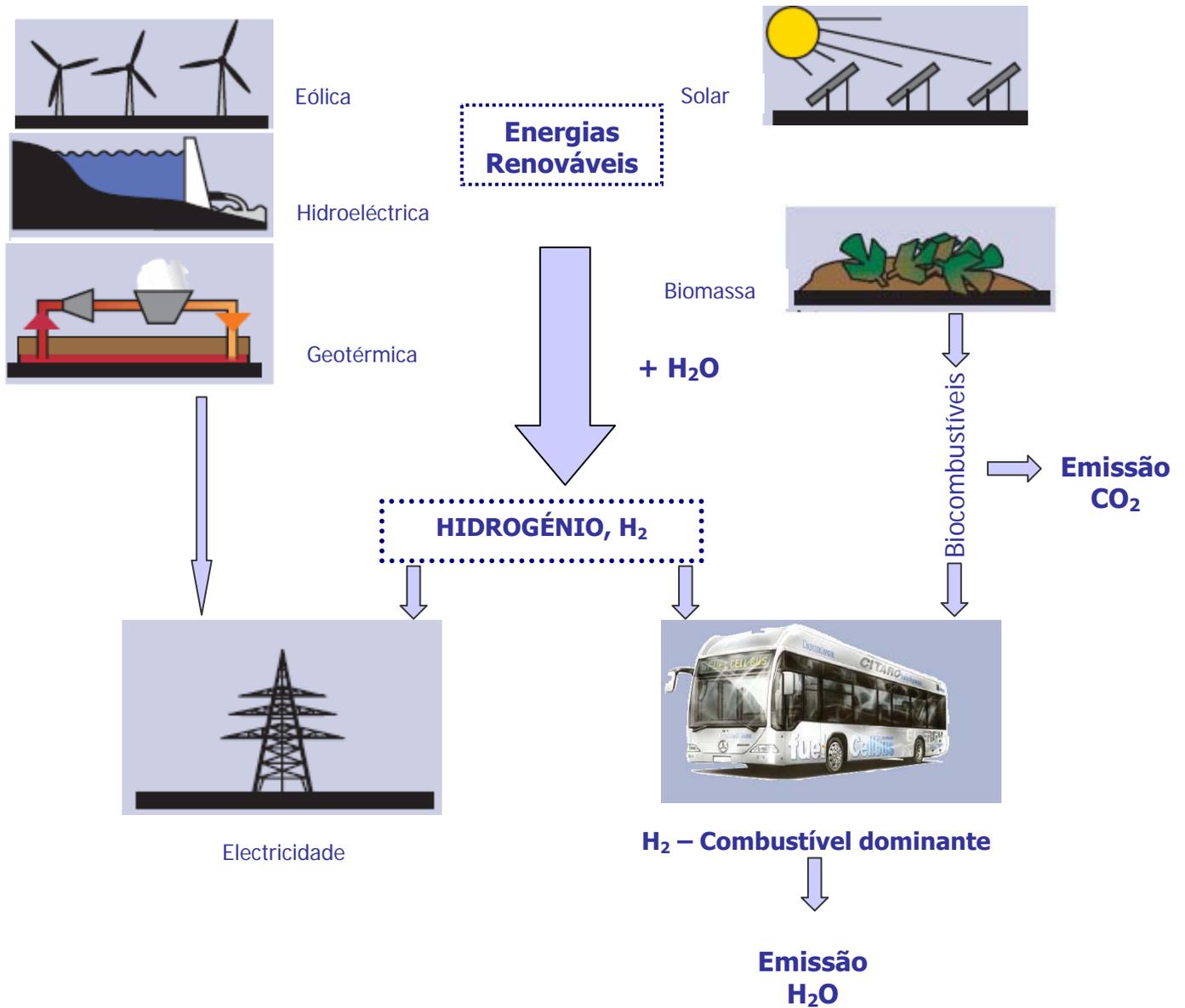


Figura 6 - Fontes de Hidrogénio a partir de recursos renováveis e seu consumo

2.3.1 Hidroeléctrica ^[16]

A hidroeléctrica é de longe a maior fonte de energia renovável, representando cerca de 92% da energia renovável produzida. No ano 2000 a hidroeléctrica produziu 2705 TWh de electricidade (17% da cota mundial de electricidade) com capacidade de gerar 740 GW.

Tabela 1 – Produção de energia hidroeléctrica para vários países

Produção Hidroeléctrica	TWh (2000)	% do total mundial	Capacidade instalada em GW (1999)
Canada	358	13.2	67
Québec	165	6.1	38
Brasil	305	11.3	59
EUA	275	10.2	99
China	222	8.2	53
Rússia	165	6.1	44
Noruega	142	5.2	28
Japão	97	3.6	45
Resto do Mundo	1141	42.2	345
Mundial	2705	100.0	740

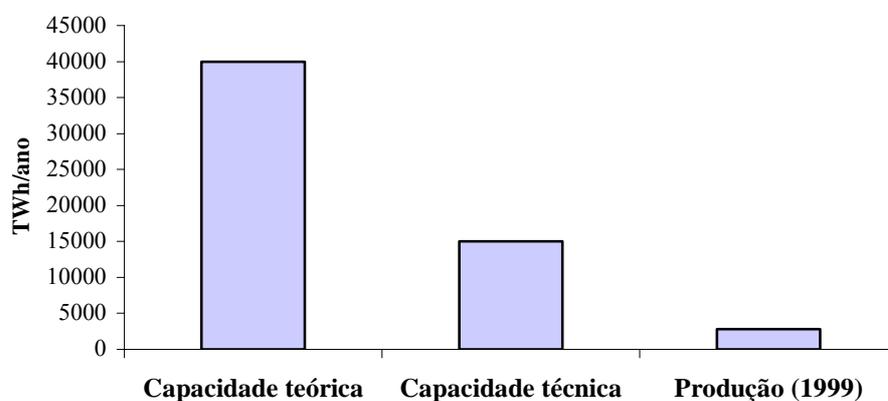


Figura 7 – Panorama hidroeléctrico mundial

Se todo o potencial hidroeléctrico do Québec (perto de 200 TWh/ano) fosse usado para a electrólise da água, 4 milhões de toneladas de hidrogénio seriam produzidas por ano de uma forma sustentável, o suficiente para abastecer mais de 22 milhões de carros.

2.3.2 Eólica

Actualmente o vento representa a fonte de energia com maior crescimento a nível mundial. Perto de 20 GW de capacidade eólica estão instalados na rede mundial, estando já disponíveis turbinas com capacidade de 3,6 MW. No entanto esta tecnologia apresenta uma série de desafios, destacando-se a localização específica, a disponibilidade sazonal e um *output* imprescindível com baixa capacidade.



Figura 8 –Moinhos eólicos

2.3.3 Geotérmica

Nalguns países como os Estados Unidos, Itália, Islândia e Portugal (em particular nos Açores), têm sido construídas centrais geotérmicas destinadas ao aproveitamento da energia geotérmica e à sua conversão em energia eléctrica. A capacidade de produção da central portuguesa é de 4,6 MW. Estima-se que, actualmente, este tipo de centrais satisfazem as necessidades energéticas de cerca de 60 milhões de pessoas em 21 países.



Figura 9 – Central geotérmica

Em Reykjavik, capital da Islândia, cerca de 95% das casas são aquecidas por este processo, sendo por isso considerada uma das cidades menos poluídas do mundo.

2.3.4 Solar

Existem duas formas de produzir electricidade a partir do sol: por unidades fotovoltaicas, que originam corrente eléctrica convertendo directamente a energia solar ou por centrais termo-solares, que usam o calor radiado pelo sol para gerar electricidade.

Do ponto vista económico, o sistema fotoeléctrico tem interesse para aplicações que exijam uma capacidade não superior a 1MW, portanto pouco adequado para produções em escala .



Figura 10 – Painéis solares



Figura 11 – Paineis fotovoltaicos

As centrais termo-solares (reflectores parabólicos e torres solares), representam uma possibilidade bem mais barata e aceitável para o aproveitamento de energia solar em grande escala. Os reflectores parabólicos foram concebidos para capacidades de 30-80 MW, enquanto que para as torres solares foram constituídos planos para construir centrais com capacidades da ordem dos 200 MW onde temperaturas na ordem dos 1000 °C podem ser atingidas.



Figura 12 – Torre solar piloto

A figura acima mostra uma central piloto constituída em Espanha na década de 80, com capacidade para gerar 50kW de energia verde.

Em 1998, a energia primária necessária era de 111,7 milhões de kWh. A tabela que se segue mostra as produções actual, teórica e potencial técnica de energia solar.

Tabela 2 – Produção anual de energia solar, em kWh/ano

Produção actual	0,028
Produção teórica	1083420
Potencial técnico	> 437,5

2.3.5 Biomassa

Dado o crescente interesse nas energias renováveis para a redução das emissões de CO₂, a biomassa tem sido alvo de especial interesse por parte da indústria da energia. A lógica de utilização da biomassa pode passar pela conversão desta em biogás e gases sintéticos, bem como hidrogénio. Actualmente a geração bioquímica de hidrogénio através das algas verdes está em estudo.

Existem três métodos para a produção de hidrogénio a partir da biomassa, apesar de nenhum ser economicamente rentável. São eles a gaseificação a vapor, pirólise e a hidratação bioquímica.

❖ Gaseificação a vapor

É um processo termoquímico que pode ser utilizado em resíduos florestais, por decomposição destes em monóxido de carbono e hidrogénio. O processo requer altas temperaturas (800 – 1000°C) e um abastecimento restrito de oxigénio (inferior ao necessário para a combustão), tendo como produtos finais hidrogénio, monóxido de carbono e metano. Por via da reacção *shift* no *steam reforming* o monóxido de carbono pode ser transformado em dióxido de carbono e hidrogénio (*vide* equação (3))

❖ Pirólise

É um processo semelhante ao usado na pirólise de hidrocarbonetos, mas bastante mais complicado devido à complexidade e variedade da biomassa existente. Existem alguns processos biológicos dos quais o hidrogénio

aparece como produto imediato; investigações na área da geração de hidrogénio a partir de sistemas alga-bactéria indicam um custo de 120 €/MWh.

As cianobactérias são organismos unicelulares tanto na água como no ar e que produzem naturalmente hidrogénio durante o seu normal metabolismo. Estas bactérias possuem enzimas que absorvem a luz solar como energia para separar as moléculas de água, produzindo assim hidrogénio. Dado que as cianobactérias sintetizam hidrogénio a partir da água, o resíduo que se obtém não é mais do que água, utilizada para o metabolismo seguinte.



Figura 13 – *Blue Tower*, Herten

No ano 2000 foi iniciado um projecto em Herten, Alemanha designado *Blue Tower* ^[5] para a produção de hidrogénio a partir da biomassa. A capacidade é de 1 MW com possibilidade de sofrer expansão até 10 MW. A composição de várias alimentações está representada na figura seguinte.

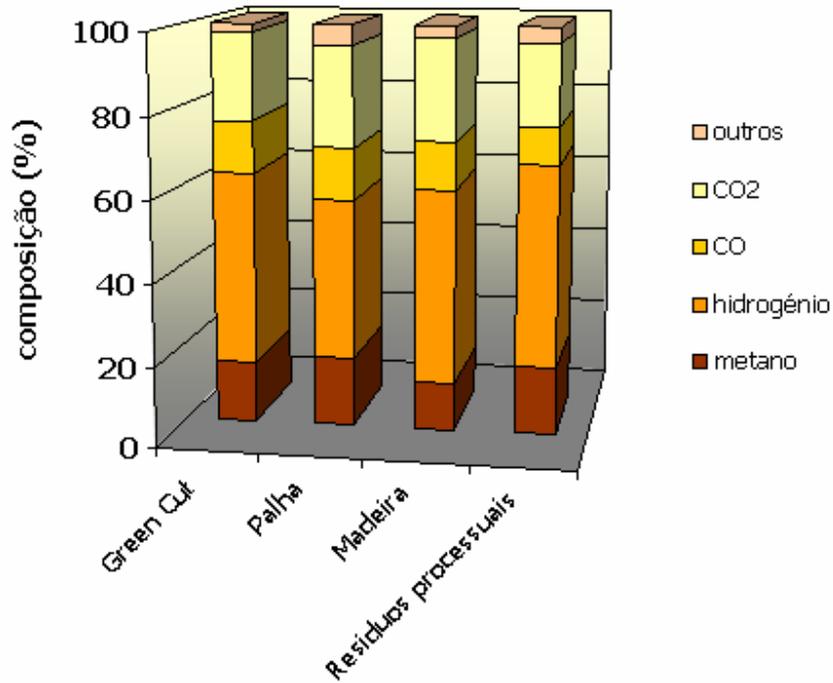


Figura 14 – Composição de alimentações à Blue Tower

Para além de ser o composto maioritário em qualquer uma das alimentações, o hidrogénio é produzido numa quantidade superior a 50%.

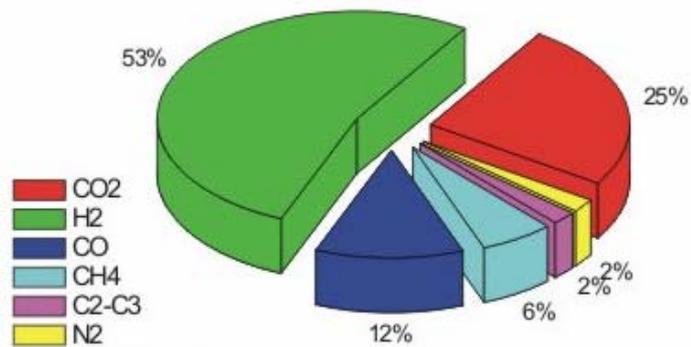


Figura 15 – Gases libertados pela Blue Tower^[5]

2.4 Ciclo de vida dos sistemas energéticos do hidrogénio

Para estudar a sustentabilidade de um dado processo de produção de hidrogénio é necessário conhecer o seu ciclo de vida para se compreender as suas repercussões ambientais, económicas e energéticas. Para tal à que ter dados quanto à energia consumida, poluentes emitidos, espaço necessário e material utilizado em cada processo de produção de hidrogénio. Os diferentes processos de produção de hidrogénio podem ser comparados entre si, segundo três critérios: energia não-renovável consumida, quantidade de CO₂ emitida e o custo de produção.

Tabela 3 - Fluxos de Energia na produção de 1kWh de H₂

Processos de produção de H₂	Energia Auxiliar (kWh)	Energia Primária (kWh)	Perdas de Energia (kWh)
<i>Steam Reforming do Gás Natural</i>	0,01	1,55	0,56
<i>Gaseificação de Carvão Betuminoso</i>	0,28	1,76	1,04
<i>Gaseificação de Biomassa Florestal</i>	0,37	1,42	0,79
<i>Electrólise, Fotovoltaica</i>	0,46	15,3	14,76
<i>Electrólise, Parabólica</i>	0,16	10,2	9,36

Como se pode verificar da análise da Tabela 3, a energia primária proveniente da biomassa e dos combustíveis fósseis necessária à produção de 1 kWh de hidrogénio situa-se entre 1,4 e 1,8 kWh, apresentando perdas de 0,5 a 1,1 kWh.

No caso dos processos que envolvem a energia solar, a energia primária necessária à produção é bastante superior, pois somente 10-20% dessa energia é convertida em electricidade. Uma vez que o Sol é uma fonte de energia renovável, pode ser utilizado a nível industrial nos países com mais horas de radiação solar.

2.4.1 Emissões de CO₂ e custos associados

Os níveis de emissão de CO₂ e os custos exibidos na figura que se segue, têm em conta o tratamento do combustível, o transporte, as instalações e equipamento necessário à produção de H₂.

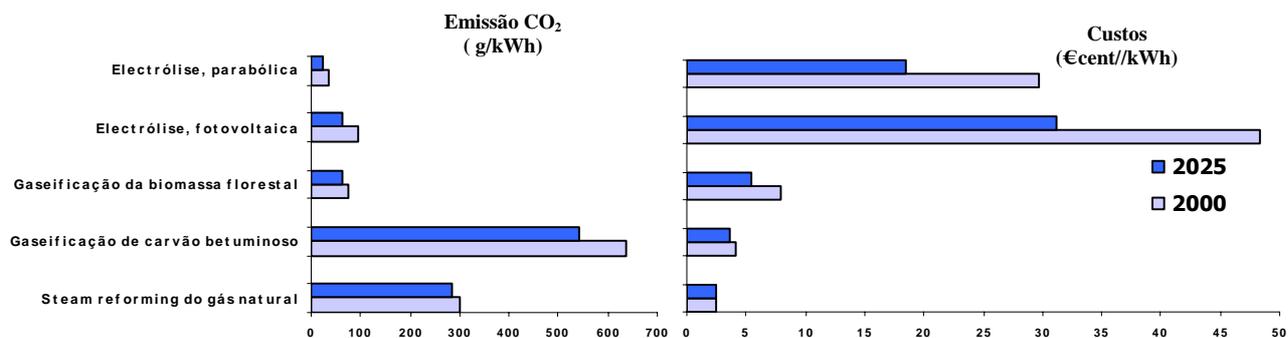


Figura 16 – Emissão de CO₂ em g/kWh e respectivos custos para diferentes fontes de energia

Existe uma relação inversamente proporcional entre o recurso de energias renováveis e as emissões de CO₂. Sendo assim, tendo em conta o Protocolo de Quioto (onde Portugal assumiu um compromisso na redução das emissões de CO₂, e onde foi modelado também um possível mercado de cotas negociáveis de emissões de CO₂), os processos de produção de H₂ que envolvem energias renováveis são mais vantajosos.

Os dois processos de produção de H₂ a partir de combustíveis fósseis apresentam níveis nas emissões de CO₂ significativamente diferentes, devendo-se ao facto do gás natural apresentar um rácio H/C bastante superior ao do carvão.

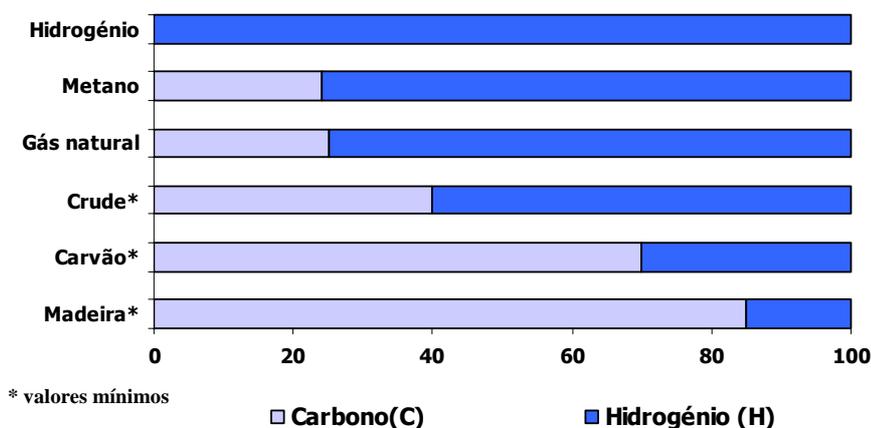


Figura 17 – Rácio H/C dos vários transportadores de energia

Em termos de custos, há uma clara vantagem por parte dos métodos que envolvem os combustíveis fósseis, sendo 5 ou 10 vezes menos dispendiosos do que as variantes solares. No entanto a produção de H₂ a partir da biomassa apresenta um custo competitivo face ao H₂ produzido a partir dos combustíveis fósseis.

No caso da produção solar, a produção parabólica é claramente mais favorável economicamente. Se for necessário liquefazer o hidrogénio, o custo triplica devido ao elevado preço de liquefacção e ao aumento no custo do seu transporte.

3 Manuseamento do Hidrogénio

3.1 Propriedades físicas e químicas

Para um manuseamento seguro do hidrogénio é necessário conhecer as suas propriedades físicas e químicas.

Tabela 4 – Propriedades físicas e químicas do Hidrogénio ^[7]

Peso Molecular (g/mol)	2,0
Ponto de fusão (°C)	-259
Ponto de ebulição (°C)	-253
Temperatura Crítica (°C)	-240
Densidade relativa,gás (ar=1)	0,07
Densidade relativa,líquido (água=1)	0,07
Solubilidade na água (mg/l)	1,6
Aspecto/cor	incolor
Cheiro	inodoro
Temperatura de auto-ignição (°C)	560
Gama de inflamabilidade (% vol no ar)	4 -75

O hidrogénio é o mais leve de todos os gases, apresentando uma densidade de 0,084 kg/m³ a 1 bar e a 15 °C. Em caso de fuga do gás, este sobe rapidamente acumulando-se na parte superior de qualquer recinto fechado. Se o hidrogénio for descomprimido de 175 bar para 1 bar, a temperatura aumenta 5°C (de 20 para 25°C), insuficiente para ocorrer a auto-ignição (560°C).

O hidrogénio quando reage com agentes oxidantes, como o cloro ou o oxigénio, pode-se inflamar podendo o processo de queima originar uma explosão. Se ocorrer em recinto fechado, o aumento de pressão pode causar destruição. A combustão do hidrogénio com o ar é iniciada por fontes de ignição de baixa energia, podendo mesmo partículas de pó carregadas de hidrogénio originarem uma fâsca devido à carga electrostática.

As propriedades químicas do hidrogénio líquido e gasoso são semelhantes, no entanto este último reage mais facilmente com o oxigénio devido à sua elevada temperatura.

A tabela seguinte compara o hidrogénio com o diesel, duas fontes de energia diferentes que podem ser utilizadas para a mesma finalidade.

Tabela 5 – Comparação de densidades do hidrogénio e do diesel ^[8]

1 m³ de hidrogénio gasoso	0,30 l de diesel
1 l de hidrogénio líquido	0,24 l de diesel
1 kg de hidrogénio	2,79 kg de diesel

3.2 Segurança ^[6]

Exceptuando o He, à temperatura em que o hidrogénio se poderá encontrar no estado líquido (-259°C) todos os gases se encontram no estado sólido, em particular o ar. Uma mistura de ar com hidrogénio líquido (LH₂) é explosiva, daí a necessidade de se afastar uma instalação de hidrogénio das outras substâncias. A temperatura baixa do hidrogénio líquido origina condensação do ar atmosférico nas partes exteriores da instalação isentas de isolamento. Se o ar liquefeito se tornar rico em oxigénio devido à evaporação do azoto, pode actuar como comburente quando em contacto com substâncias combustíveis.

O hidrogénio quando inalado em elevadas concentrações (cerca de 30%) causa asfixia devido à falta de oxigénio, no entanto não é necessário protecção respiratória aquando o seu manuseamento. No caso do hidrogénio criogénico líquido ou gasoso, podem ocorrer queimaduras por contacto com a pele.

A formação de atmosferas potencialmente explosivas provenientes das instalações de hidrogénio podem ser evitadas. Para tal é fundamental que a sua construção seja efectuada em áreas bem ventiladas e arejadas, de preferência ao ar livre, de forma a que eventuais fugas de hidrogénio se libertem para a atmosfera sem perigo. Deve-se assegurar que pelo menos o depósito de hidrogénio esteja nestas condições; no caso de fuga, o corte

da alimentação de gás tem que ser possível; as junções e flanges têm que ser blindadas e seladas, especialmente se estiverem situadas em locais de difícil acesso; as aberturas no telhado permitem uma ventilação eficaz, controlada por um sistema de alarme que detecta o valor de H_2 libertado; vários equipamentos de segurança são requeridos, sendo exemplo os sensores de hidrogénio, os detectores de chama e sistemas de extinção de incêndio.

4 Armazenamento e transporte do Hidrogénio ^{[1], [6]}

Tal como o petróleo, o hidrogénio pode ser armazenado e usado independentemente do tempo de produção. Pode ser armazenado não só na forma gasosa em depósitos sob pressão (de 350 a 700 bar) e à temperatura ambiente como também pode ser armazenado e transportado quase sem pressão em depósitos isolados sob a forma de líquido criogénico. Os depósitos devem ser colocados em locais bem ventilados, longe de áreas residenciais e a temperaturas inferiores a $50^{\circ}C$.



Figura 18 - Estação de armazenagem de hidrogénio em Hamburg ^[8]

O material seleccionado para as instalações de hidrogénio deve ser escolhido de modo a evitar fracturas. Dado que o hidrogénio não é corrosivo, é possível utilizar nas instalações materiais metálicos, plásticos e borracha, no entanto, estes dois últimos materiais juntamente com a aço-carbono devem ser evitados nas instalações de LH_2 uma vez que podem ocorrer fissuras, reduzindo a sua ductilidade. Os materiais fundidos também devem ser evitados uma vez que a sua porosidade seria causadora de fugas.

Antes de se iniciar o processo de transporte, deve-se sempre verificar se a válvula de segurança está fechada e que não existem fugas; comprovar que o tampão que protege a válvula está instalado correctamente; garantir ventilação adequada e cumprir a legislação em vigor.

4.1 Armazenamento por compressão do H₂

A compressão do hidrogénio é a forma mais vantajosa de o armazenar de modo a minimizar as dimensões da estação de armazenamento. Para a compressão do hidrogénio gasoso (CGH₂) são necessários um ou mais compressores e vasos de armazenagem, bem como pistolas de enchimento. Existem duas formas de abastecimento do CGH₂: *Overflow* (por excesso) e *Booster* (por impulsão) que podem ser técnicas aplicadas em separado ou em conjunto. As pressões típicas para o armazenamento variam entre 200 e 350 bar.

❖ Abastecimento *Overflow*

A pressão à qual o hidrogénio se encontra armazenado nas estações de abastecimento é bastante superior à pressão dos tanques dos veículos de transporte. Para otimizar o abastecimento desses mesmos tanques, a armazenagem é efectuada em vários cilindros ligados em série, sendo o último aquele que está ligado ao tanque do veículo. A pressão à qual é descarregado o GH₂ é superior à pressão do tanque.



Figura 19 – Abastecimento *Overflow* ^[8]

❖ Abastecimento *Booster*

Neste tipo de abastecimento, a pressão a que se encontram os depósitos de armazenagem do hidrogénio é inferior à pressão do tanque que o vai transportar. Nesse caso é necessário um compressor adicional (*booster*) que permita a entrada do GH₂ no tanque à pressão requerida. Se ocorrer falha do compressor, é necessário a existência de um *by-pass* que garanta o abastecimento parcial do tanque de transporte.

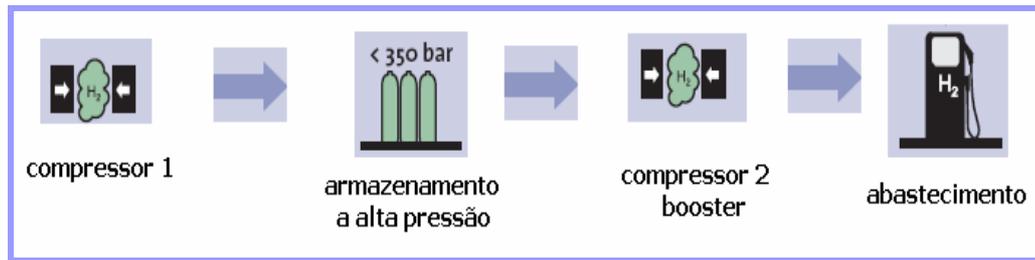


Figura 20 – Abastecimento *Booster*^[8]

A desvantagem do armazenamento do hidrogénio por compressão (CGH₂) é o peso e o espaço requerido dos tanques. Se o tanque for largo, maior serão as paredes do tanque; se o tanque for mais pequeno, maior o número de tanques para armazenar a mesma quantidade.

4.2 Armazenamento por liquefacção

A forma liquefeita do hidrogénio é requerida quando é necessário transportá-lo para locais afastados da produção. No caso do hidrogénio estar armazenado na forma líquida (LH₂) e ser abastecido na forma gasosa, o líquido deve ser pressurizado utilizando uma bomba criogénica. Nesta situação é dispensável o uso do compressor para a fase gasosa e o abastecimento é efectuado num sistema *Overflow*. Os tanques têm uma capacidade de 3,3 toneladas e devem ser isolados devido às baixas temperaturas a que estão sujeitos. Se o hidrogénio estiver armazenado durante longos períodos de tempo, pequenas quantidades podem ser evaporadas e alterar a pressão dos tanques. Para além desta desvantagem, a energia requerida para a liquefacção do hidrogénio não pode ser esquecida: 1 m³ de hidrogénio liquefeito contém 3,54 kWh, sendo necessário o fornecimento de pelo menos 1 kWh.

A energia associada às diferentes formas de armazenamento de hidrogénio não é constante. A figura seguinte mostra a diferença que existe entre os vários estados de agregação da matéria.

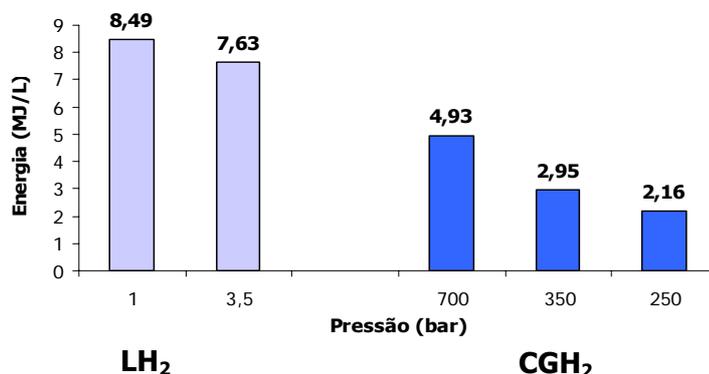


Figura 21 – Energia nos diferentes estados de armazenamento do hidrogénio ^[1]

A energia requerida para a armazenagem e transporte de gás é menor que para o hidrogénio líquido, no entanto este último apresenta a melhor solução uma vez que um único tanque de transporte de hidrogénio líquido consegue ultrapassar os 10 tanques necessários para transportar a mesma quantidade de hidrogénio na forma gasosa. Abaixo da pressão normal, 3 m³ de hidrogénio contêm a mesma quantidade de energia que um litro de gasolina.

Os veículos podem armazenar hidrogénio na forma liquefeita ou na forma comprimida, consoante as aplicações. A *Linde* sugere que o transporte de hidrogénio deve ser efectuado na forma liquefeita, sendo o hidrogénio posteriormente armazenado na estação de abastecimento em tanques subterrâneos (como acontece com a gasolina). Pode depois ser distribuído a partir do tanque de LH₂ na forma líquida ou gasosa, sendo necessário o uso de bombas criogénicas “*booster*” para a obtenção de hidrogénio a 700 bar: o hidrogénio líquido passa por um permutador de calor que o aquece até à temperatura ambiente. Dado que os líquidos são mais facilmente bombeados que os gases, a utilização de bombas criogénicas são pequenas, requerem menor manutenção e tornam-se 40% mais baratas que os compressores.

4.3 Outros métodos de armazenamento

O hidrogénio pode ser armazenado num transportador de metal - *hidreto de metal*, nas cavidades de uma grelha metálica feita de magnésio ou de titânio ou então o hidrogénio pode ligar-se com o metal por uma ligação iónica, sendo desnecessário pressões elevadas. Esta forma de armazenamento consiste na absorção de hidrogénio gasoso por parte dos hidretos metálicos. Dependendo da tecnologia utilizada e das características do hidreto, a temperatura de armazenamento tanto pode variar entre 20-80 °C (baixas temperaturas) como

pode ser superior a 300 °C (altas temperaturas). Quando o hidrogénio precisa de ser libertado, são exigidas determinadas condições de pressão e de temperatura. Apesar deste processo poder ser repetido inúmeras vezes sem perda de capacidade, apresenta como desvantagem o elevado peso da estrutura do armazenamento.

A armazenagem em sistemas porosos apresenta como vantagem a baixa pressão requerida para o armazenamento do hidrogénio, para além da elevada eficiência verificada. Contudo esta tecnologia está longe de alcançar o sucesso desejado devido aos custos serem elevados. Este tipo de tecnologia inclui materiais à base de carbono, nanotubos, nanofibras, carbonos e fibras activadas como também zeólitos, aerogéis e sílica porosa.

O *armazenamento em grafite* é uma técnica ainda em desenvolvimento baseada na nanotecnologia, muito afastada da tradicional compressão ou liquefacção; as *micro-esferas de vidro* são sistemas de esferas que armazenam o hidrogénio líquido a elevada pressão. As esferas são mantidas à temperatura ambiente mas quando estão sujeitas a temperaturas elevadas ou quando entram em colisão o hidrogénio é libertado.

4.4 Transporte

O hidrogénio proveniente do *steam reforming* pode ser distribuído por *pipeline* até às estações de abastecimento, desde que situadas em locais de fácil acesso. As estações que actualmente existem na Europa não estão em condições de usufruir este tipo de abastecimento, sendo por isso o hidrogénio abastecido por via rodoviária. Os *pipelines* têm como desvantagem a complexidade de construção e de manutenção.

❖ Fornecimento externo LH₂



O hidrogénio pode ser fornecido na forma líquida. Apresenta como vantagem o facto do abastecimento deste combustível ser suficiente para três autocarros durante 20 dias. Comparando as curtas distâncias entre as centrais de produção e os clientes, o fornecimento de CGH₂ domina em toda a Europa.

Figura 22 – Tanque de transporte de hidrogénio liquefeito^[81]

❖ Fornecimento externo CGH₂

Por via rodoviária, os tanques de CGH₂ conseguem transportar 600 kg de CGH₂ a uma pressão que varia entre 200 e 300 bar. Um fornecimento de CGH₂ requer uma parceria entre dois tanques de transporte uma vez que é necessário abastecer os postos com mais frequência. Comparando com a LH₂, a energia requerida para a compressão é menor: o hidrogénio é introduzido no tanque e aí permanece sem se verificarem perdas. Londres, Luxemburgo e Porto são exemplos de cidades europeias que dependem do CGH₂ externo.



Figura 23 – Depósitos de CGH₂ no Luxemburgo^[8]

A ideia da liquefacção do gás teve a sua origem nas viagens espaciais realizadas no passado. Actualmente a indústria química é a grande consumidora deste combustível, não só em hidrogenação como também em síntese e produção de fertilizantes. A quantidade e pureza requeridas dependem da aplicação e o seu crescimento nesta indústria prevê-se ser de 7 a 10% nos próximos anos. Contudo, o futuro do hidrogénio passa pelas células de combustível que requerem o hidrogénio e oxigénio para a produção de calor e electricidade, sendo a água o único sub-produto.

5 O Hidrogénio como combustível

5.1 Células de combustível^[24]

Uma célula de combustível é um dispositivo electroquímico que gera electricidade directamente a partir da energia guardada num combustível. É possível ver uma célula de combustível como uma bateria convencional mas onde os reagentes não são sólidos e podem portanto continuar a ser fornecidos continuamente.

Visto que o processo não recorre à combustão, esta solução apresenta enormes vantagens no que diz respeito ao impacto ambiental quando comparada com as tecnologias convencionais de uso de combustíveis.

Todas as células de combustível têm o mesmo princípio. O combustível reage cataliticamente (são removidos electrões dos elementos do combustível) na célula de combustível por forma a criar uma corrente eléctrica. As células de combustível consistem num electrólito colocado entre dois eléctrodos finos (ânodo e cátodo). O combustível passa pelo ânodo (e o oxigénio pelo cátodo) onde se separa cataliticamente em iões e electrões. Os electrões atravessam um circuito externo para servir uma carga eléctrica enquanto os iões se movem pelo electrólito em direcção ao eléctrodo carregado com carga contrária. No eléctrodo os iões combinam-se e dão origem aos produtos de reacção, fundamentalmente água e dióxido de carbono. As reacções químicas variam dependendo do combustível utilizado.

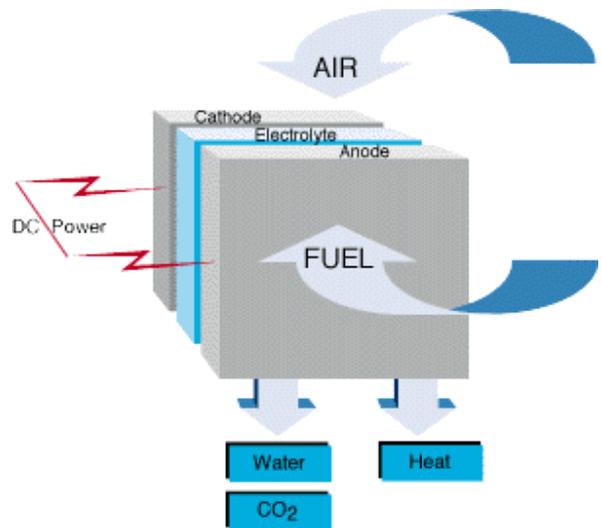


Figura 24 - Célula de combustível genérica

As células de combustível são uma das soluções mais promissoras para a mobilidade sustentável por oferecerem a possibilidade de fornecer energia de uma forma não-poluente.

Uma grande parte da indústria automóvel aposta neste tipo de soluções para enfrentar os desafios ambientais do futuro.

5.1.1 Células de combustível alcalinas

(AFC - Alkaline Fuel Cell)

Este tipo de células de combustível funciona com hidrogénio e oxigénio comprimidos. Usam geralmente uma solução de hidróxido de potássio (KOH) em água como electrólito. A eficiência pode ir até 70% e a temperatura de funcionamento fica entre os 150 e 200° C. Uma célula deste tipo pode fornecer uma potência entre os 300 watts e os 5 kilowatts. Estas células de combustível precisam de hidrogénio puro como combustível porque as

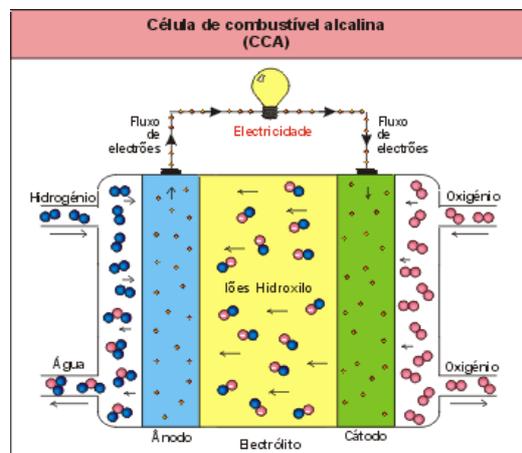
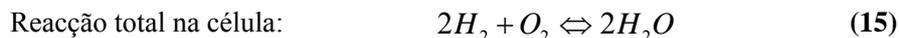
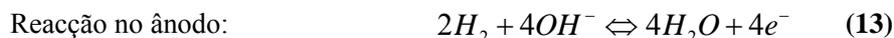


Figura 25 - Célula de combustível alcalina

impurezas podem provocar a formação de carbonato sólido (que interfere nas reacções dentro da célula).



Foi este o tipo de células de combustível usado na nave espacial *Apollo* para fornecer electricidade e água potável. Uma das maiores desvantagens desta tecnologia é o preço do catalisador do eléctrodo de platina.

5.1.2 Células de combustível de carbonato fundido

(MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell)

Numa célula de combustível de carbonato fundido o electrólito é composto por sais de carbonato. Aquecido a 650°C , o sal derrete e conduz iões carbonato (CO_3^{2-}) do cátodo até ao ânodo. No ânodo, o hidrogénio reage com os iões e produz água, dióxido de carbono e electrões. Os electrões, ao atravessarem um circuito externo, fornecem potência eléctrica e voltam ao cátodo. Uma vez no cátodo, o oxigénio do ar e o dióxido de carbono reciclado do ânodo reagem com os electrões para formar iões CO_3^{2-} que reabastecem o electrólito e transferem corrente através da célula de combustível.

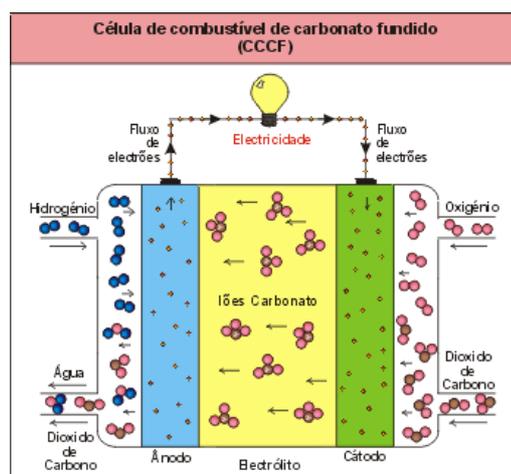
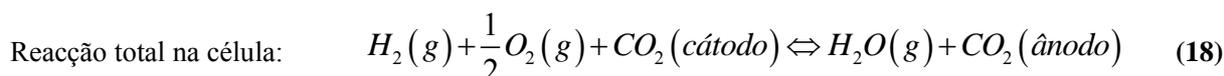
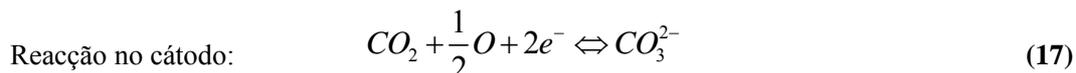
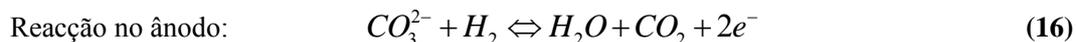


Figura 26 - Célula de combustível de carbonato fundido



Este tipo de células de combustível pode extrair hidrogénio a partir de uma variedade de combustíveis usando um reformador interno ou externo. São também menos sujeitas ao “envenenamento” por monóxido de carbono do que as células de combustível de baixas temperaturas. Isso faz com que os combustíveis fósseis sejam uma solução mais atractiva para este tipo de célula de combustível.

As células de combustível de carbonato fundido funcionam bem com catalisadores de níquel (mais baratos que platina) e exibem uma eficiência de 60%, podendo chegar aos 85% se o calor desperdiçado for aproveitado para gerar electricidade. Actualmente, unidades de demonstração exibem uma produção de 2 MW mas existem planos para unidades de 50 a 100 MW de capacidade.

Duas dificuldades colocam este tipo de tecnologia em desvantagem comparativamente a outro tipo de células: a primeira é a complexidade de trabalhar com um electrólito líquido em comparação com um electrólito sólido, a outra, tem a ver com a reacção química dentro da célula. Os iões CO_3^{2-} do electrólito são gastos nas reacções no ânodo tornando-se necessário injectar dióxido de carbono no cátodo para compensar.

5.1.3 Células de combustível com membrana de permuta de protões (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Este é o tipo de célula de combustível que se acredita vir a conseguir substituir os motores de combustão interna a diesel e a gasolina nos veículos motorizados do futuro. Foi esta a tecnologia usada pela primeira vez pela NASA nos anos 60 no programa *Gemini*.

As células de combustível com membrana de permuta de protões apresentam como principal vantagem a sua simplicidade de funcionamento. Estas células baseiam-se no uso de uma membrana sólida feita de um polímero permeável a protões quando saturado com água mas que nessas condições não conduz electrões.

O combustível destas células é o hidrogénio e o transportador da carga é o ião de hidrogénio, o protão. No ânodo, a molécula de hidrogénio é dividida em iões de hidrogénio e electrões. Os iões atravessam o

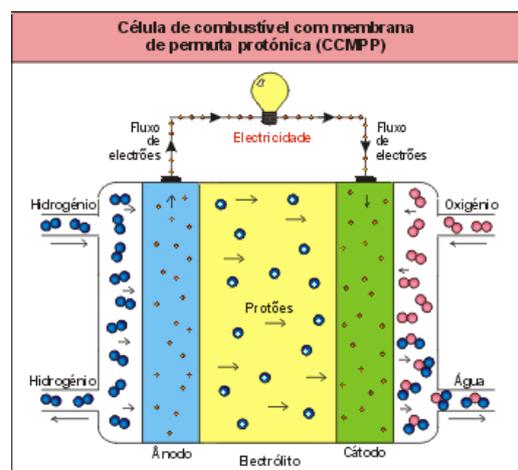
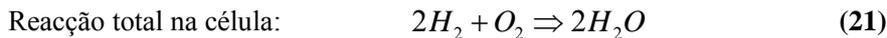
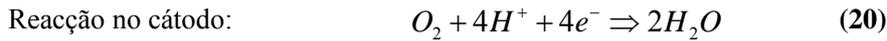
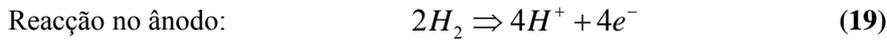


Figura 27 - Célula de combustível com membrana de permuta protónica

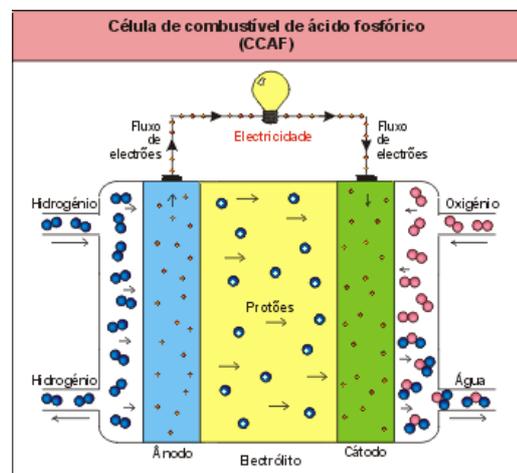
electrólito até ao cátodo enquanto os electrões passam pelo circuito externo onde fornecem potência eléctrica. O oxigénio do ar é fornecido no cátodo e combina-se com os electrões e com os iões de hidrogénio para formar água.



Comparativamente aos outros tipos, as células de combustível de membrana de permuta de protões geram mais potência por volume ou massa de célula de combustível. A elevada densidade de potência faz com que estas células sejam mais compactas e leves. Além disso, a temperatura de operação é inferior a 100° C, o que proporciona um arranque rápido. Estas características aliadas à possibilidade de mudar rapidamente a potência de saída fazem da célula de combustível de membrana de permuta de protões a principal candidata a aplicações em automóveis.

5.1.4 Células de combustível de ácido fosfórico (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell)

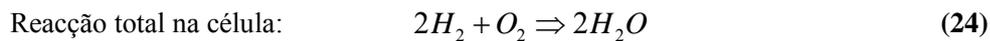
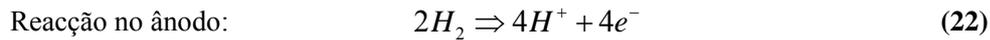
As células de combustível deste tipo são as que exibem o estado de desenvolvimento mais maduro até ao momento, tendo sido as primeiras a serem comercializadas. Desenvolvidas em meados dos anos 60 e testadas desde os anos 70, têm melhorado significativamente em estabilidade, *performance* e custo. Estas características fazem das células de combustível de ácido fosfórico boas candidatas a aplicações fixas.



Neste tipo de células o electrólito é o ácido fosfórico (H₃PO₄) concentrado, o que faz com que os componentes da células tenham de ser resistentes à corrosão. A condutividade iónica do ácido fosfórico é baixa para temperaturas reduzidas, e por isso, estas células funcionam entre os 150° C e os 220° C.

Figura 28 - Célula de combustível de ácido fosfórico

Tal como nas células de combustível de membrana de permuta protónica, o transportador de cargas é o ião hidrogénio, H^+ . As reacções que ocorrem no ânodo e no cátodo são também idênticas.



A eficiência das células de combustível de ácido fosfórico são tipicamente à volta de 40%. Os 80% de eficiência podem também aqui ser alcançados através do aproveitamento da energia libertada em forma de calor.

5.1.5 Células de combustível de óxido sólido (SOFC - Solid Oxid Fuel Cell)

A célula de combustível de óxido sólido é actualmente a célula de mais alta temperatura em desenvolvimento e pode funcionar em temperaturas que vão desde os 600° C aos 1000° C. Esta característica faz com que possa usar uma grande variedade de combustíveis. Para poder operar a tão altas temperaturas, o electrólito é um material cerâmico sólido fino (óxido sólido) que é condutor de iões de oxigénio. Desde os anos 50 que as células de combustível de óxido sólido têm vindo a ser desenvolvidas e têm sido investigadas duas configurações: painel plano e tubular.

O transportador da carga nestas células de combustível é o ião oxigénio. No cátodo, as moléculas de oxigénio provenientes do ar são divididas em iões oxigénio com a adição de quatro electrões. Esses iões são conduzidos através do electrólito e combinam-se com o hidrogénio no ânodo libertando aí quatro electrões. Os electrões atravessam um circuito externo fornecendo assim potência eléctrica.

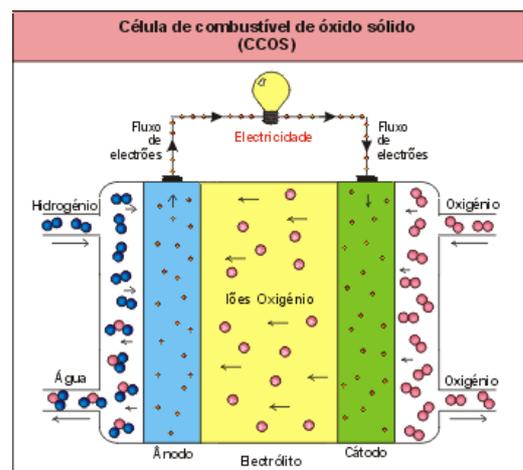
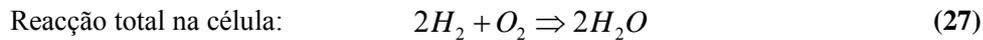
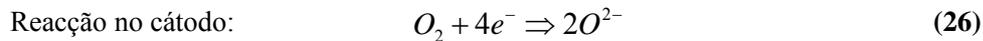
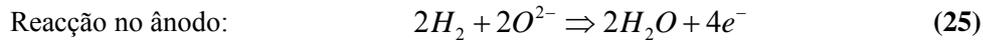


Figura 29 - Célula de combustível de óxido sólido



Este tipo de célula de combustível é dos que apresenta uma maior eficiência, podendo chegar aos 60%. Além disso, as altas temperaturas de funcionamento podem ser usadas para criar vapor de alta pressão que pode ser aproveitado em várias aplicações. Através da combinação de uma célula de combustível de alta temperatura com uma turbina pode-se obter uma célula de combustível híbrida com uma eficiência de mais de 70%.

5.2 Outras células de combustível

5.2.1 Células de combustível de metanol directo

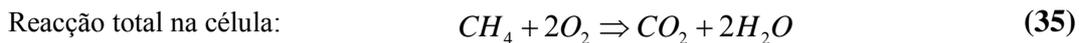
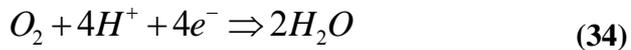
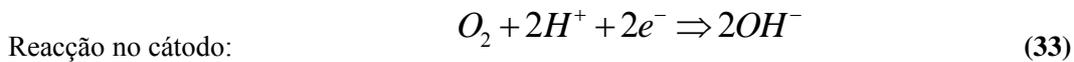
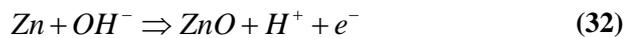
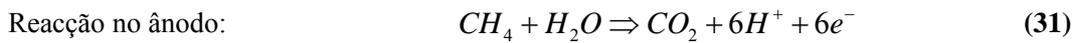
(DMFC – Direct Methanol Fuel Cell)

A tecnologia DMFC é muito semelhante à usada nas células de combustível com membrana de permuta protónica. Neste caso, a célula de combustível faz o uso directo de metanol sem necessidade de reformar o combustível para obtenção de hidrogénio puro. O metanol é convertido em dióxido de carbono e hidrogénio no ânodo. A partir daí a célula segue o padrão de reacção de uma *PEMFC*.

Este tipo de células não apresenta muitos dos problemas de armazenamento típicos de outras tecnologias visto que o metanol tem uma densidade de potência maior que o hidrogénio (embora menor que a gasolina ou o diesel). O metanol é mais fácil de transportar e fornecer ao mercado porque pode usar a infra-estrutura existente visto ser um combustível líquido.

oxigénio atmosférico. Depois deste ter sido convertido para iões hidróxido e água, estes atravessam o electrólito e chegam ao ânodo de zinco; aí chegados, os iões hidróxido reagem com o zinco e formam óxido de zinco, criando-se um potencial eléctrico.

Quando um conjunto de células de zinco-ar são ligadas, o potencial eléctrico combinado que estas oferecem pode ser considerável e assim ser usado como fonte de electricidade.



O electrólito neste tipo de células é um electrólito cerâmico sólido que usa o ião hidróxido como transporte de carga. Para atingir uma eficiência considerável, através do uso de combustíveis baseados em hidrocarbonetos e na alta condutividade do electrólito para o transporte de carga, as células de combustível de zinco-ar funcionam a temperaturas que rondam os 700° C. Estas elevadas temperaturas permitem o *reforming* interno de hidrocarbonetos, eliminando assim a necessidade de um *reforming* externo. Uma vez mais, o calor gerado a altas temperaturas pode ser usado para produzir vapor de alta pressão que pode ter aplicações muito variadas.

O electrólito deste tipo de células de combustível tem algumas vantagens sobre os outros electrólitos: não necessita de água como a membrana de permuta protónica das *PEMFC's* não podendo portanto secar. Elimina assim a necessidade de monitorizar os níveis de humidade no ânodo e no cátodo. Outra vantagem é o facto de ser sólido, o que evita as eventuais fugas nos electrólitos líquidos.

Devido ao facto do ânodo de zinco ser consumido na reacção torna-se necessária a substituição deste componente em certos intervalos de tempo.

5.2.3 Células de combustível regenerativas

(RFC)

As células de combustível regenerativas produzem electricidade e calor e conseguem inverter o processo. Ao ser alimentada com uma corrente eléctrica, uma *RFC* é capaz de fazer electrólise da água e produzir hidrogénio e oxigénio, ou seja, uma célula de combustível regenerativa é um sistema integrado de uma célula de combustível com um equipamento de electrólise possibilitando alguma economia de peso e custo comparativamente a sistemas dedicados.

O nível de eficiência de uma função da *RFC* não é necessariamente menor que num sistema dedicado mas o catalisador no sistema não pode ser otimizado para ambas as funções. Assim, a eficiência não é máxima nos dois processos. As células de combustível regenerativas são habitualmente baseadas na tecnologia *PEMFC*.

A NASA realizou um projecto baseado neste tipo de células de combustível, o projecto Helios.

O Helios era um veículo aéreo impulsionado por 14 motores eléctricos de 1,5 kW alimentados por painéis solares (durante o dia) ou pela célula de combustível (durante a noite). Durante o dia, a RFC realizava electrólise para produzir hidrogénio enquanto que durante a noite o hidrogénio era usado como fonte de energia.



Figura 31 - Helios em Voo

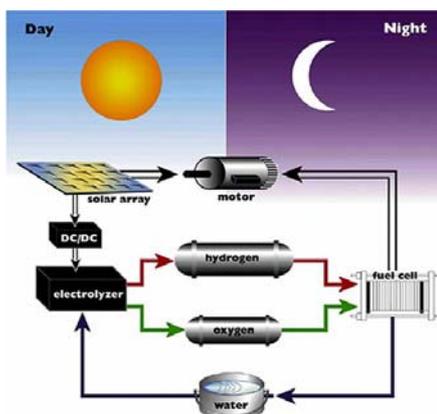


Figura 32 - Diagrama energético do Helios

5.3 O Hidrogénio em motores de combustão interna

Uma outra vertente seguida por alguns fabricantes no que diz respeito ao uso de hidrogénio como vector energético é a solução clássica de combustão interna, mas desta vez, a hidrogénio.

A primeira tentativa de desenvolver um motor a hidrogénio foi reportada por Reverend W. Cecil em 1820 num *paper* intitulado “*On the application of Hydrogen Gas to Produce Moving Power in Machinery*”. Entre 1860 e 1870 Nikolaus August Otto, o inventor do primeiro motor de combustão interna a 4 tempos, reportou o uso de um gás sintético provavelmente constituído por 50% de hidrogénio.

Em geral, fazer com que um motor de combustão interna funcione a hidrogénio não é difícil, o desafio é fazer com que funcione bem. De seguida descrevem-se algumas das propriedades do hidrogénio que fazem a diferença em relação aos combustíveis mais usados nos motores de combustão interna.

- O hidrogénio tem uma elevada amplitude de inflamabilidade comparativamente a todos os outros combustíveis. Como resultado, o hidrogénio pode ser queimado num motor de combustão interna a uma grande variedade de misturas ar-combustível. Este facto permite um funcionamento à base de misturas pobres em combustível originando uma reacção de combustão mais completa e reduzida emissão de poluentes por parte do motor. Há um limite inferior de teor de combustível até porque quanto mais pobre for a mistura, menor é a potência resultante.
- O hidrogénio necessita de baixa energia de ignição. A quantidade de energia necessária à ignição do hidrogénio é cerca de uma ordem de grandeza inferior à necessária para a gasolina. Isso faz com que

os motores a hidrogénio possam ter ignição em misturas pobres e assegura uma ignição correcta. Infelizmente isso também significa que gases quentes ou zonas quentes dentro do cilindro podem servir como fontes de ignição criando problemas de ignição prematura e *flashback*. Este é um dos principais desafios no funcionamento de um motor de combustão a hidrogénio. Além disso, a chama resultante da combustão do hidrogénio passa mais perto das paredes internas do cilindro antes de se extinguir, o que pode também levar a um aumento do risco de *backfire*.

- O hidrogénio tem uma temperatura de auto-ignição relativamente alta. Esta característica é importante na determinação do factor de compressão que um motor pode usar visto que ambas as variáveis estão directamente relacionadas. A temperatura resultante da compressão não pode exceder a temperatura de auto-ignição do hidrogénio, se exceder, tem-se inevitavelmente uma pré-ignição.
- A velocidade da chama que resulta da combustão do hidrogénio é muito alta. Em equilíbrio estequiométrico, a velocidade da chama de hidrogénio é perto de uma ordem de grandeza maior que a da gasolina; em misturas mais pobres essa velocidade decresce significativamente.
- O hidrogénio tem um elevado grau de difusão. Esta capacidade de se dispersar no ar é consideravelmente maior que a da gasolina e isso é uma vantagem: por um lado facilita a formação uniforme de uma mistura de ar-combustível, por outro, em caso de fuga o hidrogénio dispersa-se rapidamente.
- O hidrogénio é um gás de muito baixa densidade. Esta característica resulta em dois problemas no uso num motor de combustão interna: em primeiro lugar é preciso um grande volume de hidrogénio para garantir uma autonomia minimamente razoável no veículo, em segundo lugar, a baixa densidade do hidrogénio resulta numa baixa densidade energética da mistura ar-combustível, o que faz com que a potência resultante seja reduzida.

Contrariamente à solução das células de combustível, a combustão interna de hidrogénio pode resultar na emissão de alguns poluentes, nomeadamente óxidos de azoto (NO_x). Outros poluentes produzidos em pequena escala podem resultar da queima de alguns resíduos de óleo do motor e não do hidrogénio em si.

Em teoria, a combustão de hidrogénio com o ar não devia resultar em mais do que água:



Na prática, como o ar não contém só oxigénio, fica:



Ainda assim, os NO_x são os únicos poluentes resultantes da combustão do hidrogénio com o ar. Convém lembrar que quando a gasolina é queimada resultam uma variedade de poluentes, destacando-se o NO_x , o monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC).

Seja Φ a relação entre a mistura ar/combustível em equilíbrio estequiométrico e a mistura ar/combustível real. Nas figuras que se seguem pretendem-se comparar as emissões em função de Φ de um motor de combustão interna a hidrogénio com um motor a gasolina.

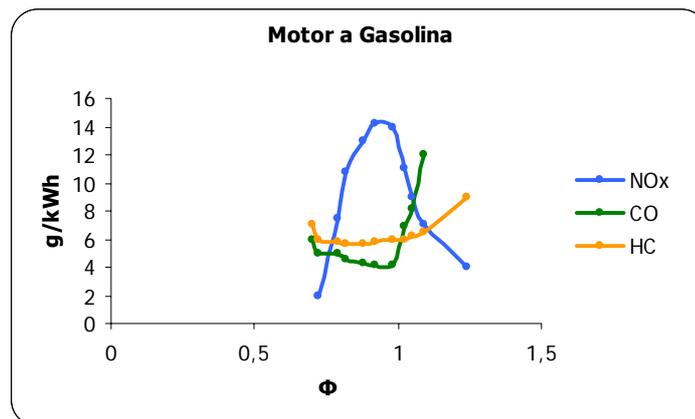


Figura 33 - Emissões no motor a gasolina

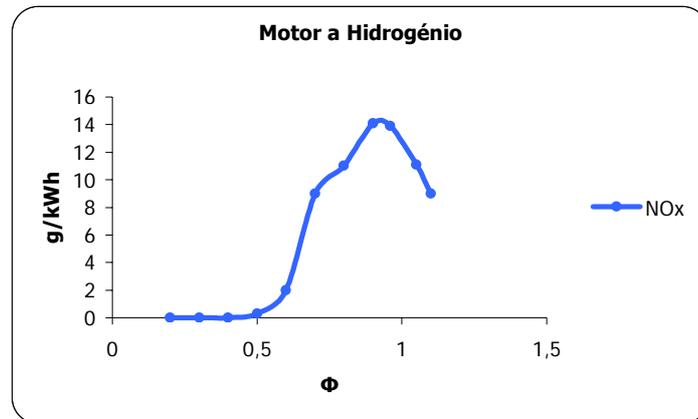


Figura 34 - Emissões no motor a hidrogénio

Com vista a conseguir uma emissão reduzida de poluentes, os motores de combustão interna a hidrogénio são concebidos para funcionar a uma mistura ar/combustível que contém sensivelmente o dobro do ar comparativamente à mistura em equilíbrio estequiométrico. Nestas proporções, as emissões de NOx são próximas de zero mas a potência resultante é cerca de metade de um motor a gasolina com a mesma capacidade. Para compensar a perda de potência os motores a hidrogénio são geralmente de maior capacidade e são equipados com turbo.

6 O futuro do H₂: soluções para mobilidade sustentável

Como já foi referido anteriormente, as células de combustível representam uma das tecnologias mais promissoras no que diz respeito a mobilidade sustentável no futuro. Por terem esta ideia bem presente, vários fabricantes na indústria automóvel avançam já com protótipos de veículos baseados em células de combustível a hidrogénio.

6.1 Soluções baseadas nas células de combustível

❖ **General Motors, GM**

A GM [26], uma das maiores empresas no ramo automóvel, criou soluções baseadas em células de combustível a hidrogénio em vários veículos protótipo bem como em veículos adaptados de modelos já bem conhecidos do público.

O *Hydrogen1* foi introduzido em meados do ano 2000, é baseado no Opel Zafira e usa uma célula de combustível a hidrogénio para fornecer electricidade a uma bateria que alimenta o motor eléctrico do veículo [25].



Figura 35 - *Hydrogen1*

O *Hydrogen1* usa um bloco de 200 células de combustível ligadas em série capazes de gerar cerca de 80 kW de potência constante. Motorizado pelo motor eléctrico trifásico de 55kW/75cv, o *Hydrogen1* consegue acelerações dos 0 aos 100km/h em 16 segundos e uma velocidade máxima de 140 km/h. Com um depósito de 75 l de hidrogénio líquido, este veículo atinge uma autonomia de 400 km.

Ao longo da evolução deste tipo de tecnologias surge por parte da GM o *Hydrogen3*, que é basicamente uma evolução do *Hydrogen1*. Este novo modelo incorpora o mesmo número de células que o anterior mas desta vez com um rendimento de 94 kW o que, com o novo motor eléctrico de 60kW/80cv, possibilitou o aumento da velocidade máxima para os 160 km/h.

O *Hydrogen3* foi sujeito a uma prova de endurance iniciada a 3 de Maio de 2004 em Hamburgo, na Alemanha. A “maratona” terminou a 9 de Junho de 2004 em Portugal no Cabo da Roca onde o veículo completou 9696 Km depois de ter atravessado a Europa.



Figura 36 - *Hydrogen3*

No âmbito de protótipos, a GM começa por propor o *AUTO*nom^y como a primeira de uma das propostas mais arrojadas em termos de inovação automóvel baseada em células de combustível de hidrogénio. Este protótipo é o primeiro a combinar a tecnologia *by-wire* com células de combustível, permitindo para além de outros o controlo exclusivamente electrónico da direcção, aceleração, travagem.



Figura 37 - *AUTO*nom^y



Figura 38 - *Hy-wire*

A evolução do *AUTO*nom^y nesta linha de protótipos dá pelo nome de *Hy-wire*. O *Hy-wire* pretende incorporar as características do conceito *AUTO*nom^y. Todos os sistemas de propulsão e controlo estão contidos num chassis de 30 cm de espessura, maximizando assim o espaço interior para 5 ocupantes e respectiva bagagem.

O número de células de combustível, o seu rendimento e a potência do motor eléctrico são idênticos aos do *Hydrogen3*.



Figura 39 - Base do *Hy-wire*

A última inovação em protótipos nesta linha por parte deste fabricante é o *GM Sequel*, anunciado a 10 de Janeiro de 2005 no site oficial.



Figura 40 - GM Sequel

Neste modelo a GM conseguiu o armazenamento de hidrogénio a uma pressão de 10 000 psi e com isso um aumento da autonomia para os 480 km. Além disso a nova geração de células de combustível fazem com que este modelo seja capaz de uma aceleração dos 0 aos 100 km/h em menos de 10 segundos.

❖ **Ford Motor Company** ^{[21], [22]}

A Ford também tem desempenhado um papel relevante no que diz respeito à investigação do uso de células de combustível a hidrogénio na indústria automóvel. Em Janeiro de 1999, no *Detroit Auto Show*, a Ford apresentou o *P2000*, um veículo baseado no Ford Mondeo alimentado a células de combustível.

Este modelo foi provavelmente o primeiro automóvel comum de passageiros com cinco lugares a funcionar a células de combustível. Usa 381 células de combustível de membrana de permuta protónica que no total são capazes de produzir cerca de 75 kW. Este automóvel é capaz de uma aceleração dos 0 aos 100 km/h em 12,3 segundos e atinge uma velocidade máxima de 128 km/h. Exibe uma autonomia de 160 km através do uso de hidrogénio em gás comprimido.



Figura 41 - Ford P2000 FCEV

Depois do lançamento do *P2000*, a Ford surge no ano 2000 com o Ford Focus *FCV*.



Figura 42 - Ford Focus FCV

Este modelo apresenta características muito semelhantes ao P2000 tendo sofrido as modificações na forma como estão colocados os componentes da célula de combustível a hidrogénio.

A Ford surge na terceira geração de automóveis movidos a célula de combustível com o Ford Focus FCV Híbrido.

Através do armazenamento de hidrogénio gasoso a cerca de 5000 psi a autonomia deste modelo pode chegar aos 320 km. O Focus FCV Híbrido distingue-se dos anteriores pelo uso, em conjunto com a célula de combustível, de baterias Ni-MH por forma a melhorar a eficiência e a *performance*. Além disso, incorpora também -como já vem sendo hábito nos híbridos - um sistema de travões regenerativo que torna possível a recuperação, sob a forma de electricidade, de alguma da energia libertada nas travagens.



Figura 43 - Ford Focus FCV Híbrido

❖ **Daimler-Chrysler**^[27]

A *DaimlerChrysler* é outro dos fabricantes a contribuir positivamente para o desenvolvimento e testes de veículos baseados em células de combustível. Em 18 de Junho de 2004 o fabricante entregou a clientes alemães em Berlim os primeiros automóveis de passageiros movidos a células de combustível. Os modelos são uma adaptação do Mercedes-Benz Classe-A, tendo sido intitulados “*F-Cell*”.



Figura 44 - Mercedes-Benz Classe-A “F-Cell”

Outros projectos da *DaimlerChrysler* incluem autocarros postos a circular em Maio de 2003 na cidade de Madrid. O *Mercedes-Benz Citaro* foi o primeiro autocarro a célula de combustível a ser posto a funcionar como transporte de serviço regular.



Figura 46 - Mercedes-Benz Citaro



Figura 46 - Mercedes-Benz Sprinter

Este construtor participa ainda na área das operações de entregas diárias num projecto de dois anos onde são usados *Mercedes-Benz Sprinter* movidos a células de combustível.

❖ **Honda**

O construtor japonês Honda é outro dos exemplos que mostram a viabilidade do uso do hidrogénio como resposta às necessidades de mobilidade sustentável. Prova disto é o utilitário Honda *FCX*, o primeiro automóvel certificado para uso quotidiano.



O FCX tem uma potência de 80 cv e atinge uma velocidade máxima de 150 km/h. O depósito de hidrogénio a 5000 psi permite uma autonomia de 350 km.

Figura 47 - Honda FCX

❖ **Ballard Power Systems**

A *Ballard Power Systems* não se insere directamente na indústria automóvel mas é neste momento líder mundial em células de combustível. A grande maioria dos fabricantes de automóveis que já têm soluções baseadas em células de combustível de hidrogénio incorporam produtos da Ballard.

O modelo *Mark 902* é uma célula de combustível de permuta protónica de quarta geração. É desenhada para aplicações de transportes baixa envergadura e tem a capacidade de fornecer 85 kW de potência continuamente.



Figura 48 - Ballard Mark 902

6.2 Soluções baseadas na combustão interna de Hidrogénio

A aplicação da filosofia dos motores de combustão interna a hidrogénio está a ser seguida por alguns fabricantes da indústria automóvel.

A visão da BMW [28], por exemplo, aposta numa solução mista de hidrogénio e gasolina enquanto a disponibilidade de abastecimento de hidrogénio é reduzida.

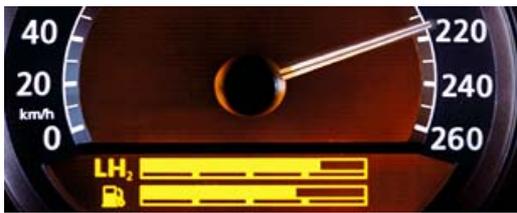


Figura 49 - Indicadores de hidrogénio e gasolina

O *BMW 750hLs* mostrou durante a *BMW Clean Energy World Tour* ser capaz de percorrer cerca de 170 000 kms sem problemas.



Figura 50 - *BMW 750hLs*

A *Ford Motor Company* também tem soluções baseadas na combustão do hidrogénio. Um bom exemplo disso é o *Ford Model U Concept* com um motor otimizado para hidrogénio, 25% mais eficiente comparativamente à versão a gasolina.



Figura 51 - Motor a hidrogénio do *Ford Model U* [23]

7 Projectos e iniciativas

7.1 Relatório “*Well-to-Wheel*”

Os resultados do estudo efectuado pela GM foram conhecidos em Março de 2004 [30]. O objectivo foi estudar a eficiência dos combustíveis e as respectivas emissões, baseando-se numa primeira fase na produção, transporte e distribuição, seguindo-se a comparação entre os vários combustíveis. A análise conjunta destes dois parâmetros anteriores possibilitará integrar o hidrogénio como combustível nos transportes.

Esse estudo permitiu concluir que o consumo de energia e as emissões dos gases de efeito de estufa devem ser reavaliados tendo em vista o futuro das células de combustível, uma vez que os veículos híbridos não menos poluentes. O hidrogénio é o combustível que pode provir de muitas fontes, destacando-se a biomassa. Assim sendo, as fontes de energia renovável serão um suporte para o seu desenvolvimento. O petróleo e o gás natural são os combustíveis que permitem uma menor perda de energia total, sendo o hidrogénio líquido o que apresenta um elevado custo de produção devido à sua liquefacção.

Os veículos que utilizam o hidrogénio líquido proveniente do gás natural para combustão interna (ICE) não produzem qualquer tipo de emissões poluentes, mas a sua produção a partir de combustíveis fósseis já é uma fonte de gases poluentes. Por outro lado, os veículos a gasolina e a diesel emitem elevadas quantidades de CO₂ provenientes da combustão do combustível, no entanto a produção desses mesmos combustíveis emite uma pequena quantidade de gases poluentes. A solução para o problema da produção “*limpa*” de hidrogénio passa pela electricidade renovável.

7.2 O projecto “*Hydrogen Highway*”

Nos EUA, no estado da Califórnia, está a ser implementado um programa denominado “*Hydrogen Highway*” [31], auto-estrada do hidrogénio. Nas palavras do governador, o objectivo deste projecto é suportar e catalisar uma rápida transição para uma economia de transportes baseada no hidrogénio, na Califórnia, reduzindo a dependência do petróleo estrangeiro e protegendo os cidadãos de ameaças para a saúde pública resultante das emissões dos veículos. Esta aposta surge como uma oportunidade para lidar com estes problemas investindo na capacidade de inovação da Califórnia para um futuro limpo baseado no hidrogénio, trazendo emprego,

investimento e continuidade da prosperidade económica. O governador pensa com isto ter a oportunidade de provar ao mundo que é possível uma coexistência entre ambiente e economia prósperos.



Figura 52 – A inauguração de uma estação de abastecimento no “*Hydrogen Highway*”

7.3 O Projecto *CUTE - Clean Urban Transport for Europe* [8], [9]

Desde Novembro de 2001 que o projecto *CUTE* visa diminuir as emissões de poluentes para a atmosfera baseando-se em células de combustível, utilizando o hidrogénio como impulsor desta tecnologia. O seu desenvolvimento permite uma utilização mais racional da energia, diminuindo a sua dependência em relação aos combustíveis fósseis e simultaneamente promove uma nova fonte de energia renovável; a qualidade de vida em áreas densamente povoadas e a protecção ambiental foram melhoradas. O desenvolvimento sustentável nos transportes passa pela utilização do hidrogénio como combustível não poluente, respeitando as normas do Protocolo de Quioto. Desde o início deste projecto não se verificaram qualquer tipo de emissões poluentes, nem mesmo na fase de produção.

Na Europa mais de 18,5 milhões de euros foram investidos na criação de uma infra-estrutura de hidrogénio com o objectivo de testar vários sistemas de produção, distribuição e estações de enchimento de hidrogénio, bem como os próprios autocarros equipados com a tecnologia das células de combustível. Dez cidades europeias foram escolhidas para participarem neste projecto, existindo em cada uma delas 3 autocarros movidos a hidrogénio. Foi em Maio de 2003 que o primeiro veículo a hidrogénio começou a circular na cidade de Madrid e até ao final desse mesmo ano os restantes 26 veículos foram postos a circular nas diversas cidades

européias. Em Amesterdão, Estocolmo, Barcelona e Hamburgo, a electrólise é a via utilizada para a produção de hidrogénio, recorrendo à energia eólica, solar ou hidroeléctrica para a produção de electricidade. Madrid e Estugarda recorrem ao *steam reforming* como fonte de hidrogénio.

Este projecto piloto envolve mais de 40 organizações em toda a Europa, entre elas destacam-se utilizadores, políticos, fornecedores, empresas de transporte e universidades. Pretende contribuir para que em 2020 o sector dos transportes utilize cerca de 20% de energias alternativas, em particular as células de combustível, de modo a manter a sustentabilidade do planeta.



Figura 53 – Autocarro movido a hidrogénio na cidade do Porto

7.4 O Hidrogénio em Portugal

Portugal tem aderido aos projectos que visam promover o hidrogénio, especialmente no sector dos transportes. O Porto foi a cidade portuguesa escolhida para participar no projecto CUTE e a ilha Terceira (Açores) foi a seleccionada para a construção da primeira central de produção de hidrogénio.

7.4.1 Porto

Com 1 200 000 habitantes, o Porto é a segunda maior cidade portuguesa. Ocupa uma área metropolitana de 817 km² que envolve 9 municípios sujeitos a vários tipos de atmosferas, daí ser uma cidade ideal para implementar o projecto CUTE. A Sociedade de Transportes Colectivos do Porto, SA (STCP) é a empresa responsável pelos transportes urbanos da cidade desde 1872; possui 125 autocarros que utilizam o gás natural

como combustível e 506 que circulam a diesel, sendo o consumo anual de energia de 14 milhões de litros em combustível [9].

A STCP é responsável pela análise do balanço energético. Os três autocarros em circulação foram fornecidos pela Daimler Chrysler enquanto que a BP se responsabiliza pelo abastecimento do hidrogénio. Apesar de situada em Alenquer, a multinacional *Linde* responsabiliza-se pela produção, liquefacção, purificação, armazenamento, distribuição e fornecimento de hidrogénio às estações de abastecimento



Figura 54 – Parceria BP e STCP, Porto

A instalação BP-CUTE serve de posto de

abastecimento aos 3 veículos que circulam na cidade e que têm as células de combustível como fonte de energia. O CGH₂ requerido ao transporte é fornecido por camião e armazenado a baixa pressão em depósitos com capacidade de 174 kg.

A estação de compressão foi projectada para armazenar o GH₂ a alta pressão, nas quantidades necessárias aos 3 autocarros em circulação. Em média o tempo de enchimento de depósito é de 10 min possibilitando uma autonomia de 200 km. A velocidade máxima é de 80 km/h e o tempo entre as paragens dos autocarros que circulam na cidade nortenha é de 20 minutos. As rotas dos autocarros abrangem toda a cidade e possibilitam uma elevada rotação de passageiros, sendo 70 o número limite.

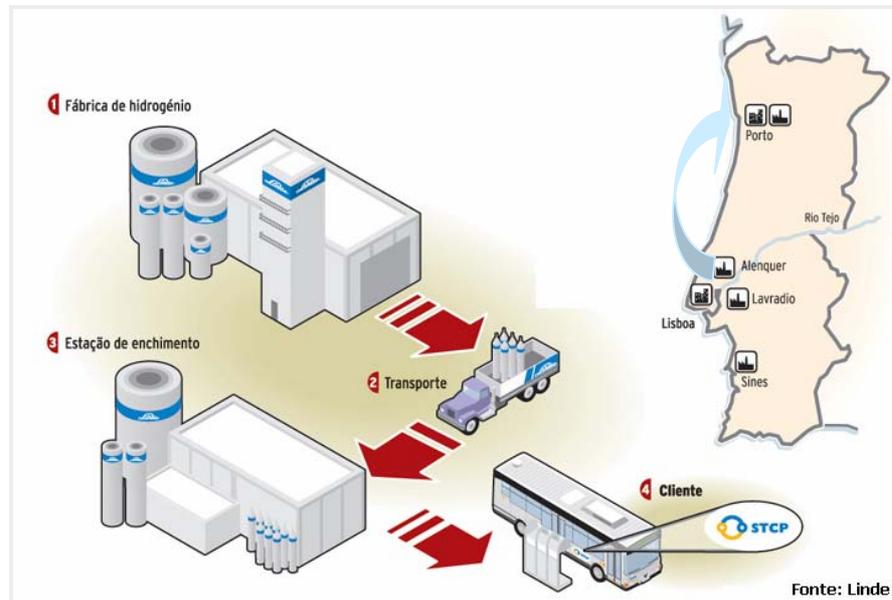


Figura 55 - Estrutura do fornecimento de Hidrogénio na cidade do Porto

7.4.2 Ilha Terceira, Açores ^[2]

A primeira central portuguesa de produção de hidrogénio está e ser construída na Serra do Cume, ilha Terceira, recorrendo à força do vento para produzir o combustível do futuro, o hidrogénio renovável (H₂RE). O projecto desenvolvido pelo Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia da Universidade dos Açores, em parceria com a Câmara Municipal da Praia da Vitória e com o Instituto Superior Técnico (IST) produzirá energia eléctrica no início do ano 2006 e tem por objectivo “trazer o hidrogénio para o quotidiano das pessoas”, não só como combustível dos autocarros como também em automóveis e aparelhos domésticos. O objectivo principal é mesmo criar caldeiras, fogões e electricidade à custa de um combustível produzido a partir de energias renováveis, como a eólica, por exemplo.

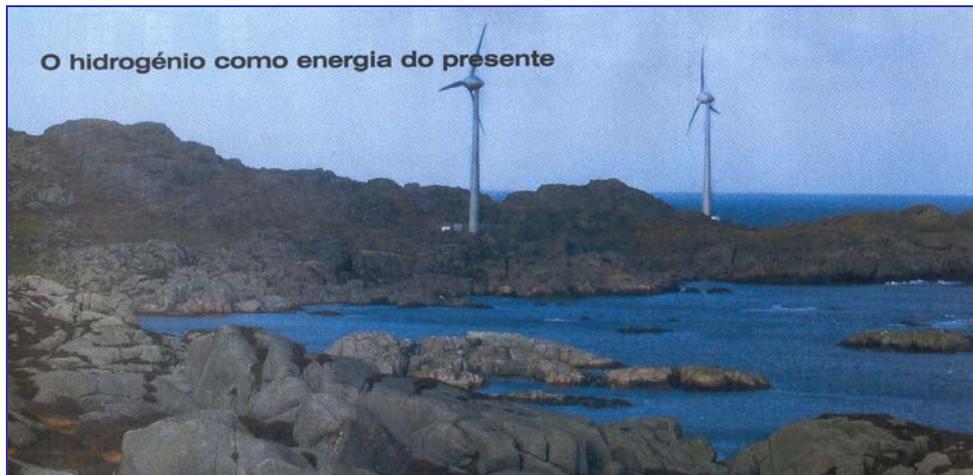


Figura 56 – Central de produção da Serra do Cume, ilha Terceira, Açores^[2]

Os custos de produção desta central-piloto englobam a produção, armazenamento e distribuição do H₂RE, assim como os demonstradores: veículos de carga, familiares e colectivos, aparelhos domésticos de baixa potência (caldeiras de aquecimento, fogões) e produção de electricidade para a rede pública em horário de ponta.

Por cada kg de hidrogénio que se consome reduz-se 3 vezes o consumo de gasolina a importar. Portugal passará para uma posição de auto-sustentação se continuar a apostar no hidrogénio como fonte de energia, deixando de estar energeticamente dependente das fontes externas. Actualmente essa dependência é de 90%.

8 Conclusão

Uma política coerente voltada para um sistema de integração nos transportes, energia e ambiente são fundamentais no desenvolvimento de uma sociedade com mobilidade sustentável, ou seja, a elaboração de um plano estratégico onde se invista um maior orçamento na investigação e desenvolvimento é indispensável.

A degradação ambiental do planeta tem suscitado alguma discussão nos países industrializados acerca da produção e uso de energia. Os fornecedores de tecnologia, infra-estruturas e empresas de transportes têm evoluído ano após ano, corrigindo as deficiências que vão surgindo. Cada vez se aposta mais na produção sustentada de combustíveis renováveis, em especial o Hidrogénio renovável (H₂RE). Todas as iniciativas de promoção do hidrogénio como fonte de energia renovável têm resultados satisfatórios.

Em termos de emissões de gases de efeito de estufa, está provado que a forma de serem reduzidas passa pela utilização de veículos movidos a pilhas de combustível, desde que o hidrogénio seja produzido a partir de uma fonte renovável de energia, sendo a energia eólica a preferida.

As empresas e as companhias empreendedoras são as responsáveis por tornarem a tecnologia do hidrogénio uma realidade concreta, deixando de lado a utopia que foi criada em redor deste combustível renovável. O objectivo da Europa para 2010 é produzir 22% da sua electricidade e 12 % da energia total a partir de recursos renováveis, daí o hidrogénio assumir um papel importante para o alcance desta meta. E as metas nacionais já estão definidas: dentro de cinco anos, 2% das necessidades energéticas dos Açores deverão ser asseguradas através de hidrogénio renovável; passando para 30 a 40%, nos próximos 15 anos e atingindo 100% das necessidades, no prazo de trinta anos. E as decisões têm que ser tomadas no presente porque trinta anos é já amanhã!

O hidrogénio não pode ser visto com os mesmos olhos que um combustível fóssil. Apostar no hidrogénio é uma atitude consciente e nada tem a ver com gastar uma reserva de combustível que foi deixado à humanidade de uma forma totalmente gratuita. Num futuro próximo talvez não tenhamos veículos movidos a hidrogénio com uma potência tão generosa ou com uma autonomia tão alargada, mas estaremos com certeza a construir um futuro mais promissor por não se basear num gasto inconsciente de uma poupança herdada do planeta. O hidrogénio é um elo de ligação entre o desenvolvimento sustentável e a mobilidade por servir de vector energético que abre caminho à aplicação da energia obtida a partir de fontes renováveis e ao combate à poluição.

Bibliografia

[1]

Hydrogen technologies, Special Edition – Fuel Cell Marathon 2004, Linde

[2]

Mercado Eléctrico, Energias Renováveis, Dezembro/Janeiro 2005, pag 58-60

[3]

Apresentação dos Seminário de Desenvolvimento Sustentável, prof. Tiago Farias, 28 de Outubro de 2004

[4]

Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, College of the Desert, Energy Technology Training Center, 2001

[5]

<http://verwertung.dm1-2.de/page/main.php?Lang=English&Menu=2&SubMenu=0&SubMenu2=0>

[6]

[http://www.linde.pt/international/web/lg/pt/like/gpt.nsf/repositorybyalias/cseg_hidrogenio/\\$file/No.13.Manuseamento%20Hidrog%E9nio.pdf](http://www.linde.pt/international/web/lg/pt/like/gpt.nsf/repositorybyalias/cseg_hidrogenio/$file/No.13.Manuseamento%20Hidrog%E9nio.pdf) (Novembro 2004)

[7]

[http://www.linde.pt/International/Web/LG/PT/Like/LGPT.nsf/RepositoryByAlias/MSDS_48/\\$FILE/MSDS_48.pdf](http://www.linde.pt/International/Web/LG/PT/Like/LGPT.nsf/RepositoryByAlias/MSDS_48/$FILE/MSDS_48.pdf)
(Novembro 2004)

[8]

http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/CUTE_Technology_Brochure.pdf
(Novembro 2004)

[9]

http://www.fuel-cell-bus-club.com/modules/UpDownload/store_folder/Publications/brochure1.pdf (Novembro 2004)

[10]

<http://www.hydrogen.org/Knowledge/Ecn-h2a.html> (Dezembro 2004)

[11]

http://www.fastaccess.pt/cgi/cgi-bin/fa_manutencao_glossario.asp?letra=H (Dezembro 2004)

[12]

<http://www.hydrogen.org/Wissen/pdf/ireland2002.pdf> (Dezembro 2004)

[13]

<http://www.de.iol.pt/edicion/noticia/0%2C2458%2C514576%2C00.html> (Dezembro 2004)

[14]

<http://www.scirus.com> (Dezembro 2004)

[15]

<http://www.scirus.com> (Dezembro 2004)

[16]

http://www.tuev-sued.de/industrial_services/energy_and_technology/images/kapitel%203.pdf (Dezembro 2004)

[17]

http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/annual_report04_delivery.html#prod (Dezembro 2004)

[18]

http://www.nmsea.org/Curriculum/7_12/electrolysis/electrolysis.htm (Dezembro 2004)

[19]

http://www.tuev-sued.de/industrial_services/energy_and_technology/images/kapitel%202.pdf#search='the%20plasma%20arc%20partial%20oxidation%20joachim (Dezembro 2005)

[20]

<http://www.powerzinc.com/en/index-3-x1.html> (Dezembro 2005)

[21]

<http://www.ford.com/en/vehicles/specialtyVehicles/environmental/fuelCell/fordP2000.htm> (Dezembro 2005)

[22]

<http://www.ford.com/en/innovation/engineFuelTechnology/hydrogenInternalCombustion.htm> (Dezembro 2005)

[23]

<http://www.ford.com/en/innovation/engineFuelTechnology/hydrogenInternalCombustion.htm> (Dezembro 2005)

[24]

<http://www.fuelcelltoday.com> (Dezembro 2005)

[25]

http://www.gmeurope.com/marathon/2/221_hydrogen1.htm (Janeiro 2005)

[26]

http://www.gm.com/company/gmability/adv_tech/600_tt/650_future/hydrogen_milestone_021003.html (Janeiro 2005)

[27]

http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0_0-5-7165-1-199810-1-0-0-0-0-1371-7165-0-0-0-0-0-00.html
(Janeiro 2005)

[28]

<http://www.bmw.com/generic/com/en/fascination/technology/cleanenergy/index.html> (Janeiro 2005)

[29]

http://www.rmi.org/images/other/Energy/E03-05_20HydrogenMyths.pdf (Dezembro 2004)

[30]

http://www.lbst.de/gm-wtw/WHEC15_GM-WtW_Reinhold-Wurster_28JUN2004.pdf#search='well%20to%20well%20study%20gm (Janeiro 2005)

[31]

<http://hydrogenhighway.ca.gov> (Janeiro 2005)

Outros sites consultados:

http://www.nfrcr.uci.edu/fcresources/FCexplained/FC_Types.htm

<http://www.dodfuelcell.com/fcdescriptions.html>

<http://fuelcells.si.edu/basics.htm>

<http://fuelcells.si.edu/mc/mcfcmain.htm>

<http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/tipos.html>

<http://embedded.deec.uc.pt/EU-savefuelcell/presentations/indexprescombustel.html>

http://www.fctec.com/fctec_types.asp

<http://www.celulaacombustivel.com.br/cac/princtec/dmfc.htm>

<http://www.ajou.ac.kr/~mems/proj-4-MDMFC.htm>

http://www.bellona.no/en/energy/hydrogen/report_6-2002/22987.html

<http://www.autointell.net/Events/naias-2005/gm-sequel-naias-05/gm-sequel-naias-05.htm>

<http://www.h2cars.de/overview/cardata/18.html>

<http://www.h2cars.de/index.html>

<http://www.fuelcells.org/info/charts/vehiclestudy.pdf>

<http://www.h2cars.biz/artman/publish/index.shtml>

<http://www.eere.energy.gov/>

<http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/NewsDisplayArticle/0.1602.5419.00.html>

<http://www.fuelcells.org/>

<http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7165-1-199222-1-0-0-0-0-1371-7165-0-0-0-0-0-0,00.html>

Contactos:

ana_r_marques@yahoo.co.uk

boaldeia@gmail.com

ptsm@rnl.ist.utl.pt