

Embora seja o elemento mais abundante no Universo, na Terra o hidrogénio não existe no seu estado puro, podendo ser gerado através de uma grande diversidade de processos e de fontes de energia. Na Terra o hidrogénio não é pois uma fonte de energia, sendo apenas um portador de energia com um elevado potencial de aplicação. O hidrogénio pode ser convertido directamente em electricidade através de células de combustível, com elevado rendimento e reduzido impacto ambiental. O hidrogénio poderá ser um dos combustíveis do futuro, nomeadamente no sector dos transportes e na produção descentralizada de electricidade, capaz de solucionar os grandes problemas associados aos combustíveis fósseis, tais como os impactos ambientais nefastos e a segurança do abastecimento. Espera-se que nas próximas décadas ocorram desenvolvimentos tecnológicos significativos para que a produção, armazenamento, transporte, distribuição e conversão do hidrogénio possam ser efectuados de forma competitiva, face às alternativas clássicas.

ANÍBAL TRAÇA DE ALMEIDA

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 3030 Coimbra

adealmeida@isr.uc.pt

PEDRO SOARES MOURA

Instituto de Sistemas e Robótica - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 3030 Coimbra

pmoura@isr.uc.pt

HIDROGÉNIO E DE COMBUSTÍV

As principais fontes de hidrogénio são a água ou alguns hidrocarbonetos, tais como os combustíveis fósseis (em particular o gás natural). Para quebrar esta cadeia de hidrocarbonetos ou separar o hidrogénio do oxigénio (na água) é necessário despende energia. Idealmente, toda a energia fornecida deveria ser armazenada no hidrogénio. Mas, em qualquer transformação de energia, ocorrem perdas, que dependem do processo utilizado para a obtenção do hidrogénio no seu estado elementar.

Actualmente, quase todo o hidrogénio a nível mundial é obtido a partir de combustíveis fósseis. Cerca de 48% da produção total é feita a partir de gás natural (Fig. 1), 30% a partir de petróleo, 18% a partir de carvão e apenas cerca de 4% é obtido com electricidade recorrendo à electrólise. Na produção a partir de combustíveis fósseis além de hidrogénio forma-se dióxido de carbono, pelo que, de forma a evitar a sua libertação para a atmosfera, este deve ser sequestrado (processo actualmente em desenvolvimento).

Os processos de produção de hidrogénio incluem:

- Separação com vapor de gás natural (processo de produção de hidrogénio actualmente dominante);
- Oxidação parcial de gás natural (menos eficiente que o processo anterior);
- Gasificação de carvão;

E CÉLULAS

VEL

- Gasificação de biomassa;
- Electrólise com electricidade obtida em:
 - centrais térmicas (carvão, fuel, gás natural, nuclear, etc.);
 - energias renováveis (eólica, energia solar fotovoltaica, energia solar térmica, ondas, etc.);
- Ciclos termoquímicos de alta temperatura:
 - solar térmica;
 - nuclear;
- Produção biológica.

ELECTRÓLISE

Recorrendo à electrólise é possível obter hidrogénio com elevado grau de pureza. No entanto, o custo de obtenção

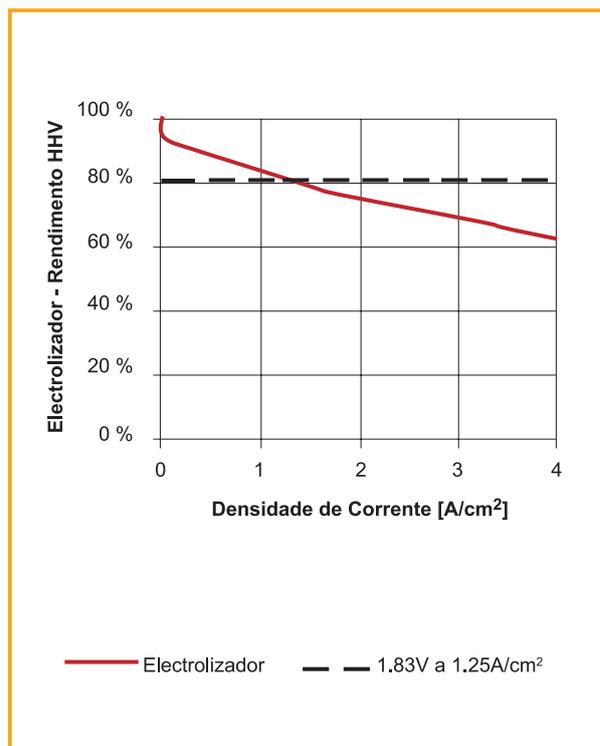


Fig. 2 - Rendimento na produção de hidrogénio (HHV-Higher Heating Value / Poder Calorífico Superior do H_2) por electrólise, em função da densidade de corrente [1].

de hidrogénio a partir da electrólise é bastante elevado, quando comparado com a obtenção de hidrogénio a partir de combustíveis fósseis. Este processo é relativamente eficiente, mas as perdas de energia crescem acentuadamente quando a densidade de corrente é elevada (Fig. 2).

Para armazenar a energia eléctrica obtida a partir de fontes renováveis intermitentes, como a energia solar ou a energia eólica, pode produzir-se hidrogénio através de electroli-zadores. Este hidrogénio pode ser armazenado e utilizado posteriormente para produzir electricidade, recorrendo a uma célula de combustível, quer em aplicações estacionárias (por exemplo, em edifícios), quer nos transportes.

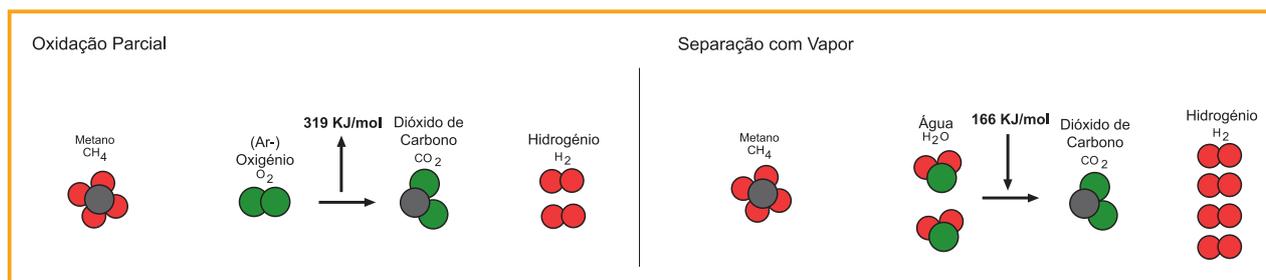


Fig. 1 - Processos de produção de hidrogénio com gás natural.

VALOR ENERGÉTICO DO HIDROGÉNIO

O hidrogénio possui um elevado valor energético por unidade de massa. No entanto, o hidrogénio, em condições de pressão e temperatura normais, encontra-se no estado gasoso. Uma vez que o hidrogénio tem massa bastante reduzida, o seu valor energético por unidade de volume é também bastante reduzido (Tabela 1), pelo que é necessário armazená-lo a elevadas pressões (ou mantê-lo sob a forma líquida), para que seja possível armazenar uma quantidade significativa de hidrogénio por unidade de volume.

COMPRESSÃO DE HIDROGÉNIO

A compressão de um gás requer energia, que depende do processo termodinâmico utilizado. A Fig. 3 mostra que a energia necessária para o processo adiabático é claramente superior à do processo isotérmico. No processo de compressão de hidrogénio a energia necessária é também muito superior à energia necessária para a compressão de metano, o qual requer cerca de 20% da energia do hidrogénio para ser comprimido até 800 bar.

LIQUEFAÇÃO DE HIDROGÉNIO

Ainda mais energia é necessária para compactar o hidrogénio por liquefacção, que consome 35 a 60 MJ/kg, ou seja, a 30 a 50% da energia total contida no hidrogénio (Fig. 4).

Portador de energia	Forma de armazenamento	Densidade de energia por massa [kWh/kg]	Densidade de energia por volume [kWh/l]
Hidrogénio	Gás (200 atm)	33,3	0,53
	Gás (300 atm)	33,3	0,75
	Gás (800 atm)	33,3	2,92
	Líquido (-253 °C)	33,3	2,36
	Hidretos metálicos	0,58	3,18
Gás natural	Gás (200 atm)	13,9	2,58
	Gás (300 atm)	13,9	3,38
	Líquido (-162 °C)	13,9	5,8
GPL	Líquido	12,9	7,5
Metanol	Líquido	5,6	4,42
Gasolina	Líquido	12,7	8,76
Electricidade	Bateria ácido-chumbo	0,05	0,1
	Bateria iões de lítio	0,25	0,05

Tabela 1 - Densidade de energia do hidrogénio versus a de outros portadores de energia.

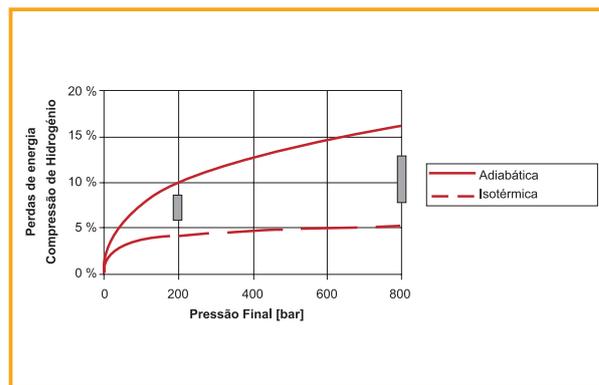


Fig. 3 - Perdas de energia na compressão de hidrogénio [1].

TRANSPORTE DE HIDROGÉNIO

A economia de hidrogénio envolve também o transporte de hidrogénio por camiões, comboios, navios ou condutas. Enquanto na maioria dos casos o transporte de combustíveis é limitado pelo peso, no caso do hidrogénio líquido é limitado pelo volume. Um camião de 40 toneladas pode transportar apenas cerca de 500 kg de hidrogénio comprimido ou 3500 kg de hidrogénio líquido, o que leva a um grande dispêndio de energia no seu transporte.

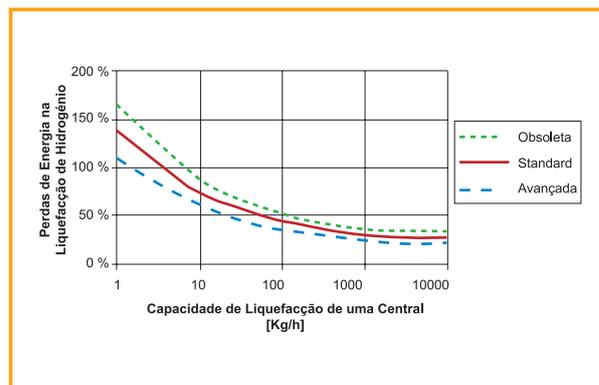


Fig. 4 - Perdas de energia na liquefacção de hidrogénio [1].

Outra forma de transporte é possível recorrendo a condutas. Para uma conduta de 2000 km as perdas representam cerca de 20% do valor energético do hidrogénio transportado, enquanto no caso do metano essas perdas são cerca de metade.

CÉLULAS DE COBUSTÍVEL

As células de combustível são dispositivos electroquímicos que convertem directamente, sem combustão, a energia química contida num combustível rico em hidrogénio em electricidade e energia térmica, tendo-se afirmado como uma das tecnologias de produção de energia eléctrica mais promissoras.

A Fig. 5 apresenta os componentes básicos de uma célula de combustível, os quais incluem um eléctrodo positivo (ânodo), um eléctrodo negativo (cátodo) e um electrólito. O hidrogénio é fornecido ao ânodo, enquanto o oxigénio é fornecido ao cátodo. O combustível é oxidado electroquimicamente na superfície do ânodo, onde o catalisador promove a separação dos electrões dos átomos de hidrogénio, criando iões positivos. O electrólito permite a passagem dos iões do ânodo para o cátodo, mas bloqueia a passagem dos electrões, os quais são forçados a seguirem pelo circuito eléctrico exterior à célula. Os iões de hidrogénio, quando chegam ao cátodo, combinam-se simultaneamente com os electrões que retornam do circuito eléctrico e com os átomos de oxigénio fornecidos ao cátodo, formando água.

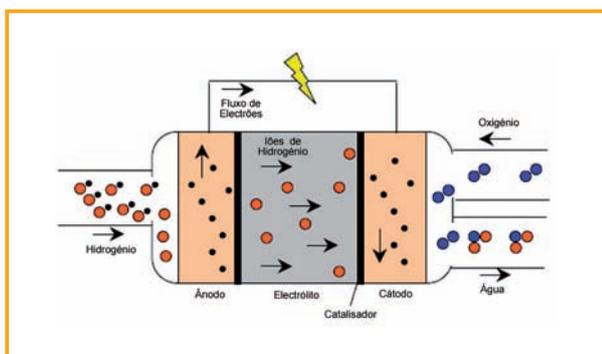


Fig. 5 - Diagrama de uma célula de combustível.

Uma célula de combustível apenas produz uma tensão de cerca de 1 volt, pelo que é usual interligarem-se várias destas unidades, formando uma pilha que poderá fornecer uma tensão mais facilmente utilizável. Uma pilha de combustível pode ser configurada com vários grupos de células interligadas em série e paralelo, podendo obter-se a tensão, corrente e potência pretendidas.

Existem cinco tipos principais de células de combustível, os quais se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento técnico e comercial: célula de combustível de membrana de protões (PEMFCs), alcalina (AFCs), de carbonatos fundidos (MCFCs), de ácido fosfórico (PAFCs), e de óxidos sólidos (SOFCs).

Os combustíveis mais utilizados em sistemas de pilhas de combustível incluem o gás natural, o hidrogénio e o metanol. Outros combustíveis têm-se revelado candidatos viáveis para o uso em pilhas de combustível, como o biogás, a gasolina, o gasóleo e outros destilados do petróleo, o éter dimetilico, o etanol, assim como produtos resultantes da gaseificação do carvão e da biomassa.

O combustível utilizado no núcleo das células é o hidrogénio, embora este gás não se encontre facilmente disponível. Por outro lado as infra-estruturas de extracção, transporte e distribuição, refinação e/ou purificação de hidrocarbonetos já estão integradas na nossa sociedade. Consequentemente, têm sido concebidos sistemas de pilhas de combustível para aplicações práticas utilizando hidrocarbonetos. Estes sistemas requerem, habitualmente, a presença de um conversor, o qual transforma os hidrocarbonetos num gás rico em hidrogénio, procede à remoção de contaminantes, e fornece hidrogénio puro à célula.

A Fig. 6 mostra o diagrama de uma célula de combustível, com capacidade de separar o hidrogénio do gás natural, para produção combinada de electricidade e de calor.

As unidades já disponíveis comercialmente produzem electricidade com eficiências entre 40% e 60%, com emissões reduzidas e de forma tão silenciosa que podem facilmente ser utilizadas em ambiente urbano. São particularmente bem adaptadas ao mercado da produção de electricidade distribuída devido a essas características, às

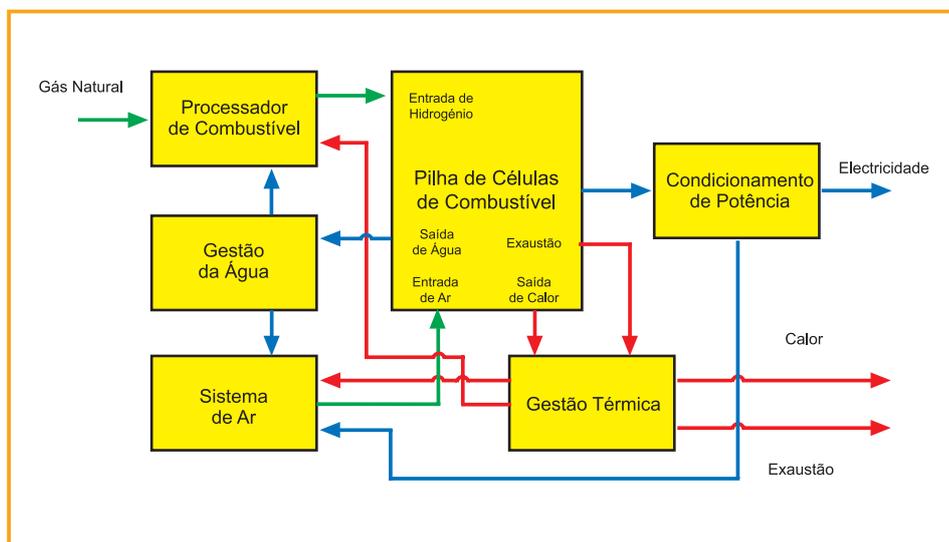


Fig. 6 - Diagrama de uma célula de combustível a gás natural.

quais se junta ainda a sua modularidade e a possibilidade de construção de unidades com qualquer potência.

As células de combustível libertam quantidades consideráveis de calor durante o seu funcionamento, o qual pode ser utilizado para a produção de água quente ou vapor. Quando as quantidades de calor e/ou as temperaturas dos gases de escape são reduzidas, estas podem ser aproveitadas para a produção de água quente, aquecimento ambiente ou vapor de baixa pressão. Pelo contrário, para células de altas temperaturas, é possível aproveitar o calor libertado no escape para produzir vapor a alta temperatura e pressão, o que o torna adequado para a produção de electricidade em ciclo combinado, podendo ser conseguidos rendimentos muito elevados (Fig. 7), superiores aos das melhores centrais térmicas convencionais.

A utilização de hidrogénio numa célula de combustível, quando combinado com oxigénio, resulta apenas na libertação de energia eléctrica, de calor e de água, não existindo quaisquer emissões poluentes (Fig. 8). Se o hidrogénio for obtido por electrólise com recurso a fontes de energia renováveis, o processo terá de facto emissões nulas, mas, se o hidrogénio for obtido a partir de combustíveis fósseis, então as vantagens ambientais não serão tão significativas.

A Fig. 9 apresenta uma possível aplicação de células de combustível, alimentadas a gás natural, em residências para produção combinada de electricidade e de calor (aquecimento ambiente e de águas sanitárias).

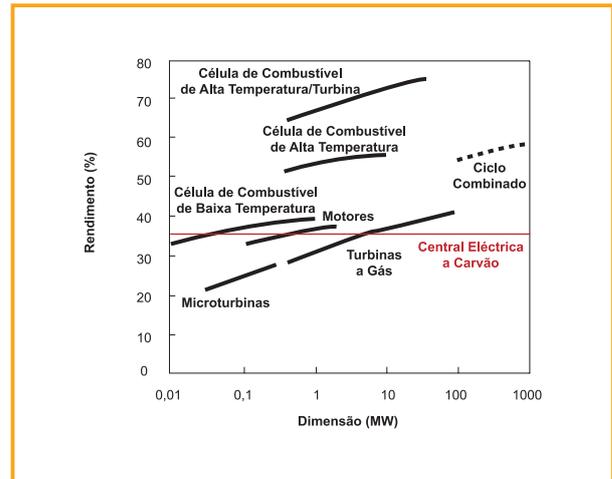


Fig. 7 - Rendimento de diversas tecnologias de produção de energia.

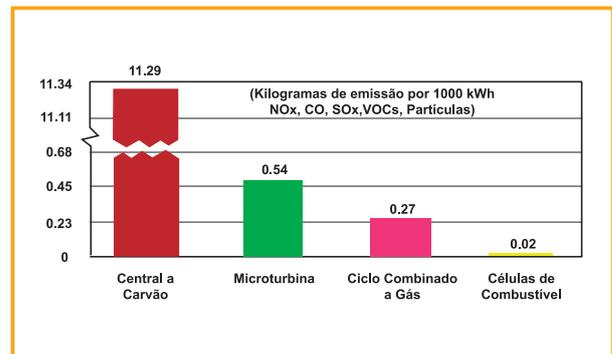


Fig. 8 - Emissões relativas de poluentes das diversas tecnologias (Plug Power)

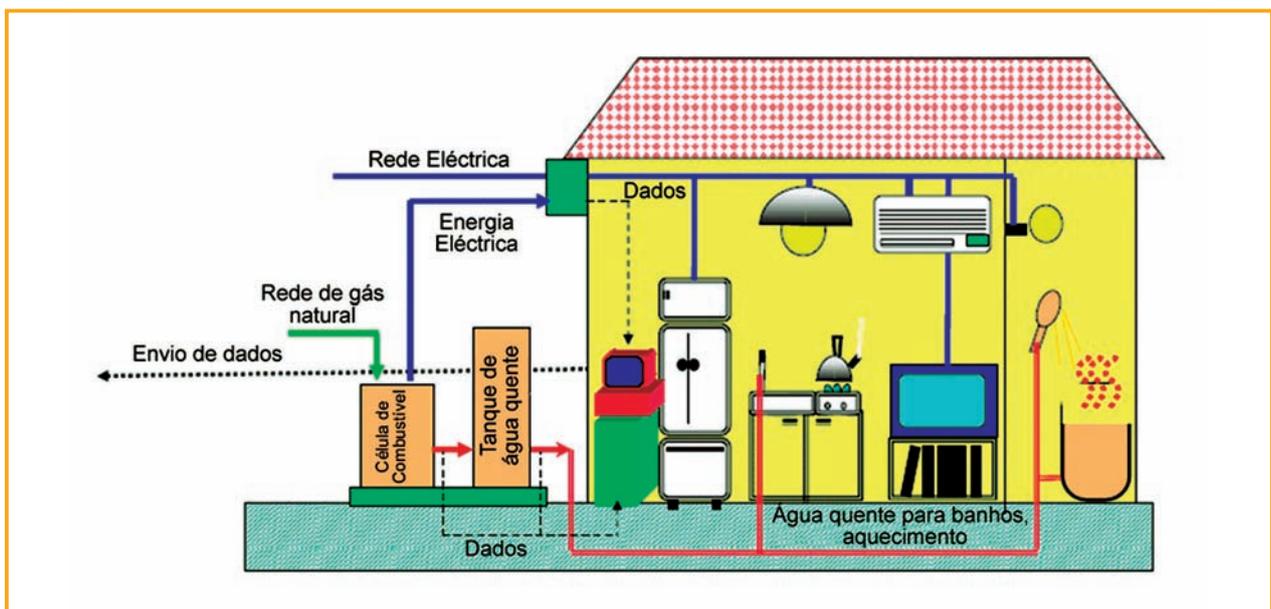


Fig. 9 - Aplicação doméstica de uma célula de combustível.

CONCLUSÕES

As células de combustível encontram o seu nicho de mercado a médio prazo (2010) nas aplicações de geração distribuída de electricidade e de energia térmica, ou seja, perto dos locais de consumo, apresentando como vantagens:

- Implementação de sistemas de alta fiabilidade (centros de telecomunicações, redes de dados, bancos), com possibilidade de integração em ambiente urbano;
- Decréscimo do uso de combustíveis fósseis importados, particularmente se o hidrogénio for produzido com energias renováveis;
- Redução das emissões de dióxido de carbono e de outros poluentes;
- Mitigação da necessidade de expansão da capacidade de produção centralizada, e da capacidade de transmissão e distribuição de energia eléctrica;
- Redução das perdas de transporte e de distribuição (10% de toda a electricidade produzida).

No entanto, apresentam-se como barreiras à aplicação de células de combustível:

- Elevados custos dos equipamentos conversores;
- Desconhecimento da tecnologia;
- Disponibilidade de apoio técnico;
- Disponibilidade da rede de produção, de armazenagem e de distribuição de hidrogénio;
- Volatilidade de preços dos combustíveis fósseis.

Estima-se que, quando as células de combustível atingirem um custo inferior a 1500 euros/kW, a sua aplicação se fará em larga escala, nomeadamente em grandes edifícios para produção de electricidade, aquecimento e ar condicionado. A outra aplicação das células de combustível com um enorme potencial encontra-se no sector dos transportes para substituir o motor de combustão interna, altamente ineficiente e poluidor. Para ser viável a aplicação de células de combustível nos automóveis é necessário que o seu custo desça para um valor inferior a 50 euros/kW, ou seja cerca de 100 vezes menos que o seu valor actual.

BIBLIOGRAFIA

1. Bent Sorensen, *Hydrogen and Fuel Cells*, Academic Press, 2005.
2. *Decentralised generation: development of EU policy*, ECN-C-02-075, Outubro de 2002.
3. Koppel T. and Reynolds J., *A Fuel Cell Primer: The Promise and Pitfalls*, www.fuelcellstore.com, Maio de 2001.
4. Lee Willis and Walter G. Scott, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, Marcel Dekker, 2000.
5. U.S. Department of Energy, *Fuel Cell Handbook*, EG&G Services, Outubro de 2000. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/769283-sD4TGw/native/769283.pdf>

REFERÊNCIAS

- [1] Ulf Bossel, Baldur Eliasson and Gordon Taylor, *The future of the hydrogen economy: bright or bleak?*, Abril de 2003. http://www.pacificsites.net/~dglaser/h2/General_Articles/hydrogen_economy.pdf.