

DRIVING A PROPELLER MOTOR USING A GREEN HYDROGEN-POWERED FUEL CELL

Ítalo Augusto Tito Fonseca¹, Francisco José Grandinetti², Thais dos Santos Castro³, Marcelo Martins Sampaio⁴, Antonio dos Reis Faria Neto⁵, Alvaro Manoel de Sousa Soares⁶, Erica Ximenes Dias⁷.

^{1,2,3,4,5,6,7} Departamento de Mecânica – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Brasil. Italo.fonseca@unesp.br, fj.grandinetti@unesp.br, sampaio.martins@unesp.br, antonio.faria@unesp.br, alvaro.soares@unesp.br, erica.ximenes@unesp.br

Abstract - The use of fossil fuels to generate energy directly or indirectly produces gases and other pollutants that, when emitted into the atmosphere, contribute to the degradation of air quality, including affecting the health of the population, and to the intensification of the greenhouse effect, which is considered the main cause of global climate change, leading to increased accumulation of carbon in the atmosphere. This proposal aims to move a propeller mounted on the shaft of a direct current (DC) motor of a mini power plant, driven by a fuel cell powered by green hydrogen. The hydrolyzer will be powered by a photovoltaic panel, which will produce green hydrogen. The prototype of a mini power plant, on a small scale, plays a fundamental role in the development of products and solutions, offering an economical way to test and improve concepts, involve stakeholders and ensure technical feasibility before investing significant resources in full-scale projects. In this sense, I acquired a Mini power plant using a fuel cell powered by green hydrogen that will drive a DC electric motor with a propeller. To generate hydrogen, we will feed the hydrolysis process with the specification of a photovoltaic panel. Finally, it is expected to move the propeller mounted on the shaft of the direct current (DC) motor using the green hydrogen concept, and prospect the data for a high-power electric drive system.

Keywords: Hydrolysis, Fuel Cell, DC electric motor and Decarbonization

I.INTRODUÇÃO

Muitos especialistas têm relacionado a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono e o metano, ao aumento da temperatura média anual do planeta, fenômeno conhecido como aquecimento global. Além disso, a poluição gerada pela queima de combustíveis fósseis prejudica tanto a saúde humana quanto o meio ambiente. O aumento do preço do petróleo e o crescimento da demanda energética mundial são fatores que evidenciam a necessidade do uso de fontes de energia renováveis e verdes [1] e [2].

As pesquisas envolvendo a produção de energia limpa são antigas e vêm crescendo na comunidade científica, com um desenvolvimento tecnológico cada vez maior. As empresas automotivas, industriais e do setor produtivo, bem como setores comerciais, vêm desenvolvendo e pesquisando novas

fontes de energia e/ou armazenadores de energia em substituição aos veículos, equipamentos e meios de transporte a combustão, inclusive veículos elétricos e híbridos, como empilhadeiras utilizadas em galpões fechados. Esses veículos elétricos e híbridos, além dos movidos a hidrogênio, já são uma realidade no cenário mundial. No entanto, os armazenadores de energia elétrica (baterias) apresentam desvantagens, tais como: Custo elevado devido às baterias de backup; Peso excessivo; Tempo de recarga longo; Descarte ambiental inadequado; Cilindros de hidrogênio sob alta pressão; Aumento do gás carbono na atmosfera, especialmente para veículos híbridos. Diante das desvantagens destacadas, desenvolver um sistema de geração de hidrogênio com produção e consumo em tempo real permitirá superar essas limitações [3].

O hidrogênio não é uma fonte primária de energia, e para obtê-lo, é necessário extrair de substâncias, como a água. Um dos métodos mais comuns de extração é a eletrólise da água, que consiste em separar as moléculas de água em seus componentes básicos, hidrogênio e oxigênio, utilizando eletricidade como fonte de energia.

Além dessa aplicação, existem as aplicações portáteis, nas quais as células de combustível podem substituir pilhas e baterias em equipamentos e veículos [4].

A Toyota, fabricante de veículos automotivos, desenvolveu o Toyota Mirai e está testando esse protótipo de célula de hidrogênio [5], porém com a desvantagem de precisar reabastecer ou trocar os cilindros de hidrogênio.

O hidrogênio, enquanto combustível, pode ser classificado de diferentes "cores", conforme a fonte de energia utilizada para sua produção. O hidrogênio cinza, por exemplo, é produzido a partir de combustíveis fósseis. Quando a produção envolve gás natural, com captura e armazenamento de carbono, temos o hidrogênio azul. Portanto, mesmo com o uso do hidrogênio cinza, estamos contrariando os esforços para descarbonizar a atmosfera [6] e [7].

Na Figura 1, apresenta-se um croqui de uma mini central de energia é composta por: Energia eletrólise com hidrogênio (energia 1) e Energia da célula de combustível (energia 2), Medidores de tensão e corrente, Motor DC e hélice.

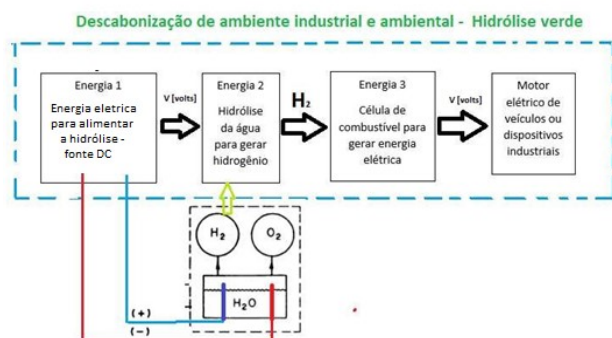


Fig. 1. Diagrama de blocos da central de energia utilizando Hidrogênio verde. Fonte: autor

A presente proposta visa mover uma hélice montada no eixo de um motor de corrente contínua (DC), de uma mini central de energia, acionado por uma célula de combustível movida a hidrogênio verde, Fig. 2. O hidrogênio será considerado verde por utilizar energia limpa gerada através do painel fotovoltaico. O sistema de geração energia verde visa obter autossuficiência energética associada a descarbonização ambiental.

Na Fig. 2, apresenta-se um croqui desse módulo ou mini central de energia, obtida com recurso financeiro próprio, é composto por: Energia de uma placa fotovoltaica (energia 1), obtida com recursos próprios, Energia eletrólise com hidrogênio verde (energia 2) e Energia da célula de combustível verde (energia 3), Medidores de tensão e corrente, Motor DC e hélice.

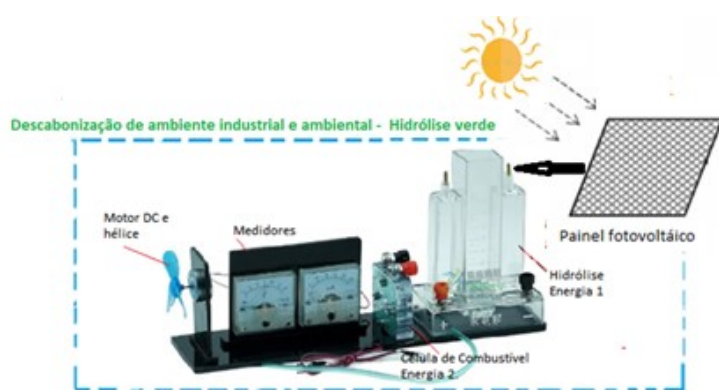


Figura 2. Diagrama de blocos da central de energia utilizando Hidrogênio verde. Fonte: autor

II. MATERIAL E MÉTODOS

A. Painel fotovoltaico

Todo tipo de energia utilizável na terra tem ou teve origem no espaço, então pode-se dizer que todos os tipos de energia são de origem do Sol, exceto por meio de alterações de núcleos atômicos, ou seja, energia nuclear. A energia solar tem como principal problema como armazenar e utilizar de forma econômica. A energia elétrica através da fonte solar é gerada por dois tipos a direta e a indireta. A forma direta de obtenção de energia se deve as células fotovoltaicas, onde a irradiação é transformada em energia elétrica. Para a obtenção de energia elétrica através do Sol e forma indireta constroem-se usinas em áreas de insolação instalam milhares de espelhos côncavos, que sejam coletores solares direcionados para um determinado local, que pode ser uma tubulação de aço inoxidável ou em um compartimento contendo simplesmente ar. Para a luz do Sol ao incidir em uma célula fotovoltaica, que é feita de dois materiais semicondutores (matérias que só deixam passar a eletricidade em um sentido apenas), liberta elétrons no seu interior que se deslocam para uma das superfícies tratadas ficando as duas superfícies da célula com uma carga elétrica distinta e pode-se assim obter uma corrente elétrica. Com esse processo pode converter-se até 23% da energia solar incidente em eletricidades. As vantagens de utilizar uma energia fotovoltaica é que são confiáveis, limpas, baratas, sem poluição, e de alta qualidade [8] e [9]. Na imagem abaixo tem-se a utilização do painel fotovoltaico junto ao processo de hidrólise, Fig. 3.

B. Hidrólise

Até momento o processo da quebra do hidrogênio não pode ser considerado 100% eficiente, pois parte da energia elétrica presente no processo químico advém de uma fonte de energia elétrica, bateria de chumbo-lítio. O processo de quebra da molécula é de 80%, e pode-se aumentar essa porcentagem se utilizar uma fonte de energia mais barata, e nesse projeto estamos propondo utilizar a energia gerada pelo sol, e atingir a maior eficiência possível. A geração do hidrogênio utilizando a eletrólise é bem difundida e conhecida, porém é pouco utilizada [10], devido ao custo de energia elétrica necessária. A eletrólise consiste na quebra da molécula de água em elementos básicos que a constitui, ou seja, Hidrogênio e Oxigênio. Esse processo de quebra da molécula da água, ocorre quando a corrente elétrica, gerado pela fonte, que passa pela água, ocorre o rompimento de dois átomos de hidrogênio, carregado positivamente, e um de oxigênio, carregado negativamente [11].

O processo químico de quebra da molécula de água é simples, como ilustrado abaixo, na figura 3.

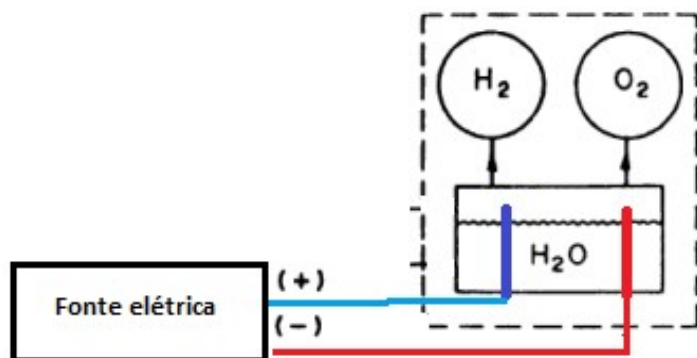
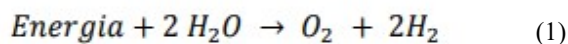


Fig. 3. Processo da Eletrólise (Fonte: autor)

As reações envolvidas no processo de eletrólise estão Equação 1 [11]:



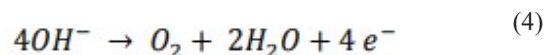
A água poderia separar-se em partículas neutras (H e OH), mas não ocorre devido à eletronegatividade do oxigênio ser maior que a do hidrogênio, assim, o oxigênio capta o elétron do hidrogênio, ficando mais estável com seus orbitais preenchidos. A captura um elétron do catodo, que é doador de elétrons, ficando assim neutro, de acordo com a Equação 2, [12].



Este átomo de hidrogênio encontra outro e forma uma molécula de gás, conforme a equação 3, [12].



O íon migra para o ânodo e perde o elétron que havia capturado do hidrogênio. A equação 4 mostra que a produção de água e de oxigênio é conseguida a partir de quatro íons [12].



A liberação de oxigênio é observada pelas bolhas que surgem na solução. Assim, obtêm-se um circuito fechado, envolvendo elétrons no circuito externo e íons hidróxido na água. Enquanto a energia cedida é armazenada sob a forma de hidrogênio [11].

A combinação de energia solar fotovoltaica com a eletrólise da água é um método relativamente simples de se obter hidrogênio. A eletricidade gerada pelas placas fotovoltaicas pode ser diretamente aplicada no sistema eletrolítico. Portanto, alterando a Fig. 4, tem-se a Fig. 5 o modelo de geração proposto [13].

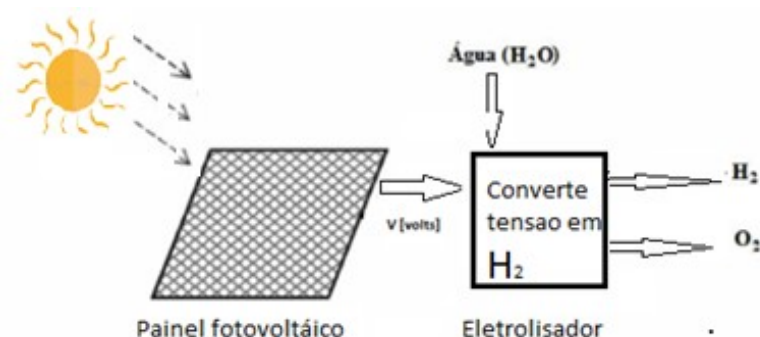


Fig. 4. Hidrolisador Verde

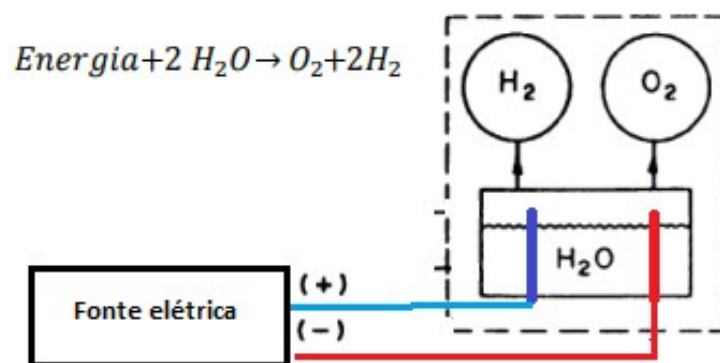


Fig. 5. Processo da Eletrólise (Fonte: autor)

C. Célula de Combustível

As baterias desempenham o papel de conversores e armazenadores de energia elétrica, sendo responsáveis por disponibilizá-la para o consumo dos motores elétricos quando necessário. Em contrapartida, as células a combustível não armazenam energia elétrica diretamente, mas a geram continuamente por meio da conversão da energia química de um combustível – geralmente o hidrogênio – em eletricidade, calor e água. Diferentemente das baterias, as células a combustível não precisam ser recarregadas, mas exigem um fornecimento constante de reagentes para manter seu funcionamento [14].

Uma célula a combustível é composta, essencialmente, por dois eletrodos – o ânodo e o cátodo – separados por uma membrana condutora de prótons, denominada eletrólito. Esse arranjo forma uma estrutura em “sanduíche”, onde ocorrem diversas reações eletroquímicas responsáveis pela geração de energia elétrica.

No funcionamento típico de uma célula a combustível alimentada por hidrogênio, esse gás é introduzido no ânodo, onde ocorre sua dissociação em prótons (H^+) e elétrons (e^-). Enquanto os prótons atravessam a membrana eletrolítica em direção ao cátodo, os elétrons seguem por um circuito externo, gerando corrente elétrica utilizável. No cátodo, o oxigênio (geralmente proveniente do ar ambiente) reage com os prótons e os elétrons que retornam do circuito externo, formando moléculas de água como subproduto [15].

O tipo de célula a combustível considerado neste contexto é a PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), amplamente utilizada devido à sua elevada densidade de potência, resposta dinâmica rápida e operação a baixas temperaturas. A reação global que representa esse processo é ilustrada na equação 5, bem como na Fig. 6.

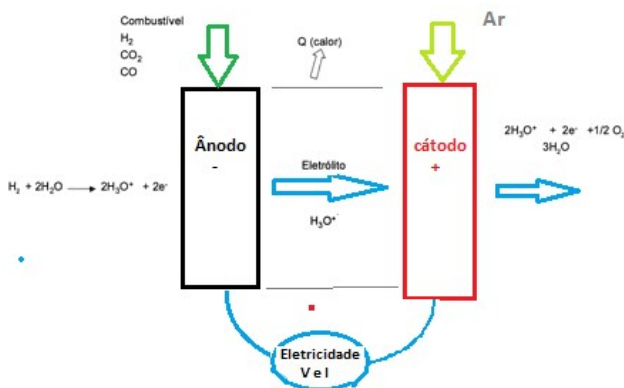
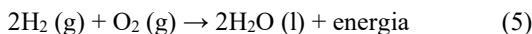


Fig. 6. Células de combustível Proton Exchange (PEM) (Fonte: autor)

III. RESULTADOS

A. Experimento com a central de energia

Na Fig. 7, é apresentado o experimento realizado com a central de geração de energia, composta pelos seguintes componentes: dois painéis solares, um hidrolisador, uma célula a combustível, medidores de tensão e corrente, e um motor de corrente contínua (DC) acoplado a uma hélice.

Inicialmente, foram adicionados 200 ml de água à temperatura ambiente (22 °C) ao reservatório do hidrolisador. Em seguida, os painéis solares foram expostos à luz, fornecendo uma tensão de 6,23 volts ao sistema, conforme ilustrado na Figura 6. Após aproximadamente 21 segundos de energização, observou-se o início da produção de hidrogênio no interior do hidrolisador, evidenciando a ocorrência da eletrólise da água.

O hidrogênio gerado foi então direcionado para a célula a combustível, que passou a operar, gerando uma tensão de saída de aproximadamente 0,34 volts e uma corrente elétrica de 10 mA. Essa energia foi utilizada para alimentar o motor DC, que acionou a hélice, demonstrando na prática a conversão de energia solar em energia mecânica, por meio das etapas de eletrólise da água, armazenamento temporário de hidrogênio e sua conversão eletroquímica em eletricidade via célula a combustível.

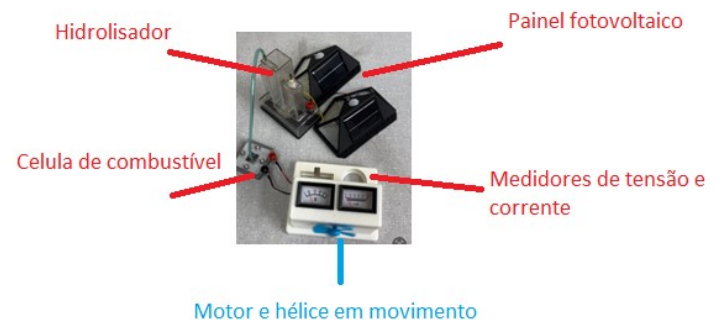


Fig. 7. Aparato experimental. Fonte Autor

B. Hidrolisador desenvolvido

Inicialmente, foi adquirido um eletrolisador comercial para a realização dos ensaios laboratoriais. No entanto, após sucessivas utilizações, o equipamento apresentou falhas operacionais e acabou se danificando, impossibilitando a continuidade dos testes com o dispositivo original. Diante dessa limitação, os acadêmicos optaram por desenvolver um hidrolisador próprio, adaptado às necessidades do experimento e à realidade dos recursos disponíveis. O esquema do

dispositivo construído pode ser visualizado na Figura 4, enquanto a Fig. 8 apresenta uma imagem real do hidrolisador desenvolvido em conjunto com os acadêmicos.

O novo equipamento foi montado utilizando materiais acessíveis e de fácil manuseio, com foco em manter a funcionalidade do processo de eletrólise da água, essencial para a geração de hidrogênio. Para testar seu desempenho, foi introduzida ao sistema uma solução contendo cloreto de sódio (NaCl), atuando como eletrólito. A adição do sal teve como objetivo aumentar a condutividade elétrica da água e, consequentemente, acelerar o processo de eletrólise.

Durante os testes, observou-se que a presença do cloreto de sódio na solução realmente promoveu uma aceleração na produção de hidrogênio, reduzindo significativamente o tempo necessário para o início da liberação de gás. No entanto, esses ensaios foram conduzidos sem a utilização da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, utilizando-se, em vez disso, uma fonte de alimentação elétrica convencional. Isso permitiu isolar os efeitos do eletrólito na eficiência do hidrolisador, facilitando a análise dos resultados obtidos.

Esse desenvolvimento prático representou não apenas uma solução criativa frente à limitação técnica inicial, mas também uma oportunidade de aprofundamento dos conhecimentos teóricos dos acadêmicos sobre processos eletroquímicos, montagem de sistemas experimentais e otimização de dispositivos de conversão energética.



Fig. 8. Hidrolisador desenvolvido

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes experimentais realizados demonstraram que o sistema proposto é funcional e apresenta boa capacidade de conversão energética em pequena escala. A energia solar captada pelos painéis fotovoltaicos foi utilizada com sucesso para promover a eletrólise da água, resultando na produção de

hidrogênio. Esse hidrogênio, posteriormente, alimentou a célula a combustível do tipo PEMFC, que gerou eletricidade suficiente para acionar um motor de corrente contínua (DC), evidenciando a conversão final em energia mecânica.

O tempo de resposta do sistema foi considerado satisfatório, com a produção de hidrogênio iniciando-se aproximadamente 21 segundos após o início do fornecimento de energia. A taxa de produção de hidrogênio mostrou-se sensível à composição do eletrólito: a adição de cloreto de sódio à água aumentou significativamente a condutividade da solução, acelerando a dissociação das moléculas e melhorando a eficiência do processo, conforme tabela 1. Além disso, observou-se que o uso de catalisadores eletroquímicos pode representar um avanço importante, uma vez que contribui para a redução do consumo elétrico no processo de eletrólise, tornando-o mais viável sob o ponto de vista energético e econômico.

A eficiência global do sistema, embora limitada pelas dimensões e simplicidade do protótipo, evidenciou o potencial da integração entre fontes renováveis e tecnologias de armazenamento por hidrogênio, especialmente em aplicações educacionais, experimentais ou em microrredes isoladas.

Tabela 1. Parâmetros Operacionais Medidos no Sistema

Parâmetro	Valor Observado	Unidade	Observações
Tensão gerada pelos painéis solares	6,23	V	Iluminação natural
Tempo para início da eletrólise	21	Seg.	Com NaCl
Tensão da célula a combustível	0,34	V	Estável durante funcionamento inicial
Corrente da célula a combustível	10	mA	Alimentando motor DC
Volume de água utilizada	200	mL	Temperatura ambiente: 22 °C

V. CONCLUSÃO

A pesquisa comprovou a viabilidade do uso do hidrogênio verde como vetor energético sustentável, reforçando seu potencial como alternativa limpa para a geração e armazenamento de energia elétrica. A mini central de energia desenvolvida demonstrou, de forma prática e funcional, a possibilidade de converter energia solar em energia mecânica, por meio das etapas intermediárias de eletrólise e utilização de célula a combustível, contribuindo significativamente para a

compreensão e disseminação de tecnologias de baixo impacto ambiental. Além de comprovar a aplicabilidade da proposta, os resultados obtidos reforçam a importância da pesquisa em materiais e configurações mais eficientes. Para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de novos materiais para os eletrodos e para a membrana da célula a combustível, bem como o estudo de arquiteturas modulares que possibilitem maior escalabilidade, durabilidade e rendimento energético do sistema. Investigações adicionais também podem abranger o armazenamento do hidrogênio gerado, a automação do processo e a integração com outros sistemas de energias renováveis. Para otimizar a eficiência do sistema e obter melhores resultados, algumas melhorias podem ser implementadas:

1. Melhoria da captação solar: utilização de painéis solares de maior eficiência ou posicionamento em ângulo ideal em relação ao sol para maximizar a captação de energia.
2. Controle de temperatura da água: aquecer ligeiramente a água pode aumentar a taxa de eletrólise, desde que respeitados os limites de segurança do sistema.
3. Uso de eletrodos mais eficientes: materiais como platina ou ligas específicas podem melhorar o rendimento da eletrólise.
4. Purificação do hidrogênio: garantir que o hidrogênio seja suficientemente puro pode aumentar a eficiência da célula a combustível.
5. Armazenamento temporário do gás: utilizar pequenos reservatórios pressurizados pode manter o fluxo de hidrogênio estável, melhorando a estabilidade da geração elétrica.
6. Monitoramento mais preciso: sensores de temperatura, pressão e vazão do hidrogênio ajudariam a entender com mais precisão o comportamento do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro e incentivo à pesquisa em energia renovável.

REFERÊNCIAS

[1] CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025; Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. 68 p.

[2] MELLO, L. F. e HOGAN, D. J. Dinâmica Populacional e Mudança Ambiental: Cenários para o Desenvolvimento Brasileiro. População, Consumo e Meio Ambiente. Campinas: NEPO – UNICAMP, p59-72, 2007.

[3] GOMES NETO, E. H. Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba, Brasil H2 Fuel Cell Energy, 240p. 2005.

[4] <https://www.still.com.br/competencia-em-solucoes/sistemas-de-energia/tecnologia-de-célula-de-combustivel-still.html>

[5] <https://www.tecmundo.com.br/mobilidade-urbana-smart-cities/137124-toyota-mirai-conheca-carro-eletrico-movido-células-hidrogenio.htm>

[6] <https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-esta-mais-barato-que-cinza/>

[7] <https://www.bloomberg.com.br/blog/hidrogenio-verde-deve-superar-o-azul-ate-2030/>

[8] FUKUROZAKI, S. H. Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa e energia solar fotovoltaica. 2011. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

[9] BARBIR, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. Solar Energy, v.78, p. 661-669, 2005.

[10] MARQUES, A. R. et al. O Hidrogenio como Vector Energético nos Transportes. Seminario de Desenvolvimento Sustentável. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.

[11] SANTOS, A. M. R. Tendências Tecnológicas das células a combustível para Uso do hidrogênio derivado de petróleo ou gás natural. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 130 p. 2008.

[12] URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. Proceedings of the IEEE, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2012.

[13] SOLARPOWER EUROPE. Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019. Disponível em: . Acesso em: 28 mai. 2016.

[14] WENDT, H. et al. Tecnologia de Célula a Combustível. Química Nova, p 538-546, 2000

[15] SULEMAN, F. DINCER, I. AGELIN-CHAAB, M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. International Journal of Hydrogen Energy, v. 40, n. 21, p. 6976-6987, 2015. 1st SUNFLOWER RENEWABLE ENERGY. Disponível em: . Acesso em 29 mai. 2016.