

REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

HIDROGÊNIO COMO FONTE ALTERNAIVA DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO: UMA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA EXPLORATÓRIA

HYDROGEN AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF AUTOMOTIVE FUEL: AN EXPLORATORY BIBLIOGRAPHIC RESEARCH

Beatriz Beca Figueiredo[1], Francisco Ignácio Giocondo Cesar[2]

e1649
https://doi.org/10.47820/acertte.v1i6.49

RESUMO
O mundo possui no momento uma grande necessidade de combustíveis alternativos aos derivados do petróleo, que poluam menos o meio ambiente, que sejam renováveis e que possam ser produzidos de forma economicamente viável. Essa pesquisa aborda uma das grandes possibilidades que está sendo estudada, denominada "A Economia do Hidrogênio". Essa pesquisa tem como objetivo verificar a possibilidade do hidrogênio como uma alternativa viável econômica para o seu uso como combustível de veículos automotores, através do processo de eletrolise da água. Com o atual prospecto de vida útil finita das reservas de petróleo, em breve atingindo valores elevados para sua aplicação como combustível. Por conseguinte, o hidrogênio vem ganhando notoriedade, como uma opção viável economicamente e ambientalmente, utilizando água e sal, em um processo de eletrólise, que indica um maior desempenho em motores automotivos. Fundamentado em uma pesquisa bibliográfica exploratória, nas principais bases de dados, teses, livros, artigos, publicações governamentais e relatórios técnico-científicos, retratando uma análise baseada nos pontos favoráveis e desfavoráveis com a finalidade de avaliar as possibilidades de sua utilização. O hidrogénio pode ser considerado como uma fonte de energia promissora, um combustível verde, de queima mais limpa e eficiente. Tecnologia que ainda passa por análises e pesquisas de viabilidade, a partir dessa pesquisa pretendesse também as entender e analisar.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio. Eletrólise da Água. Célula a Combustível. Célula de Combustível uso automotivo

ABSTRACT
The world currently has a great need for alternative fuels to petroleum derivatives, which pollute the environment less, are renewable and can be produced in an economically viable way. This research addresses one of the great possibilities that is being studied, called "The Hydrogen Economy". This research aims to verify the possibility of hydrogen as a viable economic alternative for its use as a fuel for motor vehicles, through the process of water electrolysis. With the current prospect of finite useful life of oil reserves, soon reaching high values for its application as a fuel. Therefore, hydrogen has gained notoriety as an economically and environmentally viable option, using water and salt, in an electrolysis process, which indicates greater performance in automotive engines. Based on an exploratory bibliographic research, in the main databases, theses, books, articles, government publications and technical-scientific reports, portraying an analysis based on favorable and unfavorable points in order to assess the possibilities of its use. Hydrogen can be seen as a promising energy source, a green fuel that burns cleaner and more efficiently. Technology that still undergoes analysis and feasibility research, based on this research, it also intended to understand and analyze them.

KEYWORDS: *Hydrogen. Water Electrolysis. Fuel Cell. Fuel Cell Automotive Use*

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Piracicaba
[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Piracicaba



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o mais simples e mais comum elemento do Universo, ele está presente em quase tudo. Ele compõe 75% da massa do Universo e 90% de suas moléculas, como a água (H2O) e as proteínas nos seres vivos. No planeta Terra, compõe aproximadamente 70% da superfície terrestre. No seu estado natural e sob condições ambientes de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar. Ele também pode estar no estado líquido, ocupando um espaço 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás, mas para isto ele tem que estar armazenado numa temperatura de – 253 ºC, em sistemas de armazenamento conhecidos como “sistemas criogênicos”. Acima desta temperatura, o hidrogênio não pode ser liquefeito, mas pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão (CONELHEIRO; LUCIANO, 2012).

A datar da primeira crise petrolífera, em 1973, passou-se a considerar o hidrogénio como uma possível fonte de energia, através da conversão eletroquímica, usando células de combustível.

A célula funciona por meio de uma eletrólise que ocorre em seu interior. Uma solução de água e bicarbonato de sódio é colocada em um recipiente chamado de reservatório, esta solução, por ação da gravidade, se dirige ao interior de nosso aparelho construído com chapas de aço que ao entrar em contato com a corrente da bateria do carro, que com a ação da eletricidade quebra as substâncias, tendo como produto final, dois gases diferentes: hidrogênio e oxigênio que são utilizados na combustão que ocorre no motor do veículo gerando energia para sua locomoção (GREEN SOURCE, 2015).

Dentre todos os combustíveis, o hidrogênio é o que possui a maior quantidade de energia por unidade de massa, ou seja, cerca de três vezes o poder calorífico dos combustíveis derivados de petróleo. Apesar da energia armazenada pelo hidrogênio ser menor do que a energia total utilizada na sua obtenção, o mesmo apresenta vantagens importantes que o qualificam como um dos combustíveis que irão, certamente, substituir os derivados de petróleo. A principal vantagem do hidrogênio é que reações químicas necessárias para o reconverter em energia produzem somente água como produto final, ou seja, não há emissão de gases poluentes ou gases de efeito estufa. Outras vantagens são seu alto poder calorífico, apesar da pequena massa específica, não ser tóxico e ser bastante reativo. Por outro lado, as atuais tecnologias para o uso energético do hidrogênio não lhe conferem competitividade frente aos energéticos concorrentes. Além disso, não existe hoje no mundo infraestrutura que instalada contemple, do ponto de vista comercial, as atividades de produção, armazenamento, transporte, distribuição e consumo do hidrogênio energético. A compressão e liquefação do hidrogênio são muito mais caras do que para gás natural e envolve gasto de energia significativamente maior. A baixa densidade de energia é, portanto, o principal obstáculo à utilização de hidrogênio em sistemas de transporte e até mesmo algumas aplicações estacionárias. Os desafios inerentes ao desenvolvimento da utilização do hidrogênio como vetor



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

energético, embora expressivos, não configuram dificuldades intransponíveis (LIBERATO NETO, 2007).

Pensando em um futuro próximo, em que o petróleo se encontra escasso e em alto valor de mercado, além de não representar uma fonte de energia renovável e um grande atuante em problemas ambientais. A possibilidade de se fazer do hidrogênio uma opção de substituição é, necessária. A tecnologia do hidrogênio abrange várias áreas nos quais conhecimentos relativos a armazenamento, transporte e manuseio são inerentes à implementação de uma economia baseada nesse combustível.

Essa pesquisa tem como objetivo verificar a possibilidade do hidrogênio como uma alternativa viável econômica para o seu uso como combustível de veículos automotores, através do processo de eletrolise da água. Conhecer quais são as tecnologias da atualidade na geração do hidrogênio.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – Hidrogênio

O hidrogénio é o elemento mais leve, sendo o núcleo do seu isótopo mais abundante constituído unicamente por um protão. O hidrogénio molecular (H2) existe como dois átomos ligados que partilham entre si os seus dois únicos electrões através de uma ligação covalente.

A temperatura e pressão normais - 0 ºC e 1 atm. - o hidrogénio apresenta-se como um gás extremamente inflamável, inodoro, insípido, incolor, insolúvel em água e muito mais leve que o ar. Para se apresentar no estado líquido, tem que estar armazenado numa temperatura de – 253 ºC, em sistemas de armazenamento conhecidos como sistemas criogénicos. Acima desta temperatura, o hidrogénio pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão (ESTEVÃO, 2008).

2.2 - Eletrolise da Água

Todos os corpos são formados de moléculas, compostas de diferentes átomos que, para manterem-se unidos, precisam de uma força de atração entre eles. Assim, toda molécula possui uma energia química que mantém os átomos ligados uns aos outros e mantém as moléculas ligadas umas às outras. Por este motivo, algumas substâncias liberam calor quando reagem e se dissociam (oxidação).

A energia da molécula pode ser utilizada com a oxidação ou combustão do composto, que é o que ocorre ao queimarmos lenha, álcool ou petróleo, que contém grandes quantidades de energia (BRANCO, 2008).

Para que seja possível a dissociar a molécula e liberar sua energia, pode-se realizar o processo de eletrólise que, para produção de hidrogênio de alta pureza, passa uma corrente elétrica contínua através de uma solução alcalina, separando a água entre hidrogênio gasoso (H2) e oxigênio



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

gasoso (O2), onde o oxigênio da reação é geralmente rejeitado, pois o gás de interesse, nesta reação, é o hidrogênio gasoso (SHREVE; BRINK, 1997).

A reação desse processo é:

2 H2O (l) → 2 H2(g) + O2 (g) (Equação 1)

Atualmente, as três principais tecnologias para realizar a eletrólise da água são: eletrólise alcalina, eletrólise PEM (*Proton Exchange Membrane*) e eletrólise SOEC (*Solid Oxide Electrolysis Cells*).

2.3 - Célula a Combustível

Células a combustível são conversores diretos de energia química em elétrica e térmica, de funcionamento contínuo (diferentemente das baterias), que produzem corrente contínua pela combustão eletroquímica a frio de um combustível, geralmente hidrogénio. Assim, considerando-se as células de baixa temperatura de operação em meio ácido, hidrogénio é oxidado a prótons no anodo, liberando elétrons, segundo a reação (LINARDI, 2011):

$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

No eletrodo oposto, o catodo, tem-se a reação:

$2H^+ + 2e^- + ½O_2 \rightarrow H_2O$

A reação global produz água e calor (exotérmica):

$H_2 + ½O_2 \rightarrow H_2O$

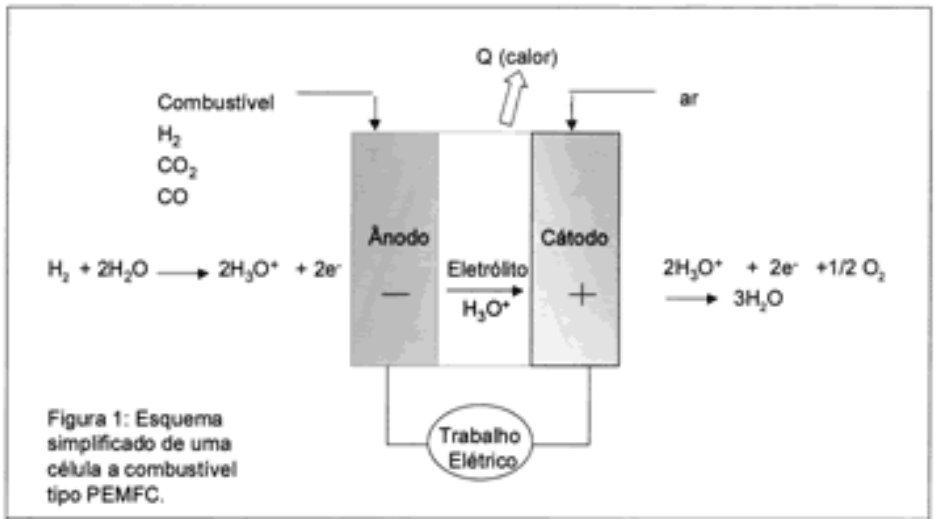

Figura 1: Esquema simplificado de uma célula de combustível tipo PEMFC.
Fonte: Gotz et al., (1999)

Os eletrodos são condutores eletrônicos permeáveis aos gases reagentes e são separados um do outro por um eletrólito (condutor iônico). O eletrólito pode ser um líquido, um polímero condutor de cátions (geralmente saturado com um líquido) ou um sólido.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

Célula a combustível é um dispositivo que converte eletroquimicamente combustíveis químicos em eletricidade; é, essencialmente, uma bateria que não para de fornecer corrente elétrica por causa da contínua alimentação externa de combustível. Em outras palavras, é uma bateria na qual os dois eletrodos não são consumidos durante a descarga, mas agem simplesmente como locais para a reação entre combustível e oxidante. Células a combustível convertem energia química diretamente em energia elétrica com eficiência termodinâmica não limitada pelo ciclo de Carnot. Essa vantagem das células a combustível depende, entretanto, de como os combustíveis que serão utilizados podem ser reformados para produzir hidrogênio e dióxido de carbono. Toda célula a combustível é composta de uma sequência de unidades, cada uma com quatro componentes: o eletrólito, o eletrodo para o ar (ar é o oxidante), o eletrodo para o combustível (o mais comum é o hidrogênio), e o interconector (MUCCILLO, 2004).

Células unitárias apresentam um potencial aberto de 1 a 1,2 V e liberam, sob solicitação de 0,5 a 0,7 V DC. Estes valores são, sob o ponto de vista prático, muito baixos. A necessidade de empilhamento em série de várias unidades de células (200 a 300, também chamado módulo) torna-se óbvia, a fim de se obter potenciais práticos da ordem de 150 a 200 V. Uma das vantagens inerente às células a combustível é a sua eficiência relativa ao combustível. A eficiência teórica máxima h de qualquer processo de produção de energia eletroquímica é obtida pelo quociente entre a energia livre de Gibbs (DG) e a entalpia total (DH), ou seja, a parte da energia total dos reagentes que pode ser convertida em energia elétrica:

$$\eta = \Delta G/\Delta H$$

A eficiência teórica eletroquímica diminui de 86 a 70% na faixa de temperaturas de 100 a 1000°C. A eficiência de Carnot, por sua vez, eleva-se de 0 a 70% na mesma faixa e somente a temperaturas superiores a 1000°C é maior que a eficiência teórica eletroquímica. Portanto, células a combustível a hidrogénio apresentam uma eficiência teórica significativamente maior que máquinas de Carnot, principalmente a baixas temperaturas (LINARDI, 2011).



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

Tabela 1 – Comparação de diferentes tipos de célula a combustível

Tipo de célula	*Íon móvel / Combustível*	*Tempo de Operação (ºc)*	*Rend (%)*	**Aplicação**
Alcalina (AFC)	OH^- / H_2	50-200	60%	Veículos espaciais
Membrana permeável a prótons (PEM)	H^+ / H_2	50-100	40%	Veículos automotivos em geral
"Direct methanol" (DMFC)	H^+ / Metanol, Etanol	90-120	30%	Veículos automotivos (potencial)
Ácido fosfórico (PAFC)	H^+ / H_2	~220	40%	Unidade estacionária (~200kW)
"Molten carbonate" (MCFC)	CO -2 / H CO 3 2	~650	50%	Unidade estacionária (>1MW)
Óxido sólido (SOFC)	O^{-2} / H_2, CO	500-1000	60%	Unidade estacionária (2 kw até multi MW)

Fonte: Lopes Filho (2011)

As células mais difundidas no momento são as de "membrana permeável a prótons" (*PEM, de Próton Exchange Membrane*), as quais podem trabalhar principalmente com hidrogênio. O hidrogênio em si permite uma reação de oxidação que tem como subproduto somente água (normalmente no estado vapor), tornando-se extremamente atrativa como solução de problemas ambientais gerados pela emissão de gases estufa.

2.4 - Célula de Combustível uso automotivo

Quatro tipos de células de combustível – ácido fosfórico, alcalina, membrana de troca de prótons e oxido sólido - poderiam ser usadas em veículos automotores. Atualmente, diversas pesquisas apontam as células de combustível do tipo membrana de troca de prótons,



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

comercialmente disponível dentro de alguns anos, como a que melhor se enquadra, em um curto espaço de tempo, para o uso em veículos elétricos. Células de combustível de ácido fosfórico são muito grandes e pesadas para serem usadas em veículos leves, sendo que para veículo pesados podem ser uma alternativa razoável. As células de combustível alcalinas são muito atraentes, devido ao seu funcionamento, temperatura de trabalho e a sua construção que utiliza materiais de baixo custo, mas devido à intolerância do eletrólito ao CO_2, obriga a utilização de oxigênio puro ou a remoção do CO_2 caso se utilizasse o oxigênio retirado do ar. A maioria das pesquisas demonstram que o custo adicional pela exigência do armazenamento de oxigênio puro ou a remoção do CO_2 do ar praticamente inviabilizam a sua utilização em veículos. Porém, caso se encontrem eletrólitos alcalinos tolerantes ao CO_2, ou ainda métodos de remoção do CO_2, as células de combustível alcalinas poderiam se mostrar superiores às de membrana de troca de prótons para veículos. As de óxido sólido são células projetadas para ter alto desempenho, mas elas têm a grande desvantagem de trabalharem com altas temperaturas e necessitarem de um tempo relativamente longo para alcançar a temperatura operacional necessária ainda que, com o auxílio de baterias, fosse possível dispor da energia necessária à partida (AMARAL, 1998).

Todos estes fatores contribuem para que a maioria dos veículos desenvolvidos atualmente à célula de combustível, utilizem células do tipo membrana de troca de prótons.

Hoje em dia muitas empresas estão desenvolvendo células de combustível de membrana de troca de prótons, principalmente para aplicação como sistema de cogeração, utilizando como combustível o gás natural. Porém, na literatura disponível muito pouco é publicado em razão da tecnologia que envolve as células ser ainda nova, exigindo grandes investimentos e acirrando a competitividade entre as empresas detentoras desta tecnologia. As PEMFCs são mais sensíveis do que as PAFCs em relação à qualidade do combustível. Isto se deve à menor tolerância aos níveis de CO (AMARAL, 1998).

3. METODOLOGIA

Pesquisar bibliograficamente artigos e pesquisas sobre o desenvolvimento do hidrogênio como fonte de combustível automotivo, a evolução das pesquisas e estudos sobre as possíveis formas de obtenção e eficiência, responder perguntas, foram atividades executadas para o desenvolvimento de toda a pesquisa, com foco sobre a novas tecnologias na geração do hidrogênio. Desta forma, desenvolver novos conhecimentos que podem ajudar no desenvolvimento da célula a combustível, viabilizando seu potencial econômico e ecológico. Assim fazendo um estudo aprofundado e agregando conhecimento e pesquisa ao que chamam de a economia do hidrogênio.

4. PESQUISA

Com base nos estudos de Estevão (2008):



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

A emissividade do hidrogênio é muito baixa, entre 17 e 25%, emitindo uma luz pouco radiante na faixa do espectro visível, menor do que nos outros combustíveis fósseis, como por exemplo o butano, o propano ou até mesmo a gasolina – 34 a 43%. Esta característica torna o hidrogénio menos perigoso em caso de acidente porque a radiação transmitida é menor, no entanto pode não ser possível perceber a sua existência facilmente. A chama do hidrogénio é muito quente, sendo a sua densidade energética de 38 KWh/kg contra a densidade da gasolina que é de apenas 14 KWh/Kg. O hidrogénio é extremamente inflamável no ar, entre 4% e 75% por volume de ar. A energia necessária para inflamá-lo é muito pequena e, em algumas condições, pode ocorrer auto inflamação. O hidrogénio pode-se difundir rapidamente através de materiais e sistemas que estejam presentes no ar ou em outros gases comuns devido à sua baixa densidade. Em alguns materiais, a difusão é mais pronunciada com temperaturas elevadas. Este também é mais volátil que a gasolina, propano e metano, assim como tende a dispersar-se mais rapidamente. A única excepção é para libertações criogénicas, onde o vapor muito frio que inicialmente se forma, pode ser mais denso que o ar circundante. Quando em contacto com o flúor e o cloro, especialmente com o primeiro, com o qual a reação é tão rápida e imprevisível que se torna incontrolável, este reage violentamente. A sua despressurização rápida pode provocar inflamação, visto a sua expansão ser acima de -40 °C, podendo ocorrer aquecimento. Todas estas características do hidrogénio, colocam-no num patamar de utilização como combustível bastante privilegiado. No entanto essas mesmas características traduzem-se em fortes implicações contra o ser humano, devido à extrema sensibilidade para se detonar. Para que seja usado em público, o hidrogénio teria de ser manuseado com o mesmo nível de confiança e nunca com mais riscos, que os combustíveis convencionais. As propriedades físicas relevantes para a segurança do hidrogénio são comparadas com as da gasolina, GPL, e o metano.

Com base nos estudos de Santos e Santos (2015):

Henry Cavendish mostrou que o gás hidrogénio se forma pela ação de ácidos como o clorídrico ou o ácido sulfúrico em contacto com metais como zinco e o ferro. Ele também fez explodir misturas deste gás em contacto com o ar com faíscas eléctricas (1784), e encontrou um produto que parecia “água pura”. Mais tarde Antoine Lavoisier explicou os resultados de Cavendish, e deu ao gás o nome de “hidrogénio”, proveniente do grego “formar-água”. Na terra não existe o hidrogénio livre, estando sempre associado a outros elementos e para ser obtido “puro” é necessário gastar energia na dissociação de uma fonte primária. Sendo assim, o hidrogénio não é uma fonte primária de energia, mas sim, uma fonte intermediária, por isso não deve ser referido como uma fonte energética, pois é apenas um vector energético, isto é, uma moeda de troca. A escolha do melhor método de produção do hidrogénio depende da quantidade que queremos produzir e do seu grau de pureza. As tecnologias de produção do hidrogénio necessitam de energia sobre alguma forma como calor, luz ou eletricidade de forma a que se inicie o processo. São bastante diversificadas, sendo de salientar as seguintes.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

Por **Electrólise da água**, este método baseia-se na utilização da energia eléctrica, para separar os componentes da água (hidrogénio e oxigénio), sendo o rendimento global do processo da ordem dos 95%.

$$2\ H_2O + \text{electricidade} \rightarrow 2\ H_2 + O_2$$

Um bom método inventado e estudado no final dos anos 80 e nos anos 90, recentemente patenteado (1999), altamente prometedor, não agressivo para o meio ambiente é a obtenção do hidrogénio por electrólise da água usando um electrolisador com uma(s) membrana(s) de troca de protões (*PEM – Próton Exchange Membrane*). A energia eléctrica poderá vir de fontes renováveis, como a energia solar, eólica, hídrica, maremotriz, geotérmica etc. Com este tipo de fontes renováveis o uso da electrólise tem como vantagem ser uma forma de produzir hidrogénio perfeitamente limpa. Mas também tem aspectos negativos, como serem necessárias grandes quantidades de energia, sendo que em geral as fontes de energia usadas são não renováveis e consequentemente poluidoras.

Vapor reformando o gás natural ou outros hidrocarbonetos, esta técnica consiste em expor o gás natural ou outros hidrocarbonetos a vapor a altas temperaturas para produzir o hidrogénio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Esta tecnologia é usada pela indústria, sendo a maioria do hidrogénio obtido pelo "processamento do vapor" de gás natural (metano):

$$CH4(g) + H2O(g) \rightarrow CO(g)+3H2(g)$$

O passo seguinte é converter o monóxido de carbono com vapor para produzir hidrogénio e dióxido de carbono adicional, resultando maior obtenção de hidrogénio do processo.

$$CO(g) +H2O(g) \rightarrow CO2(g)+H2(g)$$

O hidrogénio que é possível aproveitar do gás natural através deste processo andará na casa dos 70 a 90%. Com estes combustíveis fósseis como o metano (CH4), propano (C3H8), butano (C4H10) e octano (C8H18) que contêm hidrogénio na sua constituição, têm-se uma forma económica de se obter o gás hidrogénio. Porém este método tem três desvantagens. A primeira é que a produção de hidrogénio com este método, para responder a um consumo posterior fica mais cara por unidade energética, do que se o combustível primário for simplesmente usado por combustão. A segunda é que este método só se aplica aos combustíveis fósseis que são uma fonte não renovável de energia e um dia irão deixar de ser usados como fonte de energia. A terceira é o dióxido de carbono que se liberta para o meio ambiente.

Fotobiológico, com esta tecnologia alguns micróbios fotossintéticos produzem H2 nas suas atividades metabólicas usando a energia luminosa. Com o recurso de sistemas catalíticos e de engenharia o grau de produção de hidrogénio pode atingir os 24% de rendimento. Tem como vantagem ser um método de produção de H2 limpo e eventualmente poderá ser barato. A



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

desvantagem deste método é que ainda se precisa de fazer trabalho de pesquisa de forma a que o processo seja melhorado.

Gaseificação de biomassa e pirólises, em 1996, investigadores americanos acharam enzimas de duas formas de bactérias resistentes ao calor - uma descoberta em montes de escória de carvão queimando sem chama, a outra em aberturas vulcânicas profundas no Pacífico – onde o gás hidrogénio é libertado a partir de moléculas de glicose. Porque ambas as enzimas são resistentes ao calor, poderão ser usadas com este, o que fará com que as reações se deem mais rapidamente. A madeira e o papel são constituídos por celulose, que é um polímero da glicose, sendo eventualmente possível, o uso destas enzimas para produzir hidrogénio de pedaços de madeira e aparas e de papel usado. A produção de hidrogénio com este método pode ser o resultado da alta temperatura que o gaseifica, bem como das pirólises de baixa temperatura resultantes da biomassa (resíduos de aglomerados, madeira, mato da limpeza das florestas, resíduos agrícolas etc.) tendo como catalisador estas bactérias resistentes ao calor. Esta tecnologia está atualmente também disponível para combustíveis fósseis.

Com base nos estudos de Borges (2015):

Mirai é o primeiro veículo movido à hidrogênio (*Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV*) de produção em massa e pode alcançar impressionantes 502km, o que o classifica como o veículo do tipo zero-emissões de maior autonomia atualmente, seu reabastecimento poderá ser realizado em aproximadamente 5 minutos, quanto aos outros números de desempenho, o veículo é capaz de acelerar de 0 à próximo dos 100km/h em 9 segundos.

A geração de energia elétrica para funcionamento do motor é proveniente de uma reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio deve ser o combustível alimentado no sistema, enquanto o oxigênio é absorvido da atmosfera. Os únicos produtos da emissão da reação são calor e água. Para o perfeito funcionamento do sistema como um todo, este é compreendido de seis subsistemas básicos, como descritos a seguir:

Unidade de célula à combustível (*FC Stacks*)

Essa unidade é a responsável por gerar eletricidade a partir de uma reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio, gerado como único resíduo a água e calor.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928



Figura 2: Corpo da unidade de célula de combustível.
Fonte: Borges (1998)

A dita célula de combustível consiste em membrana trocadora de prótons que estão imprensadas entre separadores. Essa membrana é feita de polímero sólido com camadas de catalisador aplicadas. No entanto, como uma célula só é capaz de gerar menos de um volt, centenas dessas são necessárias e logo ligadas em série para aumentar a tensão. A combinação de cerca de 370 dessas células gera a chamada unidade de células de combustível. Desenvolvida pela própria Toyota, essa unidade gera potência máxima de 114KW (ou 155cv) e possui densidade de potência de 3,1KW/L, o que segundo a própria fabricante a torna líder no segmento. Diferentemente de unidades desenvolvidas anteriormente, essa não precisa de umidificador para as membranas (facilita o transporte de prótons) uma vez que usa aproveita a própria água gerada.

Para a geração efetiva de eletricidade, alguns passos são seguidos:

O hidrogênio armazenado nos tanques é direcionado para o eletrodo negativo (ânodo); as moléculas de hidrogênio quando ativadas pelo ânodo liberam os seus elétrons; esses elétrons passam do ânodo para o cátodo e geram uma corrente elétrica; as moléculas de hidrogênio que perderam elétrons se tornam íons e se movem através da membrana eletrolítica para o eletrodo positivo (cátodo); o ar ambiente (contendo oxigênio) é orientado para o eletrodo positivo; esses mesmos íons se juntam com as moléculas de oxigênio e formam água;

Conversor de tensão da unidade de célula de combustível

Este é responsável por possibilitar o aumento de voltagem de saída para 650V, reduzir o número de células de combustível da unidade e reduzir volume e peso do sistema como um todo. Permite ainda a utilização junto a sistemas dos veículos híbridos da marca, o que representa uma enorme redução de complexidade e custos.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928



Figura 3: Conversor de tensão da unidade.
Fonte: Borges (1998)

Bateria

A bateria recarregável, feita de níquel-hidreto metálico, alimenta o motor elétrico ligado as rodas dianteiras e pode armazenar energia durante a desaceleração deste. Fica localizada atrás dos bancos traseiros.



Figura 4: Bateria de níquel-hidreto metálico.
Fonte: Borges (1998)

Motor elétrico

Foi utilizado um motor/gerador elétrico de corrente alternada que tanto pode receber energia da bateria como diretamente da unidade de células de combustível. Este entrega uma potência máxima de saída 113KW (154cv) e torque máximo de 34,2kgf.m.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928



Figura 5: Motor/gerador elétrico.
Fonte: Borges (1998)

Unidade de Controle

Essa unidade corresponde a um inversor de frequência que pode converter corrente contínua (CC) em alternada (CA) para fornecer energia ao motor ou mesmo entre CC/CC que pode consumir ou recarregar energia da bateria e outros sistemas. Exerce um controle de bastante precisão sobre a energia advinda das células de combustível e controla a carga/descarga da bateria sob variadas condições de uso.



Figura 6: Unidade principal de controle.
Fonte: Borges (1998)

Tanques de hidrogênio

O Mirai possui dois tanques para armazenagem de hidrogênio sob alta pressão (700 bar ou 70Mpa). O de maior capacidade (62,4 litros) se acomoda atras do banco traseiro, e o outro (60 litros) fica sob o banco. Ambos possuem três camadas de proteção. A mais ao interior, revestimento de plástico que retem o gás, a intermediária de fibra de carbono e a mais externa feita de fibra de vidro



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

para proteção de superfície. Em termos de massa de hidrogênio, como normalmente medido, podem ser armazenados aproximadamente 5Kg.

Com base na tabela 2, pode ser observado que o Toyota Miraí possui o melhor consumo equivalente entre os três veículos apresentados, porém quando considerado o custo atual do hidrogênio (US$7,99/Kg) e o da gasolina (US$3,25/galão), o Corolla se mostra mais vantajoso quanto ao valor total anual para percorrer 15.000 milhas (24.140Km) podendo chegar a aproximadamente $400 dólares mais barato. Levando-se em conta que veículos movidos a célula de combustível são aproximadamente 2 a 2,5 vezes mais eficientes do que um motor de combustão interna a gasolina, pode ser concluído que o custo de US$8/Kg de hidrogênio possui uma energia equivalente a uma gasolina com custo variando entre US$3-4/galão. Mas, apesar da boa autonomia de 502Km atingida pelo Miraí, está não supera a do seu “irmão” híbrido, o Prius plug-in com seus 869Km (modo elétrico mais motor a gasolina), que devido ao bom consumo equivalente (21,3Km/l) e a capacidade do seu tanque (40 litros) pode ir mais longe sem necessidade de parada para reabastecimento. Sendo híbrido, e, portanto, permitindo o uso do motor elétrico associado ao motor de combustão (10 a 18Km de autonomia), o Prius, suportando ainda pelo baixo valor considerado para o custo da energia elétrica (US$0,12/Kmh), consegue cumprir o mesmo percurso anual com o menor custo entre os três veículos apresentados (BORGES, 2015).



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Veículos Toyota avaliados (a) Corolla, (b) Prius, (c) Mirai
Fonte: Revista Carro (2020)



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

Tabela 2. Comparativo da eficiência de modelos com diferentes meios de propulsão.

Modelo	*Toyota Corolla L 1,8 (automático)*	*Toyota Prius (plug-in)*	*Toyota Mirai*
Propulsão	*Gasolina*	*Híbrido*	*Célula de combustível*
Potência combinada (cv)	*134*	*136*	*155*
Autonomia Combinada (Km)	*679*	*869*	*502*
Consumo equivalente em modo combinado (Km/l-e)	*13,5*	*21,3*	*28,5*
Tempo de reabastecimento/recarga	*3-5 min*	*1-3h*	*3-5 min*
Emissões de CO2 (g/Km)	*171,5*	*82,6*	*0*
Capacidade do tanque	*50l*	*40l*	*5 kg*
Valor da compra(US$)	*17.775*	*29.990*	*45.500*
Custo anual com abastecimento (US$)	*1.510*	*906*	*1.920*

Fonte: Borges (2015)

Com base nos estudos de Gotz, Linardi e Wendt (1999):

> O desenvolvimento da tecnologia de células a combustível tem revezado, nos últimos 30 anos, alguns momentos de euforia e de decepção. Frequentemente falou-se da sua total inviabilidade como, por exemplo, há 15 anos, pela indústria alemã.

Muito dinheiro já foi gasto neste desenvolvimento e o que se obteve disso tudo? Pode-se, claro, empregá-la nas naves espaciais, com um alto padrão técnico e alta confiabilidade, mas esta tecnologia faz uso das células alcalinas, que não têm futuro para aplicações terrestres. Como tecnologia já estabelecida e apresentável, pode-se citar os sistemas a ácido fosfórico da empresa ONSI. Mas poder-se-á falar de um sucesso econômico real somente quando outros concorrentes



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

oferecerem sistemas semelhantes no mercado. As perspectivas das células de alta temperatura de operação certamente não são ruins, mas ainda não existe nenhuma oferta deste tipo de sistema no mercado. A tecnologia de células a membrana deve ser analisada de um modo bem diferente. O seu mercado principal é o dos veículos elétricos não poluentes e não o da geração de eletricidade/calor em unidades estacionárias de grande/médio portes. Para este fim ainda é necessário um desenvolvimento adicional. O fato de que uma importante montadora automobilística tem equipado não só ônibus, mas também carros de passeio com células tipo PEMFC e, muito além disso, tem uma meta já anunciada de que em 8 anos 2% de sua produção serão veículos movidos a PEMFC, não permite aos autores deste artigo duvidar do futuro - e do mercado - deste tipo de tecnologia.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando toda a pesquisa, constata-se que de muitas maneiras o hidrogênio é o combustível perfeito. É o combustível de queima mais limpa e o mais eficiente. O hidrogênio pode produzir eletricidade e a eletricidade pode produzir hidrogênio, criando um ciclo de energia que é renovável e inofensiva para o meio ambiente. O hidrogênio se combina quimicamente com a maioria dos elementos, por isso tem sido usado como um produto químico industrial em uma ampla variedade de aplicações por muitos anos. Em veículos, o hidrogênio pode ser usado como combustível de duas maneiras: para produzir eletricidade em uma célula de combustível para a opção mais limpa ou em um motor de combustão interna onde as emissões ainda são significativamente menores em relação aos demais combustíveis.

O hidrogênio enquanto combustível pode ser de diferentes “cores”. Estas o classificam conforme a fonte de energia usada para produzir o hidrogênio combustível. Há o hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis. Quando essa produção vem de gás natural e há captura e armazenamento de carbono, temos o hidrogênio azul. Já o hidrogênio verde é aquele feito a partir da eletrólise. Porém a energia inicial para a realização deste processo precisa vir de fontes renováveis para que o combustível se enquadre nesta categoria. Assim, sua produção se dá sem a emissão de carbono.

O hidrogênio possui a mais alta energia de combustão por unidade de peso do que qualquer outro combustível, o que significa que ele é mais eficiente em se tratando de peso do que os combustíveis usados atualmente. Ele oferece duas a três vezes mais energia do que a maioria dos demais combustíveis comuns. Ele se combina imediatamente com o oxigênio, liberando energia considerável na forma de calor.

Ao observar os trabalhos de Gotz, Linardi e Wendt (1999) e Borges (1998), vemos que apesar de todos os pontos desfavoráveis na apropriação do hidrogênio como combustível, ele se fez possível bem antes do esperado. Analisando o exemplo do Toyota Mirai, do ponto de vista do consumidor, levando em conta apenas o custo de compra, bem como o custo atual de cada fonte de



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

energia, o veículo de combustão interna possui melhor razão custo/benefício, levaria em média cerca de 10 anos para que o Prius plug-in seja considerado como melhor custo/benefício.

O veículo Mirai, produzido pela Toyota, que possui maior eficiência energética entre os três veículos analisados na tabela 2, apresenta ainda nível zero para emissões de carbono na atmosfera, assim como os veículos puramente elétricos, no entanto, também dispõe de uma maior autonomia. O tempo de recarga, quando comparado aos veículos elétricos também é um fator de vantagem para os carros movidos a hidrogênio.

O gás hidrogênio não é toxico, é seguro e usado em larga escala industrial, podendo ser produzido a partir de uma variedade de fontes, como biomassa, gás natural, carvão ou através da própria eletrolise da água. Além disso, ele é considerado um excelente modo de armazenamento de energia obtida de fontes renováveis, como eólica ou solar. No entanto, atualmente o hidrogênio possui custos de transporte, armazenagem e fornecimento elevados, assim como a célula a combustível, citada anteriormente, para o consumidor final e conforme verificado na tabela 2, o combustível hidrogênio ainda não se tornou definitivamente vantajoso frente aos atuais custos praticados da gasolina e eletricidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O agravamento dos problemas ambientais nas grandes cidades em todo o mundo tem levado vários países a investirem no desenvolvimento de veículos elétricos, tracionados por baterias eletroquímicas ou sistemas híbridos. Entre estes últimos o uso do hidrogênio em células de combustível tem recebido grande atenção, com recursos significativos sendo aplicados em pesquisa e desenvolvimento por empresas e/ou governos.

Como toda e qualquer nova tecnologia, apesar dos veículos movidos a célula de combustível possuírem boa eficiência, como a sua larga autonomia, e serem de baixo impacto ambiental, considerando sua emissão de água através do escapamento, ainda há grandes entraves, como por exemplo a falta da infraestrutura de reabastecimento necessária a essa modalidade de veículos bem como o custo final de venda do combustível. No entanto, já é possível verificar alguns investimentos sendo realizados em prol da oferta de novos produtos, como por exemplo Toyota.

Especialistas veem este tipo de combustível como chave para um mundo neutro em carbono. Já há quem aponte o hidrogênio verde como uma possível commodity, e o Brasil, como um potencial exportador dela.

Conclui-se que, apesar do alto custo atual do hidrogênio como combustível automotivo, os modelos de célula a combustível já representam um grande avanço na tecnologia automotiva, e a medida em que os projetos e a infraestrutura das cidades sejam amadurecidos, estes poderão se tornar muito mais vantajosos em todos os aspectos quando comparados aos modelos movidos à gasolina.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

REFERÊNCIAS

AMARAL, E. G. **Veículo elétrico com sistema energético híbrido**: célula de combustível/baterias eletroquímicas. 1998. 139f. Tese (Doutorado) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 1998. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/260737. Acesso em: 05 jul. 2021.

BORGES, G. S. Carros movidos a célula de combustível: a nova aposta automotiva. *In:* WORKSHOP DE PESQUISA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - PTI, 5., SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA - SIINTEC, 1., 2015, Salvador. **Anais...** Salvador: SENAI/CIMATEC, 2015. p. 121-131. Disponível em: http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/handle/fieb/531. Acesso em: 05 jul. 2021.

BRANCO, S. M. **Energia e meio ambiente**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2008.

BRINK, J. A.; SHREVE, R. N. **Indústrias de Processos Químicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014.

CONELHEIRO, L. T. P.; LUCIANO, A. Desenvolvimento de um sistema gerador de hidrogênio gasoso para utilização como combustível alternativo em veículos automotores. *In.:* **Anais Eletrônico VI Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação Científica**, 23 a 26 de outubro de 2012. Disponível em: http://cesumar.br/prppge/pesquisa/mostras/vi_mostra/luis_thiago_panage_conelheiro.pdf. Acesso em: 14 jun. 2021.

DONADON, L. M. B.; SOLDERA, G. R. **Estudo da obtenção de hidrogênio gasoso a partir da eletrólise da água, utilizando célula solar como fonte de energia**. TCC (artigo) – Universidade de São Francisco, Campinas, 2013.

ESTEVÃO, T. E. R. **O Hidrogénio como combustível**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade de do Porto, Porto, 2008. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf. Acesso em: 16 jun. 2021.

FLORIO, D. Z.; FONSECA, F. C.; MUCCILLO, E. N. S.; MUCCILLO, R. Materiais cerâmicos para células a combustível. **Cerâmica**, v. 50, n. 316, dez. 2004. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ce/a/V86X5fzYMdqBYvhw4dYcp5D/abstract/?lang=pt. Acesso em: 22 jun. 2021.

GOTZ, M.; LINARDI, M.; WENDT, H. Tecnologia de Células a Combustível. **Química Nova**, v. 23, n. 4, 1999. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/NYnZ6bbM7TY6RKRGGTJTmqr/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 05 jul. 2021.

KNOB, D. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11062014-143621/publico/2013KnobGeracao.pdf. Acesso em: 14 jun. 2021.

LIBERATO NETO, R. Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água. **Revista Eco Gestão Brasil**, v. 6, n. 13, 2007. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_018_2007.pdf. Acesso em: 16 jun. 2021.

LINARDI, M. Hidrogénio e Células a Combustível: Programa Brasileiro de I&D. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 23, n. 1/2, 2011. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/2011/17912.pdf. Acesso em: 19 jun. 2021.

LOPES FILHO, C. H. **Modelagem matemática do comportamento dinâmico de uma célula a combustível tipo PEM e desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para**



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

atendimento da demanda de potência para uso automotivo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2011. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/259580/1/LopesFilho_ClaudioHartkopf_M.pdf. Acesso em: 05 jul. 2021.

SANTOS, F. A. C. M.; SANTOS, F. M. S. M. O Combustível "Hidrogénio". **Revista Millenium**, n. 31, maio. 2005. Disponível em: https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/435. Acesso em: 14 jun. 2021.

SOURCE, G. Hidrogênio automotivo e ajuste de HHO. **Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas – UNIT, ALAGOAS**, v. 3, n. 3, p. 65, 2015. Disponível em: https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/3614. Acesso em: 14 jun. 2021.

AGRADECIMENTO: Os autores agradecem o apoio e todo o suporte dado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo – IFSP – Câmpus Piracicaba