

TECNOLOGIA ESPACIAL APLICADA AOS VEÍCULOS AUTOMOTORES COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO HIDROGÊNIO EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

SPACE TECHNOLOGY APPLIED TO THE AUTOMOTIVE VEHICLES AS AN ALTERNATIVE TO MITIGATE THE GREENHOUSE GASES EMISSIONS: A HYDROGEN LIFE CYCLE ASSESSMENT IN FUEL CELLS

Cleber Eduardo Lorenzi¹ e Roberto Aguiar Peixoto

Instituto Mauá de Tecnologia

Praça Mauá n.º 1

CEP: 09580-900 São Caetano do Sul, SP Brasil

E-mail: ¹lorenzi@maua.br

RESUMO

Este artigo analisa de que forma a introdução de veículos movidos por células a combustível a hidrogênio, pode impactar na redução da emissão de dióxido de carbono na atmosfera, quando comparado com veículos movidos por gasolina em motores de combustão interna. Um dos resultados revela que a redução do dióxido de carbono é balanceada pelas emissões durante a fase de geração de eletricidade para produção de hidrogênio por meio do processo de eletrólise da água, podendo influenciar diretamente no balanço de emissões de dióxido de carbono na atmosfera. Neste artigo o hidrogênio mostrou ser uma excelente alternativa em países como o Brasil, que possui uma matriz energética limpa, podendo reduzir as emissões de dióxido de carbono geradas pelo uso de automóveis em 79%, porém inviável, do ponto de vista de mitigador do efeito estufa em países com matriz energética fóssil, como os EUA, o que poderia aumentar as emissões em 47%. Apesar de não emitir dióxido de carbono durante a fase de uso dos veículos com células a combustível de hidrogênio, as emissões de CO₂ na fase de geração de energia elétrica para produção do hidrogênio por meio da eletrólise podem superar as emissões de um veículo convencional a gasolina.

Palavras-chave: células a combustível; hidrogênio; efeito estufa; eletrólise; dióxido de carbono.

ABSTRACT

This article analyzes the introduction of vehicles moved by hydrogen fuel cells and their impact in the reduction of the carbon dioxide emission to the atmosphere, comparing these results to vehicles moved by gasoline in internal combustion engines. One of the results reveals that the reduction of the carbon dioxide is balanced by the emissions during the stage of generation of electricity for hydrogen production by water electrolysis, where it could affect directly the global carbon dioxide emissions to the atmosphere. In this article the hydrogen is presented as an excellent alternative in countries like Brazil, who has a clean energy production of electricity, due to its hydraulic potential, and could reduce the carbon dioxide emissions from the use of automobiles in 79%, however not viable of the point of view of mitigating the greenhouse effect in countries which have a fossil based generation of electricity, like the USA, which could increase the emissions in 47%. In spite of not emitting carbon dioxide during the stage of use of the vehicles with hydrogen fuel cells, the emissions of CO₂ in the stage of electric power generation for production of the hydrogen by electrolysis can overcome the emissions of gasoline in conventional vehicles.

Keywords: fuel cell, hydrogen; greenhouse effect; eletrolysis; carbon dioxide.

1 – INTRODUÇÃO

Apresentada pela primeira vez em 1802, pelo inglês denominado Sir Humphrey, as células a combustível seguiram um lento desenvolvimento ao longo dos dois últimos séculos, e ficaram basicamente esquecidas por um longo período, sem encontrar viabilidade para uma aplicação prática, que estimulasse a sua produção em escala industrial.

Em meados da década de 1960, a necessidade de substituição das grandes e pesadas baterias convencionais nos veículos espaciais, especificamente as experimentadas no Projeto Mercury, fez com que os cientistas da Agência Nacional de Aeronáutica e Espaço – NASA, dos Estados

Unidos, se voltassem para os livros em busca de alternativas tecnológicas, que viabilizassem a geração de energia elétrica em alta amperagem, alta confiabilidade, alta segurança, alta compactação e sem a emissão de contaminantes para o interior da espaçonave.

A primeira célula a combustível empregada no programa espacial norte-americano foi em 1965, na Gemini 5. A eletricidade era utilizada para uso interno da espaçonave, enquanto a água produzida era canalizada para um reservatório inflável existente no sistema de água potável, que não era bebida, mas era usada para inflar o reservatório para fazer pressão no sistema de água potável. O calor residual proveniente do funcionamento do

equipamento era eliminado através do sistema de refrigeração da nave (GRISSON, 1969).

A característica mais importante deste conceito é que, para os vôos de longa duração, a vida das células é limitada apenas pela quantidade de combustível e oxidante presente nos tanques, enquanto as baterias convencionais duram apenas enquanto estiverem carregadas, exceto exista um meio de recarregá-la a bordo.

Outro ponto importante é que as células a combustível permitem a eliminação de peso supérfluo, que é um dos fatores mais importantes considerados nos projetos de naves espaciais.

Apesar das falhas ocorridas durante o vôo da Gemini 5, causadas por um problema em uma unidade de controle elétrica, os engenheiros do projeto descobriram que o sistema funcionava muito melhor do que o esperado, e que poderia integrar os próximos projetos de naves espaciais.

As células a combustível foram então desenvolvidas e adaptadas para gerar energia elétrica no interior das cápsulas espaciais, consumindo hidrogênio e oxigênio dos próprios tanques de combustível, e produzindo água para a tripulação. De 1965 até os dias de hoje, estes dispositivos eletroquímicos têm sido aplicados e aperfeiçoados em todas as gerações de veículos espaciais tripulados, passando com sucesso pelo Projeto Gemini, pelo Projeto Apollo e pelos ônibus espaciais, e estão planejadas para integrar a nova geração de espaçonaves, chamada Órion.

Desde então, muitas aplicações surgiram para as células a combustível, e graças à compactação e confiabilidade obtidas com a aplicação em apertadas cápsulas espaciais, e ao fato de que seu funcionamento ser capaz de emitir apenas vapor de água, a aplicação de motores elétricos, alimentados por células a combustível de hidrogênio, em veículos automotores tem sido cada vez mais discutida.

Em tempos de grandes discussões sobre temas como efeito estufa, mercado de carbono, mecanismo de desenvolvimento limpo, mudanças climáticas, e outros tantos presentes diariamente na mídia, é muito comum ouvir as indústrias automobilísticas afirmando que os automóveis deixarão de ser um dos grandes vilões do aquecimento global, assim que a tecnologia das células a combustível de hidrogênio tornarem-se viáveis economicamente.

O hidrogênio como combustível é muito versátil e pode ser usado tanto em motores a combustão interna, quanto em motores a reação ou em células a combustível, explorando o potencial de eliminar as emissões de gases tóxicos e gases de efeito estufa, uma vez que a única emissão na saída dos escapamentos desses veículos é de vapor de água.

O hidrogênio não é uma fonte primária de energia, e, portanto, necessita ser obtido por meio de um processo industrial. E como todo processo desenvolvido pelo homem, apresenta alguns tipos de emissões e impactos ambientais, que precisam ser contabilizados a fim de se obter um cenário completo das emissões do combustível durante todo o seu ciclo de vida. E a melhor ferramenta para a obtenção de uma visão sistêmica da cadeia do hidrogênio é a análise do ciclo de vida (ACV) para o 'hidrogênio combustível'.

A análise do ciclo de vida de um combustível é uma técnica caracterizada pelo levantamento do inventário energético e de emissões de poluentes para a avaliação dos aspectos ambientais, energéticos e impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias-primas elementares (berço) até a disposição final do produto (túmulo). No caso dos combustíveis, equivale a levantar o consumo energético e a emissão de poluentes para a extração/produção das matérias-primas básicas, até o momento de liberação na atmosfera dos resíduos da combustão ou reação química ocorrida.

O objetivo deste artigo é avaliar os resultados obtidos por meio da utilização da ACV, de modo a identificar se a utilização dessa tecnologia, baseada no uso de hidrogênio em células a combustível, sendo o hidrogênio produzido por meio da eletrólise, será capaz de reduzir a emissão dos gases de efeito estufa, principal causador do efeito estufa.

Inicialmente são apresentados os principais conceitos funcionais sobre células a combustível e seu atual estado de desenvolvimento tecnológico.

Em seguida, o hidrogênio é apresentado como um substituto dos combustíveis fósseis, como a gasolina, porém aplicados em células a combustível. A produção do hidrogênio é baseada no processo de eletrólise da água, pois é o meio de produção mais acessível à população, é renovável e permite a geração descentralizada de hidrogênio.

Para a viabilidade da análise sugerida, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- limitado aos veículos de passageiros com dimensões e desempenhos semelhantes;
- a produção de hidrogênio é feita por meio da eletrólise da água;
- a gasolina apresenta poder calorífico de 37,6 MJ/kg e densidade de 720 kg/m³;
- o desempenho de um veículo a gasolina com motor de ciclo Otto é de 10 km/l.

2 – METODOLOGIA

A metodologia para realização de uma análise do ciclo de vida de um produto pode ser dividida em quatro etapas distintas: a determinação do objetivo e escopo, a análise do inventário, a avaliação dos impactos e a interpretação dos resultados (CHEHEBE, 1998).

Inicialmente foi definido o objetivo deste artigo, que é avaliar, comparativamente em relação à gasolina, se a utilização de hidrogênio em células a combustíveis, desenvolvidas no programa espacial norte-americano, quando aplicadas em veículos automotores, é capaz de reduzir a emissão de gases de efeito estufa, neste caso o dióxido de carbono.

O escopo considera a geração de hidrogênio por meio do processo de eletrólise da água, utilizando energia elétrica da rede de distribuição, para o Brasil, os EUA e a Europa. Faz parte do escopo a delimitação da fronteira desta análise, que compreende as emissões desde o momento da extração do combustível, até o último momento, quando este é lançado para a atmosfera.

Antes da análise do inventário é preciso definir a chamada 'unidade funcional', que permite o estabelecimento de indicadores, sustentados por uma base comum de parâmetros, que viabilizam a comparação entre produtos diferentes (CHEHEBE, 1998). Neste artigo, a 'unidade funcional' adotada foi kg CO₂/km, pois permite comparar emissões globais de gases em função da distância percorrida para cada tipo de combustível ou tecnologia empregada.

A análise do inventário foi realizada nas duas principais fases da vida de um combustível, sendo a primeira a fase de produção e distribuição, e a segunda é a fase de 'uso'. Ela foi realizada por meio de uma pesquisa bibliográfica das emissões nas várias formas de produção de um combustível e em cálculos baseadas nas informações coletadas e nas hipóteses apresentadas.

No caso da gasolina, a fase de produção compreende a determinação das emissões geradas na fase de extração e refino do petróleo, armazenamento e distribuição ao cliente final. A fase de uso compreende o momento em que a gasolina é queimada nos motores de combustão interna, e seus produtos de reação são eliminados na atmosfera.

Para o hidrogênio, a fase de produção compreende as emissões liberadas durante a geração de eletricidade para o processo de eletrólise. A fase de uso, neste caso, possui emissão nula, uma vez que os produtos de reação são eletricidade, calor e água.

A coleta de dados deste trabalho foi realizada com base em uma pesquisa exploratória de caráter quantitativo, e baseada na obtenção de dados primários e secundários, por meio de uma revisão da bibliografia.

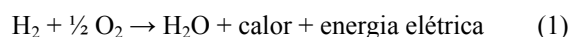
Foi realizado um levantamento de dados e características técnicas e de uso dos veículos automotores atuais e dos protótipos movidos a hidrogênio, para a determinação do consumo de combustível para os modelos em análise. Este fator é relevante para este artigo, uma vez que as eficiências dos diferentes sistemas de conversão de energia ficam subentendidas no desempenho final dos veículos.

A terceira etapa, referente à análise dos impactos, foi discutida por meio da comparação dos valores das emissões globais de cada combustível, determinando se o principal impacto em questão, o efeito estufa, poderá ser reduzido, ou não.

A interpretação dos resultados representa a última etapa da análise do ciclo de vida, e foi uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados apresentados ao longo do artigo. A conclusão foi baseada na somatória das emissões geradas nas fases de produção e uso para cada combustível e depois na comparação das emissões totais durante todo o ciclo de vida.

3 – FUNDAMENTOS DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Uma célula a combustível é um sistema de conversão eletroquímico de energia, que transforma energia química diretamente em energia elétrica, por meio da reação:



O funcionamento da célula a combustível baseia-se na obtenção de uma corrente elétrica por meio de uma reação controlada entre o hidrogênio e o oxigênio. O hidrogênio é fornecido à célula por meio do lado do anodo, em que um catalisador facilita a oxidação do gás hidrogênio, separando-o em prótons e elétrons. Uma membrana polimérica permite a passagem de prótons do anodo para o catodo, que se combina com o oxigênio e elétrons, produzindo água e calor. Esta membrana não permite a passagem dos elétrons, que acabam fluindo do lado catódico para o lado anódico através de um circuito externo, gerando uma corrente elétrica.

Uma célula a combustível pode usar hidrogênio proveniente de qualquer tipo de hidrocarboneto, como o gás natural, a gasolina, o metanol, o etanol, e outros. Neste caso, faz-se necessário a utilização de um reformador de combustível, que consegue separar o hidrogênio das cadeias orgânicas dos combustíveis. Outra alternativa é a produção do hidrogênio a partir da eletrólise da água.

A principal característica das células a combustível é a emissão de vapor de água, de seu escapamento.

No entanto, quando estes veículos utilizam reformadores de gasolina, metanol, e outros combustíveis ricos em hidrogênio, emitem vapor de água e CO₂, como principais subprodutos (ASHLEY, 2008).

3.1 Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, compondo cerca de 90% de sua massa. Ele possui a maior quantidade de energia por unidade de massa dentre os combustíveis conhecidos, com cerca de 125 MJ/kg (ASHLEY, 2008). Se for resfriado até atingir o estado líquido, este combustível ocupa o equivalente a 1/700 do volume ocupado no estado gasoso. Essa é uma das razões pela qual o hidrogênio é utilizado como combustível em foguetes e sondas espaciais, uma vez que estas necessitam de combustível com baixo peso e com grande capacidade de armazenamento de energia.

Na Terra o hidrogênio é encontrado combinado com outros elementos, como o oxigênio na água, ou o carbono nos compostos orgânicos, pois é muito ativo quimicamente.

O interesse pelo hidrogênio começou a aumentar no final do século passado, após estudos e relatórios alarmantes sobre o aumento das emissões de CO₂ na atmosfera, provenientes da queima de combustíveis fósseis, e da previsão de escassez do petróleo por volta da primeira metade do século XXI (RIFKIN, 2003). Um número cada vez maior de cientistas começou a estudar a possibilidade de se fazer uma transição dos combustíveis fósseis para o hidrogênio, como forma de tentar conter o aquecimento global.

O principal recurso energético para o futuro é o hidrogênio, e atualmente ele se encontra sob um intenso foco internacional, tanto em nível governamental quanto industrial. As principais companhias de petróleo do mundo trabalham para que o hidrogênio possa ser produzido a baixo custo a partir de hidrocarbonetos ou da água, de

modo a torná-lo no combustível de maior disponibilidade no planeta (PANIK, 2008).

3.2 Produção do hidrogênio

A quebra das ligações covalentes do hidrogênio com o oxigênio na água permite produzir hidrogênio, para utilização posterior como um combustível. Conforme previsto pela segunda lei da termodinâmica, a energia obtida por meio do funcionamento da célula a combustível é menor que a energia gasta no processo de eletrólise da água. No entanto, a eficiência global ainda permanece maior que a eficiência dos antigos motores de combustão interna.

Os principais processos utilizados para quebrar os compostos orgânicos e inorgânicos, para extrair o hidrogênio molecular são a reforma a vapor, a eletrólise, a eletrólise a vapor e a reforma por oxidação. Este artigo considerou apenas a eletrólise, por se tratar de uma proposta mais limpa e com maior potencial para tornar-se sustentável a longo prazo.

A eletrólise separa os elementos da água, passando por ela uma corrente elétrica. A carga elétrica quebra a ligação química entre os átomos de hidrogênio e oxigênio, e separa os componentes atômicos nas suas formas de íons. Estes íons são formados nos pólos do sistema, sendo o ânodo o polo positivo, onde se concentra o oxigênio, e o cátodo o polo negativo, onde se concentra o hidrogênio.

A tensão mínima necessária para o processo é 1,24 V, considerando a utilização de água pura a 25 °C e 1 atm de pressão (PEAVEY, 2001).

A quantidade de energia necessária para eletrolisar a água é 193,5 MJ/kg H₂, nas condições normais de pressão e temperatura, considerando também o consumo dos equipamentos complementares da instalação (PEAVEY, 2001). Os equipamentos para eletrólise existentes no mercado são confiáveis, possuem uma eficiência energética entre 65 e 80%, e operam com densidade de corrente da ordem de 2000 A/m².

4 – VEÍCULOS MOVIDOS POR CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Nos últimos anos, as maiores montadoras de automóveis no mundo anunciaram planos de lançar veículos alimentados por células a combustível. A Daimler-Benz iniciou, em 1997, um esforço em conjunto com a Ballard Power Systems, empresa canadense líder no desenvolvimento de células a combustível em escala industrial. A montadora afirma que produzirá 100 mil carros deste modelo até 2010. A Ford uniu-se posteriormente a esse grupo, elevando os investimentos. A Toyota também espera ter seus modelos a hidrogênio circulando pelas ruas, mesmo considerando o grande sucesso de seu veículo híbrido, o Prius. A GM acredita ter os seus modelos prontos também antes de 2010. A Nissan, a Honda, a Mitsubishi e a VW também estão planejando seus lançamentos. Os dados dos principais produtos em desenvolvimento estão na Tabela 1 (FUEL CELL, 2008).

Tabela 1: Principais protótipos em desenvolvimento

Marca / Modelo	Capacidade do tanque (kg H ₂)	Autonomia (km)	Consumo (kg H ₂ /km)
Honda / FCX V4	3,75	300	0,0125
Ford / Focus FCV	4	290	0,0138
GM / HydroGen 3 (Zafira)	3,1	270	0,0115
GM / Hy-wire	2	129	0,0155
Daimler-Chrysler/ Nocar 4	1,8	200	0,0090
Daimler-Chrysler/ Classe A	1,8	145	0,0124

Portanto, a média de consumo de hidrogênio nos protótipos avaliados é de 12,1 gramas/km.

5 – INVENTÁRIO DE EMISSÕES

5.1 Emissões de CO₂ em veículos com motores de combustão interna a gasolina

5.1.1 Emissão de CO₂ para a produção de gasolina

O cálculo do consumo de energia e da emissão de gases de efeito estufa durante a fase de produção dos combustíveis tem-se mostrado algo de difícil mensuração. Uma análise dos dados de estudos que abordam a eficiência energética para a produção de gasolina, considerando o suprimento de gás natural, energia elétrica e outras fontes de energia na produção, transporte, refino e distribuição dos combustíveis, apresenta o valor de 4,9 gCeq/MJ, que convertidos para a massa de dióxido de carbono é equivalente a 18 g CO₂/MJ de gasolina disponibilizada nos tanques, ou 677 g CO₂/kg de gasolina, considerando um poder calorífico de 37,6 MJ/kg (WEISS *et al.*, 2000).

Para uma gasolina com densidade de 720 kg/m³, a emissão total de CO₂ durante a fase de produção é equivalente a 49 g/km.

5.1.2 Emissão de CO₂ durante o uso de gasolina em motores de combustão interna

Para este artigo, o índice de emissão de CO₂ para veículos médios movidos à gasolina é de 0,220 kg de CO₂/km, considerando um desempenho médio de 10 km/l (BERLOWITZ e DARNELL, 2000).

Muitas montadoras buscam atualmente melhorar este índice, estabelecendo metas que vão até 0,120 kg de CO₂/km para a próxima década, e para isso estão trabalhando com novos materiais para a construção de pistões, controles de deflagração do combustível, sensoriamentos independentes nas câmaras de combustão, turboalimentação, sobreaquecimento da galeria de combustível, redução do coeficiente aerodinâmico, pneus

de menor arraste, combinação com motores elétricos e seus sistemas regenerativos, entre outras.

5.2 Emissão de CO₂ para a produção de hidrogênio por eletrólise da água

5.2.1 Energia necessária para o processo de eletrólise da água

Para o cálculo da emissão de CO₂ na produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água é preciso, inicialmente, determinar a demanda de energia elétrica necessária para este processo.

A energia necessária para quebrar a molécula de água em hidrogênio e oxigênio é de 285,84 MJ/kmol de H₂ a 25°C e 1 atm. Com o peso molecular do gás hidrogênio (H₂) de 2 kg/kmol, tem-se que a energia gasta na eletrólise deve ser de no mínimo 11,86 MJ para cada metro cúbico produzido, ou 142,89 MJ/kg (PEAVEY, 2001). Os equipamentos convencionais para eletrólise operam entre 75 e 80°C, com densidade de corrente da ordem de 2.000 A/m², e tensão entre 1,9 e 2 Volts. Nestas condições, a energia necessária para se produzir 1 m³ de H₂ é de 17,28 MJ (4,8 kWh), ou 193,5 MJ/kg de H₂, considerando-se o consumo da bomba, de outros componentes pertinentes ao equipamento e de perdas.

A eficiência energética para o processo de eletrólise é obtida por meio da relação de energia elétrica gasta para quebrar as moléculas de água e a energia disponível no hidrogênio obtido. No balanço total, que é a principal característica da Análise de Ciclo de Vida, em que foi considerado o consumo das bombas e outros componentes do equipamento de eletrólise, a energia gasta é de 193,5 MJ/kg de H₂, sendo que a energia disponível no gás é de 125 MJ/kg. Portanto, considerando a fase de compressão para armazenamento, gasta-se mais energia para de produzir o hidrogênio por eletrólise do que ele é capaz de fornecer como um combustível, como era de se esperar pelo segundo princípio da termodinâmica.

5.2.2 Emissão de CO₂ por meio do consumo de eletricidade

As emissões de dióxido de carbono pela produção de energia elétrica apresentam enormes variações quando comparadas entre países ou regiões onde são geradas. Como exemplo, o Brasil possui uma matriz fortemente baseada na geração hidráulica de energia elétrica, enquanto que os EUA possuem uma matriz baseada na queima de combustíveis fósseis (óleo, gás e carvão). Outro exemplo é a França, que apresenta baixos índices de emissões de gases de efeito estufa, pois sua matriz é fortemente sustentada pela energia nuclear. Segundo dados do IPCC (METZ *et al*, 2005) demonstrados na Tabela 2, a matriz energética brasileira é consideravelmente limpa, emitindo indiretamente cerca de 0,024 kg CO₂/ MJ (0,087 kg CO₂/ kWh) de energia consumida, enquanto que a dos EUA é grande emissora de CO₂ com 0,169 kg CO₂/MJ.

Tabela 2: Emissão de CO₂ para a produção de eletricidade

País	kg CO ₂ (eq)/MJ gerado
------	-----------------------------------

Brasil	0,024
EUA	0,169
Europa (OECD)	0,109

Para se produzir um quilograma de hidrogênio a partir da eletrólise da água são necessários 193,5 MJ. No Brasil, a emissão de CO₂ na geração de energia é 0,024 kg para cada megajoule. Assim, contando que o poder calorífico do hidrogênio é de 125 MJ/kg, são emitidos cerca de 0,037 kg de CO₂ para cada quilograma de hidrogênio disponibilizado nos tanques. Os valores para EUA e Europa encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Emissão de CO₂ para a produção de eletricidade

País	kg CO ₂ /MJ disponível no combustível
Brasil	0,037
EUA	0,262
Europa (OECD)	0,169

Torna-se claro que a produção de hidrogênio por eletrólise não é um processo cuja emissão de dióxido de carbono para a atmosfera seja nula.

5.2.3 Emissão de CO₂ para os veículos movidos por células a combustível de hidrogênio

Para a determinação das emissões de CO₂ relacionadas ao uso do hidrogênio como combustível para veículos automotores, deve-se verificar o ciclo de vida completo do mesmo, desde a sua produção até o seu uso final. Utilizando as informações dos protótipos das montadoras, como o consumo de hidrogênio por quilômetro, e a massa de CO₂ emitida para produção do gás, é possível calcular a emissão de CO₂ do ciclo completo. Os resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Emissão global de CO₂ para as células a combustível

País	kg CO ₂ /km
Brasil	0,056
EUA	0,396
Europa (OECD)	0,256

A importância desta análise é considerar, implicitamente, as eficiências dos sistemas de conversão de energia.

5.3 Comparação das emissões

Considerando o índice de emissão de 0,220 kg de CO₂/km para veículos médios movidos à gasolina (BERLOWITZ e DARNELL, 2000), é possível avaliar a emissão completa para a gasolina queimada em motores de combustão interna. Se somados os 0,049 kg de CO₂/km da fase de produção, a emissão total para a gasolina é de 0,269 kg de CO₂/km, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5: Emissão global de CO₂ para os combustíveis (g/km)

Fase do ciclo de vida/combustível	Gasolina	Hidrogênio		
		Brasil	EUA	Europa
Produção	0,049	0,056	0,396	0,256
Uso	0,220	-	-	-
TOTAL	0,269	0,056	0,396	0,256

Como a emissão durante a fase de uso dos veículos movidos por células a combustível é nula, a emissão total para estes veículos é representada pela emissão gerada na fase de produção de hidrogênio por eletrólise.

6 – ANÁLISES DOS RESULTADOS E IMPACTOS

A utilização de células a combustível tem sido fomentada devido ao fato de que a emissão de dióxido de carbono nos seus escapamentos é nula. Porém, conforme apresentado na tabela 5, uma análise completa das emissões de dióxido de carbono, englobando também a fase de produção do hidrogênio, apresenta o risco de uma visão míope para uma tecnologia que vem para reduzir os efeitos sobre o clima. A tabela 5 apresenta que, apesar de ter uma emissão nula de CO₂ durante o uso, as emissões durante a fase de produção podem ser muito maiores do que as da gasolina em todo o seu ciclo de vida.

Se países com uma matriz energética baseada no consumo de combustíveis fósseis, como EUA, Rússia, China e Índia, produzirem hidrogênio por meio da eletrólise, o resultado final poderá ser um aumento das emissões de dióxido de carbono na atmosfera. No caso dos EUA, este aumento corresponde a 47%, ou seja, é um resultado muito diferente daquele esperado pela população, pelos governos e pelas organizações não-governamentais.

No caso do Brasil, o resultado mostrado é diferente. Sustentado por uma matriz energética de origem hidráulica, a produção de hidrogênio por meio da eletrólise seria capaz de reduzir em 79% as emissões de CO₂.

7 – CONCLUSÕES

Apesar de não emitir CO₂ na fase de uso, os futuros veículo movidos por células a hidrogênio, sendo o hidrogênio produzido por eletrólise com energia elétrica proveniente de uma matriz fóssil, podem emitir mais gases de efeito estufa para a atmosfera do que os próprios veículos movidos por motores que utilizam combustíveis fósseis, como a gasolina, não sendo, portanto, capaz de reduzir os efeitos nocivos ao clima.

Um veículo movido por células a combustível de hidrogênio é capaz de emitir 396 g de CO₂/km, caso o hidrogênio seja produzido usando a energia elétrica da rede nos EUA, o que é 47% maior do que a emissão total de CO₂ durante a produção e queima da gasolina (269 g de CO₂/km).

Porém, para a produção de hidrogênio no Brasil, a emissão total de CO₂ é de 56 g de CO₂/km, ou 79% menor que as emissões dos veículos a gasolina, caracterizando-o como uma alternativa real para mitigar o efeito estufa.

As conclusões deste artigo são fortemente baseadas em suas hipóteses iniciais, que considera que todo hidrogênio é produzido por meio da eletrólise da água, e que a produção do hidrogênio poderá ser descentralizada, ou seja, o gás sendo produzido no seu ponto de consumo. Isso leva à conclusão de que não haverá transporte de hidrogênio até os postos de abastecimento. Caso isso não ocorra, torna-se evidente a necessidade de incorporar

novos cálculos, a fim de não gerar uma conclusão míope da realidade, uma vez que o hidrogênio deverá ser transportado pelas vias comuns de distribuição de combustível, ou através de dutos de distribuição do gás.

O hidrogênio, como combustível para as células a combustível, somente será capaz de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa se for produzido a partir de fontes renováveis de energia e matéria-prima, ou a partir da energia nuclear. Uma matriz energética como a brasileira, fortemente sustentada pela geração de energia elétrica por meio do uso de seu potencial hidráulico, é capaz de reduzir as emissões de dióxido de carbono provenientes dos veículos automotores leves em 79%.

A água, como fonte primária para a produção de hidrogênio, apresenta-se como a alternativa com melhores condições de se garantir a sustentabilidade energética a longo prazo, devido tanto ao seu ciclo natural quanto a sua capacidade de renovação. Porém, a produção de hidrogênio por eletrólise só se tornará ambientalmente viável quando novas tecnologias de geração renovável de energia elétrica forem capazes de suprirem à demanda adicional de energia.

Já a eletrólise, sendo realizada em países cujas matrizes energéticas são dependentes de combustíveis fósseis, não contribuirá para a redução das emissões de gases de efeito estufa, e em alguns casos, como nos EUA, podem até piorar o quadro atual. As emissões de dióxido de carbono aumentariam 47% para veículos com células a combustível de hidrogênio nos EUA, agravando ainda mais o cenário atual.

REFERÊNCIAS

- ASHLEY, S. **Fuel cells start to look real**. Disponível em: <<http://www.sae.org/automag/features/fuelcells/index.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2008.
- BERLOWITZ, P. J., DARNELL, C. P. **Fuel choices for fuel cell-powered vehicles**, SAE 2000 World Congress, Society of Automotive Engineering, Detroit, 2000.
- CHEHEBE, J. R. B. **Análise de Ciclo de Vida de Produtos**, Rio de Janeiro, Qualitymark Ed., 1998.
- FUEL CELL. **Vehicles from auto manufacturers**. Fuel Cells 2000 and US Fuel Cell Council. Disponível em: <<http://www.fuelcells.org/info/charts/carchart.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2008.
- GRISSON, V. I. **Salto para o infinito**. Rio de Janeiro, Bloch Editora, 1969.
- METZ, B., KUIJPERS, L., SOLOMON, S., ANDERSEN, S.O., DAVIDSON, O., PONS, J., JAGER, D., KESTIN, T., MANNING, M., MEYER, L. **IPCC/TEAP Special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons**. Cambridge University Press, 2005.
- PANIK, M. S., **Greenhouse gases are global**. North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance. Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/40/39763.pdf>>. Acesso em 28 set. 2008.

PEAVEY, M. A. **Fuel from water**. 9. ed. Merit Inc., Louisville, 2001.

RIFKIN, J. A **economia do hidrogênio**, São Paulo, Ed. Makron Books, 2003.

WEISS, M. A. Heywood, J.B., Drake, E.M., Schaefer, A., Auyeung, F.F. **On the Road in 2020: A life-cycle analysis of new automobile technologies**. Energy Laboratory Report MIT EL 00-003, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2000.

BIOGRAFIA

Cleber Eduardo Lorenzi é formado em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP)/1996, especialista em Certificação e Normalização em Atividades Espaciais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP)/2002, é mestre em Gerenciamento de Projetos pela George Washington University/2006 e mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos pelo Instituto Mauá de Tecnologia (IMT)/2009. É professor de Gestão Energética e Ambiental na Escola de Engenharia Mauá, e consultor de desenvolvimento de produto na Volkswagen do Brasil.

Roberto de Aguiar Peixoto é formado em Engenharia Naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1977), especialista em Administração de Energia na Indústria pelo Instituto de Engenharia de São Paulo (1984), especialista em Design of Thermal Systems pela Fundação para Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (1988), especialista em Otimização Energética e Econômica de Processos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1988), especialista em Análise Exergética de Processos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1988), mestre em Engenharia Naval e Oceânica pela Universidade de São Paulo (1987) e doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (1994). Atualmente é Professor Pleno do Instituto Mauá de Tecnologia e Consultor do Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento.