

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA O USO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL EM ÔNIBUS

Lúcia Bollini Braga
Antonio Carlos Caetano de Souza
José Luz Silveira
Julio Santana Antunes
lucia@feg.unesp.br
caetano@feg.unesp.br
joseluz@feg.unesp.br
santana@feg.unesp.br

Departamento de Energia, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos (www.feg.unesp.br/gose).

Rolando Zanzi
rolando@ket.kht.se

Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology.

Resumo: O aquecimento global é causado principalmente pela queima de combustíveis fósseis, que emitem toneladas de poluentes para o meio ambiente. Além disso, a certeza que esses combustíveis são não renováveis, contribuem com mais pesquisas no campo de energia limpa e fontes renováveis. Uma importante causa da emissão de poluentes está ligada aos veículos. Entre diversas tecnologias, a célula a combustível, que tem como maior vantagem o baixo impacto ambiental, associada a uma alta eficiência, é uma promissora tecnologia para geração de energia, principalmente em substituição aos motores de combustão interna, sendo então, considerada uma alternativa para os meios de transporte. As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que transformam energia química de um combustível diretamente em eletricidade de corrente contínua e de baixa tensão.

A célula a combustível PEM (Próton Exchange Membrane) é a melhor alternativa no presente para substituição de motores de combustão interna, além de ser pequena, traz uma combinação de durabilidade, alta densidade de potência, alta eficiência e trabalha em temperaturas relativamente baixas. Além disso, é de fácil acionamento e suporta as vibrações dos veículos.

Uma parte desse paper foi desenvolvido em Estocolmo onde já existem alguns ônibus operando pelo projeto CUTE (Clean Urban Transport for Europe) desde de janeiro de 2004. **Palavras chave:** Célula a combustível, Ônibus urbano, Hidrogênio, Motor de combustão interna, Análise Econômica.

TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSES OF FUEL CELL TO ELECTRICAL OPERATION IN URBAN BUSES

Abstract. The global warming and the decrease of life quality of population caused mainly by burning of fossil fuels that emit millions of tons of pollutants to the environment. Besides, the certainty that those fossil fuels are non-renewable resources allows more researches in cleaner energy, and particularly in vehicles. This way, fuel cell has received particular attention because it can be applied in urban transport and improves the actual environmental situation of the world.

The fuel cells appear like a promising technology for energy generation. Among several technologies in the present, the PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) is the most appropriated and take part of prototypes of vehicles in progress, because it combines durability, high power density, high efficiency, good response at room temperatures and it works at relatively low temperatures, besides that it is easy to turn it on and off and it is able to support present vibration in vehicles.

One part of this paper was developed in Stockholm, where there are some buses within the CUTE project that have been in operation since January 2004. **Keywords:** Fuel cell, Urban buses, Hydrogen, Internal combustion engine, Economic analyses.

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, podemos destacar dois pontos que impactam diretamente na pressão pelo desenvolvimento de novas tecnologias para combustível, que sejam mais eficientes tanto do ponto de vista energético como ambiental: o impacto no meio ambiente e a preocupação com as reservas naturais de petróleo.

Cada vez mais ganha repercussão em âmbito mundial a preocupação no que diz respeito às questões ambientais. Os efeitos do aquecimento global estão cada vez mais evidentes, com as mudanças climáticas ocorrendo no planeta devido à poluição e as constantes interferências do homem na natureza visando o progresso, causando com maior frequência catástrofes naturais.

No decorrer dos anos, diversas organizações não governamentais (ONGs) e a Organização das Nações Unidas (ONU) procuraram desenvolver conscientização mundial para a redução da emissão de poluentes, destacando a apresentação de fontes de energia renováveis tais como a eólica, solar, entre outras. Em 1997, os países desenvolvidos comprometeram-se através do protocolo de Kyoto a reduzir as emissões de gases de efeito estufa com o objetivo de levar os níveis de emissões em torno de 5% mais baixos que em 1990, nos anos de 2008 até 2012.

Uma das principais causas da poluição está ligada ao uso intensivo de derivados de petróleo nos veículos automotivos. Os países de 10 mundo são responsáveis por quase 70% das emissões.

No Brasil, as cidades de São Paulo (SP) e Rio de Janeiro (RJ) são as mais atingidas com este problema. São Paulo apresenta níveis de monóxido de carbono (CO) e dióxido de enxofre (SO₂) no ar que excedem bastante aos recomendados pela organização mundial de saúde. No Rio de Janeiro as maiores taxas de poluição são de matéria particulada e de SO₂.

Estudos realizados em São Paulo mostram que 94% das emissões de monóxido de carbono, 77% de hidrocarbonetos, 82% de óxido de nitrogênio, 73% de óxido de enxofre e 31% das matérias particuladas são de responsabilidade dos veículos motorizados. Destes, os automóveis são responsáveis por mais de 90% das emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos e mais de 60% das emissões de óxido de nitrogênio. Os ônibus, por sua vez, são os maiores responsáveis pela emissão de óxidos de enxofre e matéria particulada (Negromonte, 2008).

Figura 1 demonstra a contribuição dos veículos na poluição atmosférica da cidade de São Paulo.

Entre várias tecnologias no presente, as células a combustível surgem como uma promissora tecnologia para geração de energia alternativa, principalmente em substituição ao motor de combustão interna (MCI) e, portanto é considerada uma proposta para transportes (automotivo marinho e aéreo). O sistema de célula a combustível (FC) é muito eficiente e consiste em uma reação eletroquímica em substituição a combustão. Especificamente, água, energia e eletricidade são geradas através da reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio (Fuel Cell, 2008).

2. A CÉLULA A COMBUSTÍVEL

As células a combustível são em princípio, baterias de funcionamento contínuo. Existem hoje diversas tecnologias, mas elas possuem basicamente o mesmo princípio de funcionamento: Resumidamente, de um lado da célula entra o hidrogênio e do outro entra o oxigênio, conforme a Fig. 2.

O hidrogênio é oxidado a prótons num eletrodo de difusão gasosa, liberando elétrons, segundo a reação: (1) $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$.

No eletrodo oposto, também de difusão gasosa, considerando-se as células a membrana trocadora de prótons (meio ácido), tem-se a reação: (2) $O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$.

A reação global, que é acompanhada de liberação de calor, pode ser escrita da seguinte forma: (3) $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$.

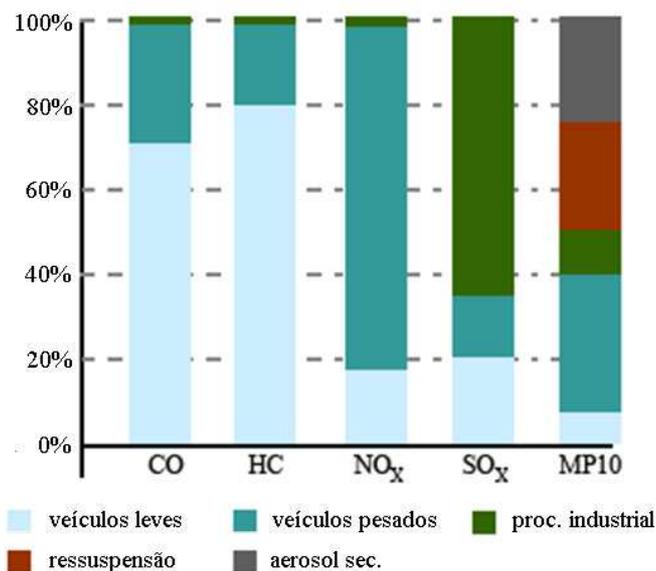


Figura 1: Emissões relativas de poluentes por fontes (USP, 2007).

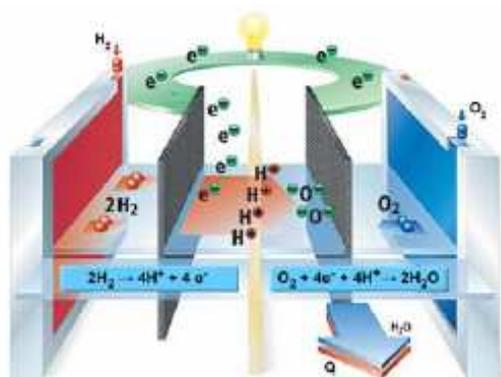


Figura 2: Desenho esquemático de uma célula a combustível (Ambiente Brasil, 2008).

Eletrodos de difusão gasosa são condutores eletrônicos permeáveis aos gases reagentes e são separados um do outro por um eletrólito (condutor iônico), de um modo que os gases não se misturem. O eletrólito pode ser um líquido, um polímero condutor de cátions, saturado com um líquido, ou um sólido. Devido à sua alta reatividade, hidrogênio é, hoje em dia, a escolha mais apropriada para o combustível. Geralmente, classificam-se os vários tipos de células a combustível pelo tipo de eletrólito utilizado e pela temperatura de operação (Gotz et al, 2000).

Na Fig. 3 estão representados os diferentes tipos de células a combustível, bem como suas características principais:

Dentre as diversas tecnologias hoje existentes, conforme foi apresentado na Fig. 3, as células PEM (membrana de troca protônica) são as mais indicadas e fazem parte dos protótipos de veículos automotores. Esse tipo de célula combina durabilidade, alta densidade de potência, alta eficiência, tem boa resposta em temperaturas normais e opera em temperaturas relativamente baixas. Além disso, é de fácil acionamento e desligamento, e é robusta, suportando as vibrações presentes nos veículos.

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de Temp. (°C)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Alcalina (AFC)	KOH (OH ⁻)	60 – 90	- Alta eficiência (83% teórica)	- Sensível a CO ₂ - Gases ultra puros, sem reforma do combustível	- Espaçonaves - Aplicações militares
Membrana (PEMFC)	Polímero: Nafion® (H ₃ O ⁺)	80 - 90	- Altas densidade de - Operação flexível	- Custo da membrana potência e eficiência - Contaminação do catalisador com CO	- Veículos automotores e catalisador - Espaçonaves - Mobilidade
Ácido fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₄ (H ₃ O ⁺)	160 - 200	- Maior desenvolvimento tecnológico	- Controle da porosidade do eletrodo - Sensibilidade a CO - Eficiência limitada pela corrosão	- Unidades estacionárias - Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) - Cogeração eletricidade/calor
Carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos Fundidos (CO ₃ ²⁻)	650 - 700	- Tolerância a CO/CO ₂ - Eletrodos à base de Ni	- Problemas de materiais - Necessidade da reciclagem de CO ₂ - Interface trifásica de difícil controle	- Unidades estacionárias de algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor
Cerâmicas (SOFC)	ZrO ₂ (O ²⁻)	800 – 900	- Alta eficiência (cinética favorável) - A reforma do combustível pode ser feita na célula	- Problemas de materiais - Expansão térmica - Necessidade de pré-reforma	- Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor

Figura 3: Tabela dos principais tipos de células a combustível (Gotz et al, 2000).

A maioria das células destinadas ao uso em veículos gera tensões menores que 1.16 V. Valor muito abaixo da tensão necessária para o acionamento de um veículo. Desta forma, múltiplas células devem ser montadas dentro de uma “stack” (pilha de célula a combustível) (Farias, 2004).

3. HIDROGÊNIO

O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo (75%) e também o terceiro elemento mais presente na Terra. É incolor e inodoro.

Este elemento tem excelentes propriedades tanto como combustível (Um quilo de hidrogênio possui aproximadamente a mesma energia que 3,5 litros de petróleo ou 2,1 quilos de gás natural ou 2,8 quilos de gasolina) quanto como transmissor de energia. Pode ser obtido por múltiplas formas bastante eficazes: por eletrólise da água; por reforma de álcool e hidrocarbonetos (metanol, etanol, metano, gás natural e outros), etc. Assim, é considerado por muitos o “combustível ideal”.

Quando combinado com uma célula de combustível, o hidrogênio oferece uma produção de eletricidade silenciosa e de alta eficácia. O Hidrogênio, quando produzido por fontes de energia renováveis, a sua utilização através de células a combustível, é totalmente limpa, formando apenas como produtos da reação água e calor, não havendo quaisquer emissões de partículas, monóxido de carbono, dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NOX) e óxidos de enxofre (SOX), que são responsáveis por problemas ambientais tais como chuvas ácidas, problemas respiratórios e pelo aquecimento global do planeta.

Sendo assim, o hidrogênio tem um grande potencial ambiental, fazendo parte de um ciclo de vida limpo, tornando-se um sério candidato a substituir a atual economia baseada nos combustíveis fósseis (Hidrogênio, 2007).

3.1. Alguns Processos de Produção de Hidrogênio

3.1.1. Eletrólise da Água

A eletrólise faz uso da eletricidade, oriunda de uma fonte externa, para romper a água em átomos de hidrogênio e oxigênio, passando por ela uma corrente elétrica. Seu funcionamento consiste de dois eletrodos, um negativo (ânodo) e outro positivo (cátodo) que são submersos em água pura, podendo obter uma maior condutibilidade ao utilizar um eletrólito, tal como um sal, melhorando a eficiência do processo. A corrente elétrica quebra as ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e o de oxigênio e separa os componentes atômicos. O hidrogênio se concentra no cátodo e o ânodo atrai o oxigênio.

Mas a ligação entre o hidrogênio e o oxigênio é muito estável, sendo difícil de quebrá-la. A eletrólise não tem sido muito utilizada porque os custos da eletricidade usada no processo impedem que ela concorra com o processo de reforma a vapor do gás natural e futuramente com o de etanol. A produção de H₂ via eletrólise pode custar até dez vezes mais que a reforma a vapor de gás natural e três vezes mais que a reforma da gasolina (Souza, 2005).

3.1.2. Reformador de Hidrogênio

A reforma pode ser definida como o processo em que um combustível rico em hidrogênio é posto em reação com o vapor em altas temperaturas, libertando hidrogênio. O equipamento responsável pela reforma é o reformador. Um combustível ao passar pelo reformador tem o Hidrogênio extraído e purificado, atendendo as condições de operação de cada tipo de célula.

Considerando-se os principais combustíveis fósseis, o metano (gás natural) é o mais fácil para produzir hidrogênio, pois seu custo é baixo e de fácil tratamento industrial, além de ter o maior teor de hidrogênio. O petróleo tem o segundo maior teor de hidrogênio e sua reforma é um pouco mais difícil industrialmente.

Os processos dentro de um reformador são três e estão determinados a seguir: Limpeza do Combustível: Remoção de enxofre e amônia para prevenir a degradação do reformador e da célula a combustível;

Conversão do Combustível: Conversão do combustível em um gás reformado rico em Hidrogênio e que contém CO, CO₂, e H₂O (vapor);

Alteração do gás reformado: Conversão do monóxido de carbono (CO) e água (H₂O) em H₂ e CO₂, através da reação de simples troca, e oxidação seletiva para redução CO a uma baixa ppm, ou remoção de água por condensação para o aumento da concentração de H₂. Um reformador é uma unidade integrada constituída de um ou mais processos descritos acima para atingir as especificações da célula em questão (Souza, 2005).

4. INTERESSE DO USO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL EM ÔNIBUS

O veículo automotor proposto para a aplicação da célula a combustível, nesse trabalho foi o ônibus urbano, apesar da possibilidade de aplicação de células em outros meios de transporte, isso se deu aos fatos de:

- As dimensões e estrutura do ônibus permitem a instalação da célula a combustível e seus acessórios, como o tanque de hidrogênio (se fosse armazenado em forma gasosa no ônibus). O percentual em peso desse conjunto, célula a combustível e tanque, no ônibus seria menor se comparado com carro privados;

- A razão potência do motor e peso do veículo é baixa que de um carro: Um ônibus com 18 toneladas com velocidade média de 70 km/h tem uma potência de 150 kW;
- Os ônibus circulam nos centros e áreas urbanas, onde a poluição do ar é mais concentrada;
- A tecnologia de células a combustível, no presente, ainda é muito mais cara que o tradicional motor de combustão interna. Ônibus são comprados e administrados em frotas e isso permite uma redução do custo de investimento e manutenção;
- O serviço de transporte urbano é usualmente administrado por um órgão público que tem um interesse maior na conquista de benefícios sociais e que se interessa menos por um retorno do investimento em curto prazo;
- Algumas características do sistema de célula a combustível são particularmente mais interessantes a ônibus: o motor é silencioso, ausência de vibrações e o motor elétrico têm uma suave operação, causando um aumento do conforto dos usuários (Bertonasco et al, 2002).

5. O PROJETO CUTE E ÔNIBUS MOVIDO A HIDROGÊNIO EM ESTOCOLMO

Na Europa está o maior programa de célula a combustível, o CUTE (“Clean Urban Transport for Europe” - Transporte Urbano Limpo para a Europa), o projeto envolve 27 ônibus, que rodam dia e noite desde 2004. Nove cidades européias estão envolvidas no projeto (Amsterdã, Barcelona, Madri, Hamburgo, Stuttgart, Londres, Luxemburgo, Porto e Estocolmo) cada uma com seus veículos e tendo um foco de estudo próprio. Os ônibus são baseados num ônibus convencional urbano Mercedes-Benz Citaro de piso baixo, comprimento de 12 metros, conforme a Fig. 4.



Figura 4: Ônibus Mercedes-Benz Citaro movido a FC (Alvfors et al,2005).

O motor de combustão interna foi substituído por um motor central elétrico, que aciona uma caixa de engrenagens padrão. Similar à configuração de um ônibus convencional os auxiliares do motor, ao invés de serem acionados mecanicamente, são acionados eletricamente, via uma caixa adicional especial na parte traseira do ônibus. O sistema de FC e o tanque de hidrogênio foram colocados no teto do ônibus, tanto por questões de espaço como segurança.

Em Estocolmo foi realizada uma pesquisa de opinião pública entre os motoristas de ônibus operando com FC, fazendo uma comparação com os ônibus tradicionais movido à diesel, conforme a Fig. 5. As repostas foram positivas.

6. ANÁLISE ECONÔMICA

Esta seção tem como propósito comparar economicamente um ônibus movido à célula a combustível com um que utiliza um motor de combustão interna.

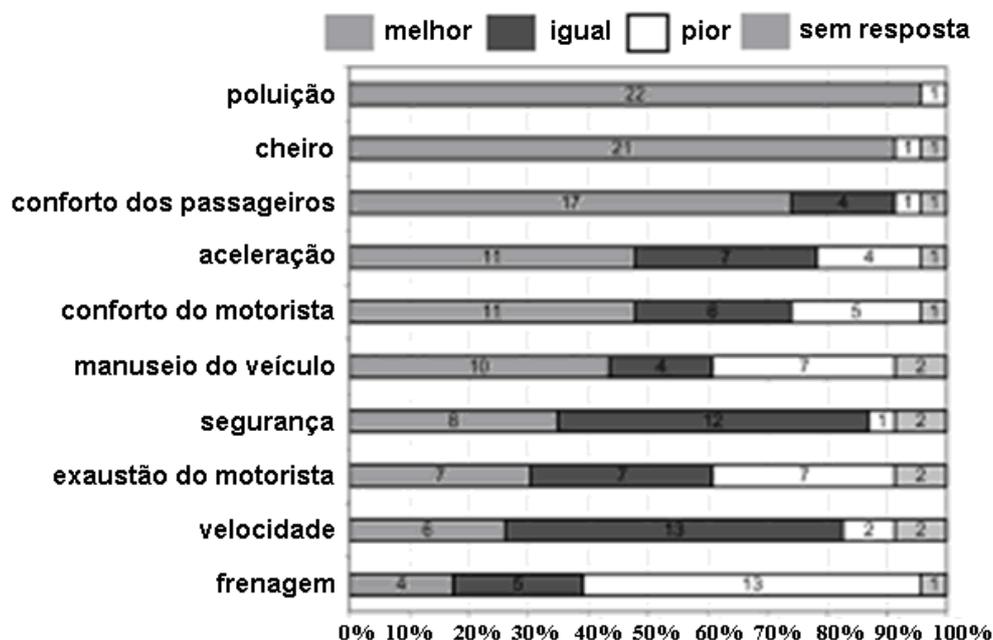


Figura 5: Pesquisa com motoristas de ônibus movidos à FC em Estocolmo (Alvfors et al, 2005).

A metodologia utilizada como base para a análise econômica foi a bibliografia de Torres (2002) e Silveira et al (2006).

Já o custo do hidrogênio (com correção de inflação), foi obtido pelo o estudo econômico de Padró et al (1999), conforme a Fig. 6, considerando grandes produções (plantas de hidrogênio com custo estimado para 2010) em torno de 1.34 a 25.4 milhões Nm³/dia. Foi utilizado para efeito de comparação o custo médio do hidrogênio através da eletrólise (CE H₂ = 0,17 US\$/m³), o custo médio do hidrogênio a partir da reforma por gás natural (CR H₂ = 0,09 US\$/m³) e o custo do diesel (CD = 0,92 US\$/l), neste caso desconsiderando-se os efeitos do impacto ambiental no custo.

Esses custos foram convertidos para US\$/kWh levando em conta o poder calorífico inferior do hidrogênio e do diesel, e obteve-se 0,06 US\$/kWh, 0,03 US\$/kWh e 0,09 US\$/kWh, respectivamente.

Para o prosseguimento da análise, outros parâmetros foram considerados:

- Investimento em célula a combustível (IFC) = US\$ 2500/kW (Neto, 2005)
- Investimento em um motor a combustão interna (IMCI) = US\$ 1000/kW (Neto, 2005)
- Eficiência da FC e do MCI: $\eta_{FC} = 48\%$ e $\eta_{MCI} = 27\%$ (Neto, 2005)
- Potência elétrica da FC e potência do MCI: WFC = 250 kW e WMCI = 175 kW (Neto, 2005)
- Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio e do Diesel, respectivamente: PCIH=19.742,48 kJ/kg e PCID = 42552,40 kJ/kg;
- Vida útil do ônibus: $\Delta S = 1.500.000$ km (Ministério das Minas e Energia, 2001) Período equivalente de operação: H = 4.800 h/ano e H = 3000 h/ano (Considerando o veículo rodando 16h/dia e 10h/dia por 300 dias respectivamente).

As equações utilizadas são citadas abaixo:

$\dot{m} = \frac{w}{\eta \cdot PCI} \cdot 100 \quad (4)$	$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (5)$	$f = \frac{q^k \cdot (q-1)}{q^k - 1} \quad (6)$
$C_{icv} = \frac{I \cdot f \cdot w}{H \cdot \Delta S} \quad (7)$	$C_f = \frac{C_{comb} \cdot PCI \cdot \dot{m}}{\Delta S} \quad (8)$	$C_{total} = (0,1 \cdot C_{icv}) \quad (9)$

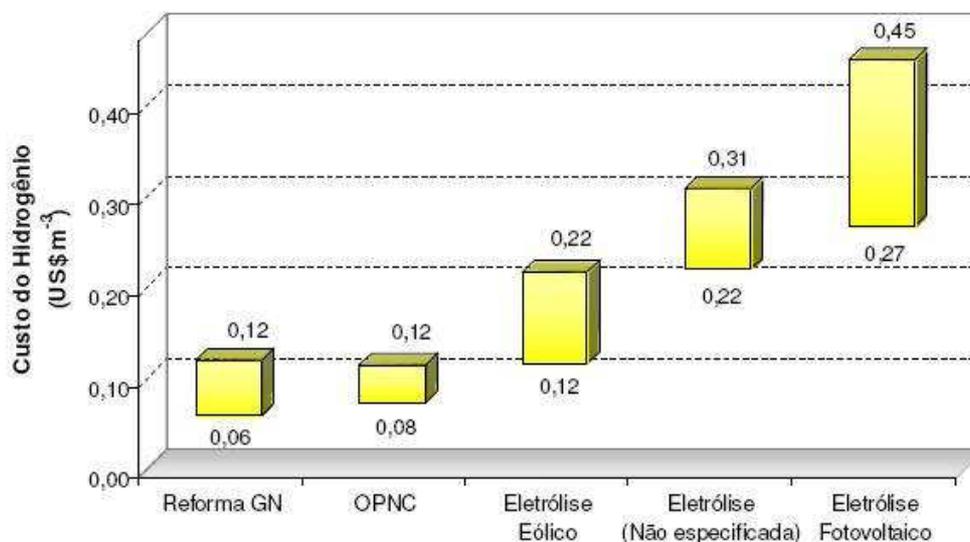


Figura 6: Comparativo do custo do hidrogênio (Padró et al,1999)

A equação global para o custo do transporte urbano é apresentada abaixo:

$$C_T = \left(\frac{I \cdot f \cdot w}{H \cdot \Delta S} \right) + \left(\frac{C_{comb} \cdot PCI \cdot m}{\Delta S} \right) + 0.1 \cdot \left(\frac{I \cdot w}{H \cdot \Delta S} \right) \quad (10)$$

onde:

-
-

- m = fluxo de massa (kg/s);
- r = taxa anual de juros (%).
- f = Fator de anuidade (1/ano);
- k = período de amortização (ano);
- $C_{inv}, f, main$ = Custos parciais do transporte urbano: investimento, de operação e manutenção, respectivamente (US\$/km.h);
- C_{comb} = Custo do combustível (US\$/kWh);
- H = Período equivalente de utilização do transporte urbano (h/ano);
- CT = Custo total do transporte urbano com sistema de célula a combustível ou com MCI (US\$/km.h);

Os gráficos das Figs. 7 e 8 mostram que, comparativamente, o sistema de célula a combustível se torna mais viável em relação ao MCI de acordo com o aumento do tempo de amortização do investimento. Afinal, quanto maior o tempo de amortização, os custos com o investimento e manutenção, que são maiores no sistema de célula a combustível, diminuem. Pela Fig. 7, onde $H = 3000$ h/ano, observa-se que apesar do investimento inicial ser maior nos sistemas de FC, a partir do 5º ano passa-se a gastar menos com o sistema de FC operando com hidrogênio a partir da reforma do gás natural. Essa mudança é mais rápida com o ônibus operando 4800 h/ano, como mostra a Fig. 8, onde logo o 3º ano já se observa um custo inferior no sistema de FC operando com hidrogênio a partir da reforma do gás natural. Isto se deve ao fato do consumo de combustível (massa calculada) ser maior no sistema MCI.

Agora efetivamente para a análise de viabilidade econômica (Figs. 9 e 10) entre um ônibus movido por célula a combustível e um ônibus movido por MCI, é utilizada a Eq. 11, que representa a economia anual nos gastos operacionais (manutenção, combustível e investimento a ser amortizado), em US\$/ano (Neto, 2005)

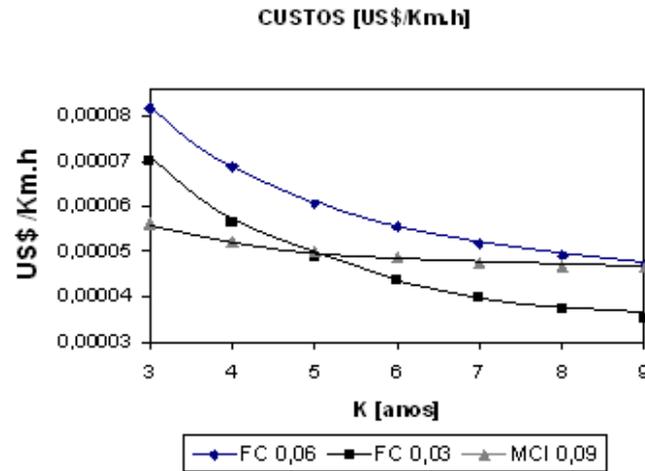


Figura 7: Custos para os sistemas utilizando FC e MCI [US\$/km.h], tomando como base H = 3000 h/ano

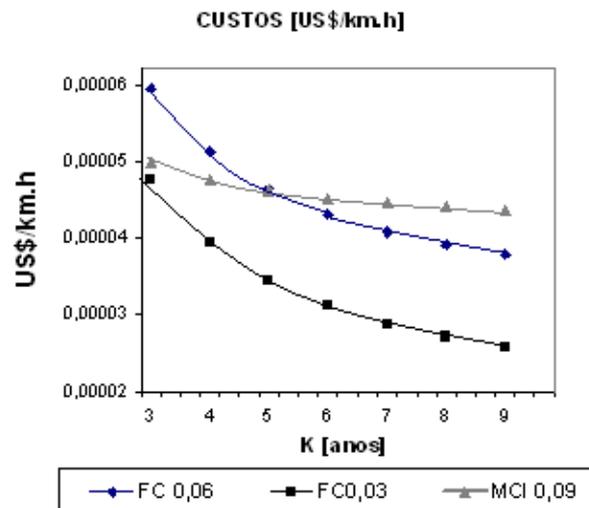


Figura 8: Custos para os sistemas utilizando FC e MCI [US\$/km.h], tomando como base H= 4800 h/ano.

$$R = (C_{MCI} - C_{FC}) \cdot H \cdot \Delta S \quad [\text{US\$/ano}] \quad (11)$$

Analisando os gráficos das Figs. 9 e 10, podemos observar que o sistema a célula a combustível só passa a ser viável em relação ao MCI quando a curva ultrapassa o eixo X, ou seja, quando a economia passa a ser positiva. Tomando como exemplo, a curva da célula a combustível com custo de hidrogênio de US\$ 0,06/kW, o sistema passa a ser viável apenas se o tempo de amortização for superior a 5 anos, com H = 4800 h/ano.

Outro ponto importante que podemos observar é que quando o veículo é utilizado por mais horas ao longo do ano (4800 h contra 3000 h), ele passa a trazer um melhor custobenefício, já que o custo com o investimento cai com a maior utilização e o custo do combustível se torna mais presente.

Vale ressaltar que para esta análise econômica não são levados em conta fatores como ganhos ambientais, por exemplo.

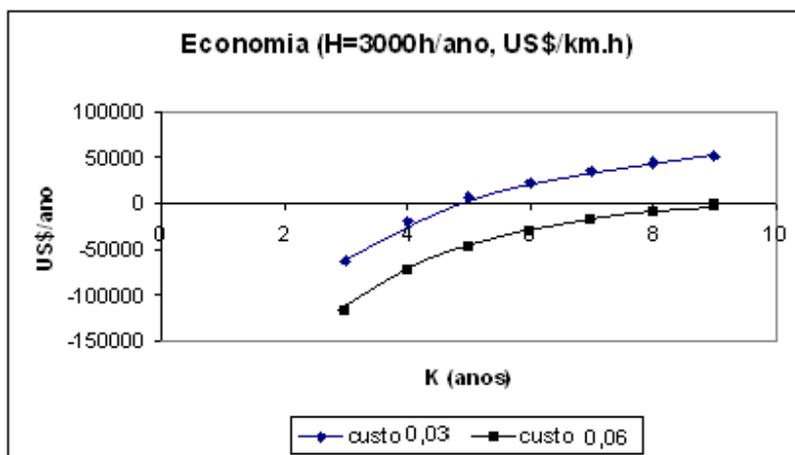


Figura 9: Economia anual esperada em função do custo em US\$/km.h, para H = 3000 h/ano.

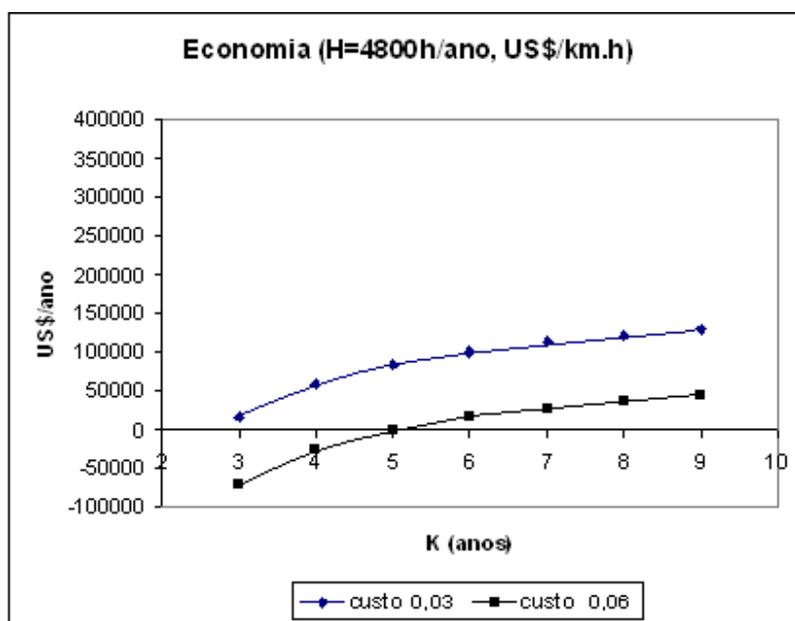


Figura 10: Economia anual esperada em função do custo em US\$/km.h, para H = 4800h/ano.

7. CONCLUSÕES

O pano de fundo que propiciou o estudo das características da célula a combustível realmente é a atual situação ambiental do planeta. Deste estudo pode-se concluir que as células a combustível surgem como uma tecnologia realmente promissora.

O foco ao acionamento elétrico de ônibus urbano foi pelo fato dos transportes coletivos representarem uma grande parte da emissão de poluentes, e pelo fato de poderem se instalar protótipos nas frotas para a realização de testes com maior facilidade. Comparativamente aos motores de combustão interna, os veículos a célula a combustível apresentam diversas vantagens:

- Não requer combustão, realizando a conversão direta de energia, o que diminui drasticamente a emissão de poluentes, o uso de energia e promove o uso de combustíveis alternativos;
- Os motores a combustão diesel têm eficiência de 27%, enquanto nos sistemas a célula a combustível a é de 48%;
- Com o controle eletrônico da aceleração e frenagem, o veículo é silencioso e sem “trancos”;

- Para aplicações automotivas, os sistemas de célula a combustível ainda não são competitivos com o MCI a curto prazo.

Apesar das diversas vantagens, ainda existem algumas barreiras que precisam ser quebradas para os transportes competirem com os movidos a MCI. Peso e volume são obstáculos a serem contornados. O necessário é, inicialmente, um mercado suficiente para justificar os investimentos para um desenvolvimento em longo prazo e o aumento de produção a níveis aceitáveis para custo, viabilidade e segurança. Conforme o estudo da viabilidade econômica, as células a combustível ainda não são, a curto prazo, competitivas com o MCI sendo que a economia só será visível com o tempo de amortização relativamente grande, isto devido aos altos investimentos ainda necessários para embarcar nesta tecnologia.

8. BIBLIOGRAFIA

Alvfors P., Saxe M., Folkesson A., Haraldsson K., A first Report on the Attitude Towards Hydrogen Fuel Cell Buses in Stockholm. International Journal of Hydrogen Energy, 2005.

Ambiente Brasil, Célula a Combustível, 2008: <http://www.ambientebrasil.com.br>. Consultado em 14 de Novembro de 2008.

Bertonasco A, Santarelli M.G.L, Cali M. Different fuelling Technologies for Urban Transport bus Service in an Italian Big Town: Economic, Environmental and Social considerations. Energy Conversion and Management, 2002.

Farias T.L., Hidrogênio e as Pilhas de Combustível: Perspectivas de Aplicação ao Sector de Transportes. Seminário Sobre Desenvolvimento Sustentável, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal, 2004: http://seminarios.ist.utl.pt/04-05/des/material/ffarias_mob.pdf. Consultado em 11 de Outubro de 2008.

Fuel Cell, 2008: <http://www.fuelcells.org>. Consultado em 02 de Setembro de 2008. Gotz M., Linardi M., Wendt H., Tecnologia de Células a Combustível. Química Nova 23(4), 2000

Hidrogênio, 2007: <http://www.notapositiva.com>. Consultado em: Novembro de 2008. Ministério das Minas e Energia, Hydrogen Fuel Cell Buses For Urban Transport. Brasília, 2001. 154p.: http://www.pnud.org.br/projetos/meio_ambiente. Consultado em: 07 de Julho de 2008.

Negromonte B., Transporte e Poluição do ar, 2008: <http://escolasaberviver8ano.blogspot.com>. Consultado em 22 de Agosto 2008.

Neto, E.F.G. Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: H2 Fuel Cell Energy, 2005. 240p. Padró C.E.G and Putsches V., Survey of Economics of Hydrogen Technologies, National Renewable Energy Laboratory, available by DOE (Department of Energy), September 1999.

Silveira, J.L.; Souza, A.C.C.; Sosa, M.I. Physical-Chemical and Thermodynamic Analyses of Ethanol Steam Reforming for Hydrogen Production. Journal of Fuel Cell Science and Technology (Online), v. 3, p. 346-350, 2006.

Souza. A.C.C. Análise Técnica e Econômica de um Reformador de Etanol para Produção de Hidrogênio. Guaratinguetá, 2005. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista.

Torres, F.S. Análise Técnica e Econômica de Células de Combustível Aplicadas a Veículos Automotores. Guaratinguetá, 2002. 82p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista.

USP. O preço da Poluição, 2007: <http://www.usp.br/espacoaberto/arquivo/2007>. Consultado em 24 de Outubro de 2008.