

Análise Econômica e Ecológica de Ônibus Urbano Acionado com Célula a Combustível.

Lúcia Bollini Braga

Ronney Arismel Mancebo Bolloy

Marcio Evaristo da Silva

José Luz Silveira

Júlio Santana Antunes

UNESP - Universidade Estadual Paulista

Abstract

This work aims to assess economically and ecologically aspects of urban buses moved by fuel cell. The economic analysis will compare buses moved by internal combustion engine feed by diesel and buses moved by fuel cell and hydrogen produced from several kinds of production: natural gas steam reforming, ethanol steam reforming, electrolyze by wind turbine and electrolyze by hydroelectric power plant. The main reason for the study of the replacement of internal combustion engines vehicles by fuel cells vehicle is the reduction of pollutants emission. The fuel cells vehicles does not emit pollutants directly, the great emission of this technology is linked with hydrogen production, due to hydrogen not exist how primary energy source in nature, needin, then, be obtained by processes that require energy consumption and consequently emit pollutants. Thus, the fuel cell hydrogen must be produced in a sustainable way. The ecological analysis will be performed by the calculation of ecological efficiency, pollution indicator and CO₂ equivalent, evaluating how polluter are hydrogen production process already mentioned above and indicating which method is more ecologically feasible.

Keywords : *Hydrogen, Ecological efficiency, Urban buses, Economic analysis.*

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar economicamente e ecologicamente ônibus urbano acionado com célula a combustível. A análise econômica será comparativa entre ônibus urbano acionado com motor de combustão interna, utilizando diesel e ônibus acionado com célula a combustível com hidrogênio proveniente de diversas fontes: reforma a vapor do gás natural, reforma a vapor do etanol, eletrólise por turbina eólica e eletrólise por água vertida em hidrelétrica (Usina Itaipú-Brasil). O principal motivo do estudo de substituição dos veículos de motor combustão interna por veículos movidos com células a combustível é a diminuição da emissão de poluentes. Veículos com célula a combustível não emitem poluentes, e emissão nesse tipo de tecnologia está na forma de produção do hidrogênio, já que este não se apresenta como fonte de energia primária na natureza, necessitando, então, ser obtido por processos que exigem consumo de energia e conseqüentemente emitem poluentes. Assim, o hidrogênio que alimenta a célula deve ser produzido de maneira sustentável. A análise ecológica se baseia na determinação da eficiência ecológica, que é função das emissões de CO₂, NO_x, SO_x e Material Particulado nos processos de produção de hidrogênio, indicando qual método é mais viável ecologicamente.

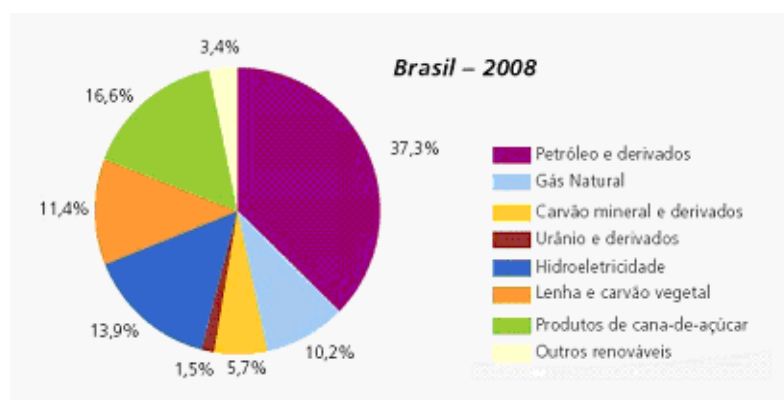
Palavras chaves: Hidrogênio, Eficiência ecológica, ônibus urbano, Análise econômica.

1. Introdução

A melhoria do cenário mundial do planeta e do padrão de vida da humanidade, requer qualidade de energia distribuída, e também nos serviços oferecidos para o uso dessa energia. É necessário que esse processo ocorra de forma sustentável e atualmente as maiorias dos modelos energéticos são dependentes de combustíveis fósseis, que em seus usos geram poluentes; outro fato a se considerar estão relacionados aos fatores estratégicos e econômicos, pois as jazidas de petróleo estão concentradas em poucas regiões do mundo e seus preços estão sujeitos a alterações. Todos esses fatores contribuem para o desenvolvimento de novas tecnologias para a geração de energia, de modo a buscar uso mais eficiente dos recursos naturais e uso de recursos renováveis, menos agressivos ao meio ambiente. Dentre as principais fontes de poluição do ar destacam-se as emissões veiculares, como é o caso do diesel, principal combustível utilizado no transporte coletivo, que afeta principalmente os grandes centros urbanos (Estudos Tecnológicos, 2010).

Segundo dados de 2008 do Ministério das Minas e Energia (MME), a Matriz Energética Brasileira é composta por 37,3% de petróleo e seus derivados, 10,2 % de gás natural, 5,7% de carvão mineral, 1,5% de urânio e derivados, 13,9% de hidroeletricidade, 11,4% de lenha e carvão vegetal e 16,6% de produtos de cana de açúcar e de outras fontes renováveis, conforme mostra a Figura 1 (Ministério das Minas e Energia [MME], 2010). Desses 37,3 % de petróleo na matriz energética brasileira, cerca de 34% é processado para a produção de diesel, devido ao grande consumo do mercado nacional, já que no Brasil, a maioria dos meios de transporte de carga ou os coletivos, utilizam motores de ciclo diesel (Estudos Tecnológicos, 2010).

Figura 1: Matriz energética brasileira (MME, 2010).



Neste contexto surgem as células a combustíveis (CC) como tecnologia alternativa para geração de energia de forma mais sustentável, principalmente em substituição ao motor de combustão interna (MCI). As células a combustível são equipamentos capazes de converter a energia química de certos combustíveis em energia elétrica, sem a necessidade de combustão, com maior eficiência e menores emissões de poluentes. O combustível para as células é o hidrogênio, que pode ser produzido por uma variedade de recursos fósseis (carvão, petróleo e gás natural), renováveis (biomassa), e a partir de eletricidade, por eletrólise da água, usando energias renováveis (como eólica, fotovoltaica, hidráulica,

geotérmica ou outras e preferencialmente energia que seria desperdiçada em hidrelétricas – Caso de verter água) (Johansen, 2006) (Silveira et al., 2009).

1.2. Uso de Célula a Combustível em Ônibus Urbano

O veículo automotor proposto para a realização desse trabalho foi o ônibus urbano, apesar da possibilidade de aplicação de células em outros meios de transporte. Isso pelos seguintes fatos (Silveira et al., 2009):

- 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);
- A razão potência do motor e peso do veículo é mais baixa que de um carro comum, já que um ônibus com 18 toneladas com velocidade média de 70 km/h apresenta uma potência de 150 kW;
- Os ônibus circulam nos centros e áreas urbanas, onde a poluição do ar é mais concentrada;
- 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;

2. Análise Econômica

A análise econômica comparativa entre transporte urbano movido com CC e com MCI, foi baseada na metodologia desenvolvida por Silveira y Gomes et al (1999). Foi considerado, como combustível da CC, hidrogênio proveniente de quatro fontes diferentes: eletrólise com energia eólica, eletrólise com energia de hidroelétrica (caso de verter água), reforma a vapor de etanol (cana de açúcar) e reforma a vapor de gás natural. O custo de hidrogênio produzido considerando processo de reforma a vapor de etanol é 0,08US\$/m³ (Souza, Silveira y Sosa, 2006). Os custos do hidrogênio produzido por eletrólise com energia eólica é 0,225US\$/m³ e por reforma a vapor de gás natural é de 0,12 US\$/m³ (Padró y Putschers, 1999).

No caso de eletrólise considerando a produção em larga escala (plantas com capacidade entre 1,34 até 25,4 milhões Nm³/dia), o custo de hidrogênio por eletrólise com energia de hidrelétrica é 0,133 US\$/m³, determinado a partir do método de Ferreira et al (2003), considerando energia vertida e turbinável de Itaipu, com dados de investimento e tarifas de 2010. O custo do diesel é 1,14 US\$/l (Agência Nacional de Petróleo [ANP], 2009), para uma cotação do dólar de 30/12/2009 (Valor Online, 2009).

Convertendo os custos anteriores de produção de hidrogênio para US\$/kWh, levando-se em conta o poder calorífico inferior do mesmo, tem-se 0,02702 US\$/kWh, 0,0766US\$/kWh, 0,044978 US\$/kWh, 0,04054US\$/kWh e 0,11 US\$/kWh, respectivamente, para hidrogênio obtido de reforma a vapor de etanol, eletrólise de energia eólica, eletrólise de hidrelétrica, reforma a vapor de gás natural e para o diesel (neste ultimo caso considerando o PCI do Diesel).

Para o prosseguimento da análise, outros parâmetros foram considerados.

- Investimentos em células a combustível (ICC) de US\$ 2000/kW, US\$ 4000/kW e US\$ 6000/kW de acordo com Torres (2002), Doty (2004) e Neto (2005);
- Investimento em motor a combustão interna (IMCI) = US\$ 1000/kW (Neto, 2005);
- Eficiência da CC e do MCI: $\eta_{CC} = 48\%$ e $\eta_{MCI} = 27\%$ (Neto, 2005);
- Potência elétrica da CC e potência do MCI: $W_{CC} = 250$ kW e $W_{MCI} = 175$ kW (Neto, 2005);
- Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio e do Diesel, respectivamente: $PCIH = 119742,48$ kJ/kg e $PCID = 42552,40$ kJ/kg (Vilela, 2007);
- Período equivalente de utilização: $H = 4.800$ h/ano (16 h por dia por 300 dias);
- Período de amortização de capital (k) variando de 1 a 10 anos;
- Taxa anual de juros foi de 8% ao ano.

As seguintes equações podem ser utilizadas:

$$m = \frac{W}{\eta \cdot PCI} \cdot 100 \quad (6.1) \quad q = 1 + \frac{r}{100} \quad (6.2) \quad f = \frac{q^k \cdot (q - 1)}{q^k - 1} \quad (6.3)$$

Para o cálculo do custo do transporte urbano em US\$/kWh, considerou-se o custo de investimento no ônibus, o custo do combustível e custo de manutenção, representados pelos primeiro, segundo e terceiro termos da equação global, respectivamente, sendo que, o custo de manutenção considerado foi 10% do custo de investimento no ônibus. A equação global é mostrada abaixo (6.4):

$$C_{\text{ônibus}_2} = \left(\frac{I \cdot f}{H} \right) + \left(\frac{C_{\text{comb}} \cdot PCI \cdot m}{W} \right) + 0,1 \cdot \left(\frac{I \cdot f}{H} \right) \quad (6.4)$$

Substituindo-se os valores, chega-se aos resultados mostrados nas figuras a seguir:

Figura 2. Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 2000 US\$/kW

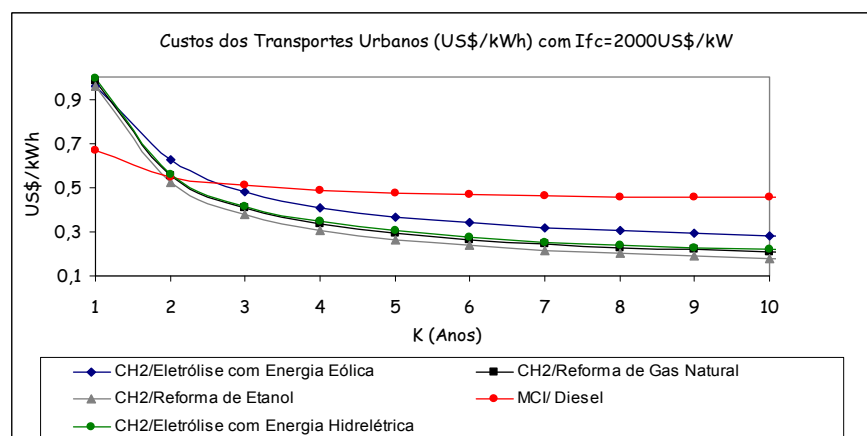


Figura 3. Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 4000 US\$/kW

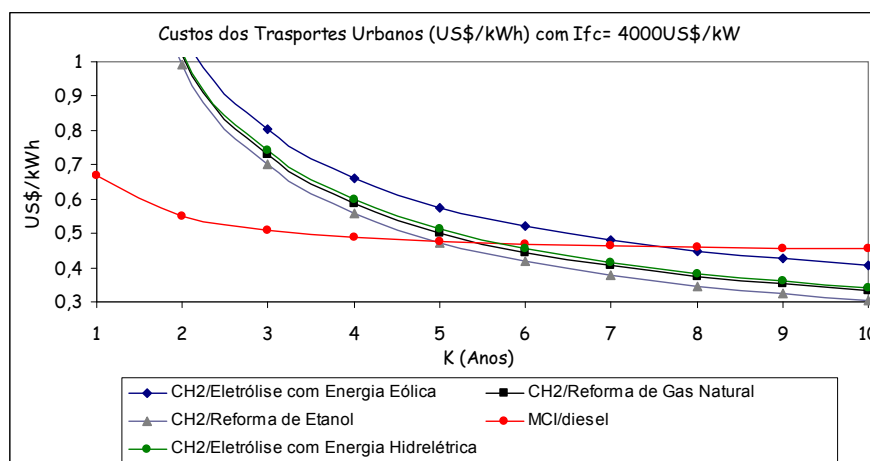
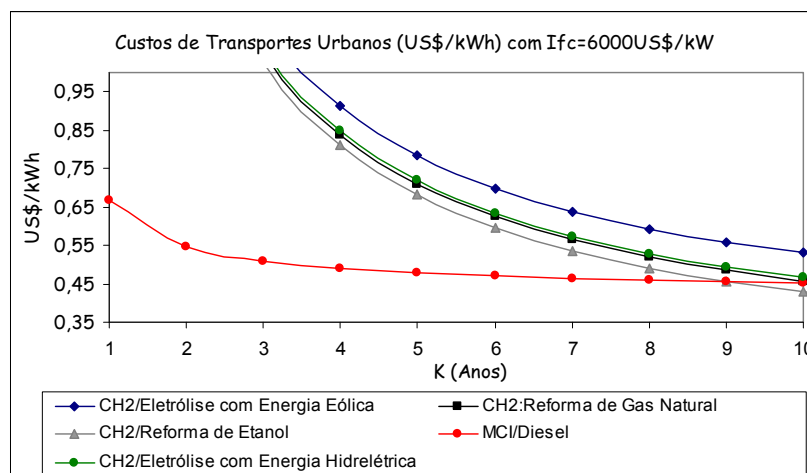


Figura 4. Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 6000 US\$/kW



Da figura 2 (com um investimento 2000 US\$/kW), o ônibus movido com hidrogênio obtido a partir de reforma a vapor de etanol torna-se mais viável que um ônibus movido com MCI (diesel) no período de amortização compreendido entre 1 e 2 anos. Os ônibus movido com hidrogênio provenientes de gás natural, eletrólise com água vertida em hidrelétrica e eletrólise por turbina eólica, tornam-se mais viáveis que um ônibus movido com MCI a partir de 2 anos. Da figura 3 (com um investimento 4000 US\$/kW), um ônibus movido com hidrogênio produzido a partir de reforma a vapor de etanol, torna-se mais viável que um ônibus com MCI a partir de 5 anos, sendo que para ônibus com hidrogênio proveniente de gás natural e de eletrólise com energia de hidrelétrica existe viabilidade a partir de

aproximadamente 5,5 anos, enquanto que para ônibus movido com hidrogênio proveniente de eletrólise com energia eólica a partir de 7,8 anos. Analisando a figura 4 (investimento de 6000US\$/kW), pôde-se observar que o custo do transporte urbano operando com hidrogênio a partir de reforma a vapor de etanol de gás natural, eletrólise com energia proveniente de hidrelétrica e eletrólise por turbina eólica, o tempo de amortização é maior que 9 anos. Isso se deve ao alto investimento na tecnologia de célula a combustível, muito superior ao investimento em ônibus com motor de combustão interna.

3. Eficiência Ecológica

Como já mencionado, o principal motivo do estudo de substituição dos veículos de motor combustão interna por veículos movidos com células a combustível é a diminuição da emissão de poluentes. Os gases de exaustão mais nocivos são os óxidos de carbono (CO e CO₂), o anidrido sulfuroso ou dióxido de enxofre (SO₂), o óxidos de nitrogênio (NOx) e materiais particulados (MP). Já nos veículos com célula a combustível, o hidrogênio que alimenta a célula deve ser produzido de maneira sustentável, já que produzir hidrogênio usa energia térmica ou elétrica e também polui dependendo do processo.

A eficiência ecológica avalia de certo modo o quanto poluidor é um processo produtivo, considerando as emissões por combustível, permitindo quantificar o quão poluidor ou não poluidor, é a produção de hidrogênio. A eficiência ecológica encontra-se na faixa de 0 até 1, um valor igual a 0, significa 100% de impacto ambiental ou muito poluidor e uma eficiência igual a 1, significa 0% de impacto ambiental ou não poluidor. O cálculo de eficiência ecológica é baseado na metodologia desenvolvida por Cardu y Baica (1999) com cálculos de dióxido de carbono equivalente ((CO₂)e) e indicador de poluição (Πg).

$$(CO_2)e = CO_2 + 80.(SO_2) + 50.(NOx) + 67.(MP) \quad (3.1) \quad \Pi g = \frac{(CO_2)e}{PCI} \quad (3.2)$$

Onde:

(CO₂)e – Dióxido de Carbono Equivalente (kg/kgcomb); PCI – Poder Calorífico Inferior do Combustível (MJ/kgcomb); Πg – Indicador de Poluição (kg/MJ)

Partindo-se da hipótese que o melhor combustível é aquele que possuir o menor Indicador de Poluição, Cardu y Baica (1999a) propõem um indicador mais complexo e adimensional que expresse o impacto ecológico dos componentes dos gases nocivos emitidos na atmosfera resultantes da queima de um combustível. O indicador proposto é denominado Eficiência Ecológica (ε), determinada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{[0,204 \times \eta_{\text{sistema}} \times \ln(135 - \Pi_g)]^{0,5}}{\eta_{\text{sistema}} \times \Pi_g} \quad (3.3)$$

3.1. Eficiência Ecológica de Processo de Produção de Hidrogênio-Caso da Reforma a Vapor de Gás Natural

A eficiência ecológica de um processo de produção de hidrogênio por reforma de gás natural pode ser determinada de acordo com as equações estequiométricas de combustão de gás natural e a equação global da reforma a vapor de gás natural e obteve-se os seguintes valores:

Tabela 1: Emissões do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor de gás natural

Componentes	Combustão do Gas Natural (kg/kg GN)	Reforma a vapor de Gas Natural (kg/kg GN)
CO ₂	2,703827237	2,487421561
SO ₂	0 *(Villela & Silveira, 2007)	0
NOx	0,003439394 (Villela & Silveira, 2007)	0
MP	0,000363636 (Villela & Silveira, 2007)	0

*Não contem enxofre na composição elementar do gás natural, portanto foi considerado desprezível.

Com esse valores calcula-se o de Carbono Equivalente [(CO₂)e] e o Indicador de Poluição (IIg), considerando o PCI do gás natural= 47,966 MJ/kg (Villela & Silveira, 2007).

$$[(CO_2)e]_{caldeira} = 3,067 \text{ (kg/kg GNq)}; IIg_{caldeira} = 0,063 \text{ (kg/MJ)}$$

$$[(CO_2)e]_{reformador} = 2,75 \text{ (kg/kg GN)}; IIg_{reformador} = 0,057 \text{ (kg/MJ)}$$

Para o cálculo de eficiência ecológica, necessita-se da eficiência do processo de produção de hidrogênio. A eficiência de uma caldeira operando com gás natural é de 90% (Lora y Nascimento, 2004) e a eficiência do reformador foi calculada segundo a Equação 3.4:

$$\eta_R = \frac{((m_{H_2} \cdot h_{H_2}) + (m_{CO_2} \cdot h_{CO_2}))}{((m_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) + (m_{GN} \cdot h_{GN}))} \quad (3.4)$$

Para o calculo da eficiência do reformador, conforme a equação 3.4, foi necessário calcular as entalpias dos reagente e dos produtos dessa reação na temperatura da reforma a vapor do gás natural (1073K). Para esse cálculo ser possível, utilizou-se as equações 3.5, 3.7, 3.8 e 3.9 de acordo com Zainal et al., (2000) e a equação 3.6 de acordo com Jarungthammachote y Dutta. (2006).

$$dH_{(gases)} = H_{f298}^0 + AH \quad (3.5)$$

$$h_{f1073}^0 = n_{mols} \cdot dH \quad (3.6)$$

$$AH = C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.7)$$

$$T_{am} = \frac{(298 + 1073)}{2} \quad (3.8)$$

$$C_p = R \cdot (A + B \cdot T_{am} + \frac{C}{3} \cdot (4T_{am}^2 - T_1 \cdot T_2)) + \frac{D}{T_1 \cdot T_2} \quad (3.9)$$

A eficiência calculada para o reformador de gás natural é de 54%. A eficiência ecológica foi calculada segundo a equação 3.3, e obteve-se uma eficiência ecológica para a caldeira de 96%, e para o reformador de 95%. A eficiência ecológica total do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor do gás natural foi obtida pelo produto entre a

eficiência ecológica da caldeira e a eficiência ecológica do reformador, chegando-se a eficiência ecológica total do processo de produção de hidrogênio por essa modalidade de 91%

3.2. Produção de Hidrogênio via Eletrólise em Hidrelétrica (água vertida no caso Itaipu)

As usinas hidrelétricas sempre foram consideradas fontes limpas de energia, mas com a preocupação do aquecimento global, começou-se a estudar as emissões de CO₂ e CH₄ provenientes dos reservatórios das hidrelétricas em função de km² alagado e profundidade reservatório. Nesse trabalho foi considerada a hidrelétrica de Itaipu e os detalhes dessa hidrelétrica encontram-se na tabela abaixo:

Tabela 2– Índice de Emissão de CH₄ e CO₂ do reservatório da hidrelétrica de Itaipu-Brasil (Mistério da Ciência e Tecnologia [MCT], 2009)

Hidrelétrica	Área (km ²)	Latitude	Potência (MW)	Emissão CH ₄ kg/km ² /dia	Emissão CO ₂ kg/km ² /dia
Itaipu	1.549	25°26'S	12.600	20,8	171,0

O cálculo de eficiência ecológica de produção de hidrogênio em hidrelétrica foi baseado na metodologia desenvolvida pelo Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos da Universidade Estadual Paulista Campus de Guaratiguetá -SP (www.feg.unesp.br/gose).

Conforme equação 3.2, o indicador de poluição é obtido em função do (CO₂)e por PCI. No caso de hidroelétrica, não há combustível, mas por analogia, pode-se considerar a água sendo o combustível e a energia potencial a energia disponível para a geração de eletricidade. Dessa forma, é possível, pela equação 3.10 calcular o Índice poluidor no caso de hidroelétrica. Para esse cálculo também se deve considerar a emissão de CH₄ sendo 21 vezes pior que a emissão de CO₂ (Bambace et al, 2007), já que esse absorve 21 vezes mais radiação infravermelha que o CO₂. As equações utilizadas para o calculo de eficiência ecológica em hidrelétrica apresentam-se abaixo:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (3.10)$$

$$m_{\text{agua}} = \frac{P}{\eta \cdot g \cdot h} \quad (3.11) \quad I_e(\text{CO}_2) = I_{\text{CO}_2} + 23 \cdot I_{\text{CH}_4} \quad (3.12)$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{I_{e\text{CO}_2} \cdot A}{86400} \quad (3.13) \quad (\text{CO}_2)_e = \frac{m_{(\text{CO}_2)}}{m_{\text{agua}}} \quad (3.14)$$

Onde a energia potencial é dada em função da potencia gerada, em W (no caso de Itaipu 12600kW) dividida pelo rendimento do sistema, η (30%), g é aceleração da gravidade em m/s² e h é a altura de queda, em m (no caso de Itaipu 117m)

A eficiência ecológica é calculada segundo a equação 3.3.

Os seguintes resultados foram obtidos (Tabela 3).

Tabela 3: Resultados dos cálculos de eficiência ecologia em hidrelétricas

Parâmetros	Valores
m_{H_2O} (kg/s)	36382536,38
E_p (J/s)	42567567568
le_{CO_2} (kg/km ² /dia)	691
m_{CO_2} (kg/s)	12,38841435
$(CO_2)_e$ (kg CO ₂ /kg H ₂ O)	3,40504E-07
E_{HID} (MJ/kg)	0,00117
$\pi_{g\ Hid}$ (kg CO ₂ /MJ)	0,000291029
ε (%)	99%

3.3. Produção de Hidrogênio via Eletrólise por Turbina Eólica

A eficiência ecológica da produção de hidrogênio via turbina eólica é considerada quase 1, já que através dessa forma de produção de hidrogênio não há emissões de poluentes a serem consideradas, havendo apenas emissões na fabricação de componentes do sistema eólico

3.4. Comparação dos Processos de Produção de Hidrogênio

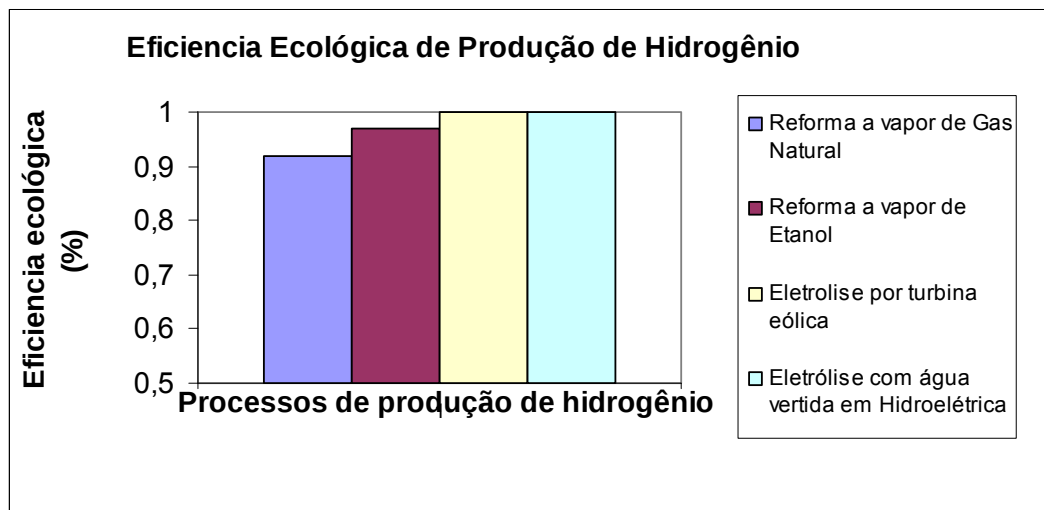
Pelos cálculos de eficiência ecológica da produção de hidrogênio por diversas fontes obtiveram-se os valores apresentados na tabela 4. Os valores de eficiência ecológica também estão demonstrados na Figura 5. O valor de eficiência ecológica no caso do processo de produção de hidrogênio por reforma a vapor de etanol, esta de acordo com Braga (2010) incluindo nesse caso o ciclo do carbono da cana de açúcar.

Tabela 4: Valores dos parâmetros associados a eficiência ecológica

Parâmetros calculados	Sistema de reforma a vapor de Gás natural	Sistema de reforma a vapor de Etanol	Eletrólise em hidrelétrica (água vertida)	Eletrólise via turbina eólica
$(CO_2)_e$ (kg/kg _{comb})	<u>Caldeira</u> 3,067584813 <u>Reformador</u> 2,75	<u>Caldeira</u> 1,827004 <u>Reformador</u> -1,79571	3,40504E-07	0
π_g (kg CO ₂ /MJ)	<u>Caldeira</u> 0,063953317	<u>Caldeira</u> 0,249761	0,000291029	0

	<u>Reformador</u> 0,057332277	<u>Reformador</u> -0,1038		
ϵ (%)	91%	97%	99%	~1

Figura 5: Eficiência ecológica de produção de hidrogênio



Não foi considerado nos cálculos de eficiência ecológica para a produção de hidrogênio por fontes fotovoltaicas, mas neste caso a poluição desse sistema estaria relacionada com o processo de mineração de quartzo para a construção dos painéis fotovoltaicos e com as demais demandas de energia associada as outras etapas da produção de painéis fotovoltaicos.

A eficiência ecológica da produção de hidrogênio via eletrólise por hidrelétrica é de 99%, esse calculo foi específico para hidrelétrica de Itaipu, porém essa eficiência ecológica pode variar se for baseada em uma outra usina hidrelétrica.

4. Conclusões

Através do estudo de veículos operando com célula a combustível e veículos operando com motor de combustão interna, fica claro que aqueles movidos com hidrogênio são uma alternativa para o transporte urbano, tornando melhor a qualidade de vida e ambiental da humanidade. Apesar das diversas vantagens, ainda existem algumas barreiras que precisam ser quebradas para os transportes com uso de célula a combustível competirem com os movidos a MCI; seria necessário, inicialmente, o desenvolvimento de mercado com grande volume de produção de células a combustível de modo a permitir diminuir os níveis de investimentos para patamares aceitáveis propiciando viabilidade econômica e segurança operacional.

Conforme o estudo de viabilidade econômica, um ônibus com investimento de 2000US\$/kW e utilizando hidrogênio a partir de reforma a vapor de etanol, pode ser a melhor alternativa para substituir um ônibus operando com motor de combustão interna utilizando diesel, já que esse tipo de transporte se torna viável entre 1 e 2 anos. Considerando-se ônibus com célula a combustível utilizando as outras fontes de hidrogênio ainda não são, a curto prazo, competitivos com o MCI.

Observando-se a tabela 4 fica claro que a melhor forma de obtenção do hidrogênio sobre o ponto de vista ecológico é por eletrólise com energia proveniente de turbina eólica, mas pelo estudo econômico, dentre todas as alternativas, esse método é o mais caro. Deve-se então considerar, dentre todos os métodos de produção de hidrogênio, os melhores no caso do Brasil: a obtenção de hidrogênio por sistema de reforma a vapor de etanol e eletrólise com água vertida em hidrelétrica, devido ao potencial de produção de etanol e de energia hidrelétrica.

5. Referências bibliográficas

- Bambace, L.A.W., Ramos, F.M., Lima, I.B.T., & Rosa, R.R. (2007). Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams. *Energy*. v32, p1038-1046.
- Braga, L.B. (2010) *Análise Econômica do Uso de Célula a Combustível para Acionamento de Ônibus Urbano*. Dissertação de Mestrado não publicada, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP.
- Cardu, M., & Baica, M. (1999). Regarding a Global Methodology to Estimate the Energy-Ecologic Efficiency of Thermopower Plants. *Energy Conversion and Management*, v.40, p. 71-87,
- Cardu, M., & Bainca, M. (1999a). Regarding a New Variant Methodology to Estimative Globally the Ecologic Impact of Thermopower Plants. *Energy Conversion and Management*, v.40, p. 1569-75.
- Doty, F.D (2004). A Realistic Look at Hydrogen Price Projections. 2004. Doty Scientific Columbia, Disponível em http://www.dotynmr.com/gen/gen_publications.htm.
- Estudos Tecnológicos (2010). Disponível em: <http://www.estudostecnologicos.unisinos.br/pdfs/134.pdf>.
- Ferreira, P.F., Araújo, P D.; Lopes, D.G., & Silva, E. (2003). Produção de Hidrogênio Utilizando Energia Vertida Turbinável de Itaipu: Cálculo de Custos e Comparação com o Gás Natural na Cidade de São Paulo.
- Jarungthammachote, S., & Dutta, A. (2006) Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of downdraft waste gasifier. *Energy* V.32, p.1660-1669.
- Johansen, H. D. A (2006). Tecnologia das Células a Combustível: Definição, Cronologia e Atuais Desafios. Monografia (Bacharelado em Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Lora, E.E.S, & Nascimento, M.A.R. (2004) Geração termelétrica- Planejamento, Projeto e Operação. *Rio de Janeiro: Interciencia*, vo 1 1, 631p.
- Ministério da Ciência e Tecnologia [MCT] (2009). Disponível em <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/21458.html>.
- Ministério das Minas e energia [MME] (2010). Disponível em: <http://www.mme.gov.br>.
- Neto, E.F.G.(2005). Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: A Era do Hidrogênio, das Energias Renováveis e das Células a Combustível. Curitiba, Brazil: *H2 Fuel Cell Energy*.
- Padró, C., & Putsches, V. (1999). Survey of Economics of Hydrogen Technologies. *National Renewable Energy Laboratory Study*. NREL/TP- DOI-570-27079
- Silveira, J.L., Braga, L.B., Souza A.C.C., Antunes J.S., & Zanzi R. (2009) The benefits of ethanol for hydrogen production in urban transport. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. v 12, p 2525-2534

- Silveira, J.L., & Gomes L.A (1999). Fuel Cell Cogeneration System: A Case of Technoeconomic Analysis. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v3; p 233-242.
- Souza, A.C.C., Silveira, J.L., Sosa, M.I (2006). Physical-Chemical and Thermodynamic Analyses of Ethanol Steam Reforming for Hydrogen Production. *J. Fuel Cell Science Technology*. v3(3); p346-50
- Torres F.S(2002). *Análise Técnica e Econômica de Células de Combustível Aplicadas a Veículos Automotores*. Trabalho de graduação Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, SP
- Valor Online (2009). Disponível em <http://www.valoronline.com.br>
- Vilela, I. A. C. (2007). *Desenvolvimento de um Modelo Termodinâmico que Considera os Impactos Ambientais*, 145f. Tese Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP
- Villela I.A.C., & Silveira J.L. (2007). Ecological efficiency in thermoelectric power plants. *Applied Thermal Engineering*.. v27, p 840-847
- Zainal, Z.A., Ali, R., Lean, C.H., Seetharamu K.N (2001). Prediction of performance of downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion & Management*, v 43, p1499-1515.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico pelo suporte financeiro.

Dados de contato (Para mais informações contate com):

José Luz Silveira

Campus de Guaratinguetá – Dep. de Energia / Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos (G.O.S.E.), Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, CEP: 12516-410; Guaratinguetá – SP (Brasil)

Phone: +5512312232836

Fax: +5512312232835

E-mail : joselzu@feg.unesp.br

URL : www.feg.unesp.br/gose