

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

LÚCIA BOLLINI BRAGA

**ANÁLISE ECONÔMICA DO USO DE CÉLULA A
COMBUSTÍVEL PARA ACIONAMENTO DE
ÔNIBUS URBANO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica na área de Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Santana Antunes

Co-Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá

2010

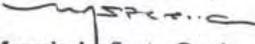
B813a	<p>Braga, Lúcia Bollini</p> <p>Análise econômica do uso de célula a combustível para acionamento de ônibus urbano. / Lúcia Bollini Braga – Guaratinguetá : [s.n], 2010. 97f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 90-97</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Júlio Santana Antunes</p> <p>Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira</p> <p>1. Células a combustível I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 662.7</p>
-------	---

LÚCIA BOLLINI BRAGA

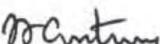
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

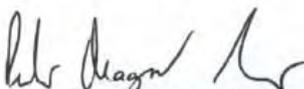
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

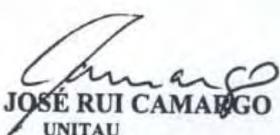
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JÚLIO SANTANA ANTUNES
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Unesp - Feg


Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU

Fevereiro de 2010

DADOS CURRICULARES

LÚCIA BOLLINI BRAGA

NASCIMENTO	25.09.1983 – Bariri / SP
FILIAÇÃO	Sérgio Braga Elisabete Aparecida Bollini Braga
2002/2007	Curso de Graduação em Engenharia Química Escola de Engenharia de Lorena- Universidade de São Paulo
2008/2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Julio Santana Antunes e ao Prof. Dr. José Luz Silveira pelas orientações sempre lúcidas e instigantes. Sem essas orientações, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos professores das disciplinas de minha graduação e pós-graduação que sedimentaram a base conceitual sem a qual seria impossível me aventurar nesse campo.

Aos meus pais, Sergio e Elisabete, que sempre estiveram comigo nos momentos de dificuldade e sempre me deram condições e apoio para que eu pudesse me desenvolver intelectualmente, profissionalmente, emocionalmente e sempre estiveram comigo quando precisei.

Ao meu irmão Gabriel, pela ajuda nas horas que precisei.

A Atagir pelo companherismo, paciência e dedicação nos momentos difíceis.

À todos os funcionários do campus de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza e principalmente pela demonstração de comprometimento.

Aos meus companheiros de trabalho, Ronney, Marcio, Caetano, Alexandre, Juliana e Christian pela ajuda e amizade.

Muito do redigido aqui surgiu e foi possível graças as conversas com as pessoas aqui mencionadas. Outras foram frutos de pesquisas, documentos e textos estudados e citados. Os acertos dessa dissertação compartilho com aqueles que agradeço aqui e também com aqueles que me ajudaram indiretamente. Já os erros, os assumo individualmente.

Este trabalho contou com apoio da CAPES através do
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE CAPACITAÇÃO DE DOCENTES.

“Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas que já têm a forma do nosso corpo e esquecer os nossos caminhos que nos levam sempre aos mesmos lugares.

É o tempo da travessia e se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre à margem de nós mesmos”

Fernando Pessoa

BRAGA, L. B. *Análise Econômica do Uso de Célula a Combustível para Acionamento de Ônibus Urbano*. Guaratinguetá 2010. 97p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.- Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

RESUMO

O aquecimento global e o agravamento da qualidade de vida da população causado principalmente pela queima de combustíveis fósseis (petróleo, diesel, gasolina), que emite milhões de toneladas de poluentes ao meio ambiente, é um dos focos principais da atualidade. Além disso, a certeza de que os combustíveis fósseis são bens esgotáveis abre margem para mais pesquisas em energias limpas, particularmente para os veículos automotores. Neste sentido tem recebido particular atenção a tecnologia de célula a combustível, que pode ser aplicada para o transporte urbano e corrobora para a melhoria da atual situação ambiental do planeta. As células a combustível surgem como tecnologias realmente promissoras para a geração de energia e embora já existam diversos protótipos e estudos no mundo, ainda são inviáveis comercialmente, fator este que pode ser contornado, com a evolução tecnológica e a possibilidade de produção em série, num futuro próximo. Dentre as diversas tecnologias hoje existentes, as células PEM (membrana de troca protônica) são as mais indicadas e fazem parte dos protótipos de veículos automotores em desenvolvimento, pois combina durabilidade, alta eficiência, tem rápido acionamento e opera em temperaturas relativamente baixas. Essa dissertação tem como objetivo a análise econômica comparando um ônibus movido com célula a combustível com um ônibus movido com motor de combustão interna. Além disso, foi calculada a eficiência ecológica para a produção do hidrogênio a partir de processos de reforma a vapor de gás natural, reforma a vapor de etanol, eletrólise por turbina eólica e eletrólise com energia de água vertida em hidroelétrica.

Palavras-Chave: Célula a combustível, ônibus urbano, hidrogênio, motor de combustão interna, análise econômica.

BRAGA, L. B. *Economical Analysis of Fuel Cell Use in Urban Buses.* Guaratinguetá 2010. 97p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.- Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

ABSTRACT

The global warming is decreasing the life quality of population caused mainly by burning of fossil fuels (oil, diesel, gasoline) 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. Although there are a lot of prototypes and researches in the world, its commercialization is impracticable, although it can be changed over the technological evolution and an additional production, in a near future. 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 efficiency, good response at room temperatures and it works at relatively low temperatures. The purpose of this dissertation was performs an economic analysis, comparing buses moved by fuel cells and buses moved by internal combustion engine. Furthermore was developed an ecological efficiency of hydrogen produced by natural gas, ethanol, electrolyse by wind turbine and hydrogen by hydroelectric power plant.

Keywords: Fuel cell, urban buses, hydrogen, energy, internal combustion engine, economic analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Matriz energética brasileira	19
Figura 2	Mudança climática desde 1880 até 2000	21
Figura 3	Ônibus operando com FC do programa CsFCP.....	23
Figura 4	Ônibus mercedes- benz com FC	24
Figura 5	Pesquisa com motoristas de ônibus movidos à FC em Estocolmo	24
Figura 6	Ônibus do projeto Hy FLEET CUTE	27
Figura 7	Modelo de ônibus de serie marcopolo transformado para receber sistema de célula a combustível.....	29
Figura 8	Separação de oxigênio e hidrogênio da água por eletrólise	31
Figura 9	Bateria voltaica a gás	39
Figura 10	Célula a combustível PEM.....	40
Figura 11	FC stack	41
Figura 12	Estrutura química da membrana polimérica	43
Figura 13	Célula a combustível alcalina.....	44
Figura 14	Célula a combustível de ácido fosfórico.	45
Figura 15	Célula a combustível de carbonatos fundidos.	46
Figura 16	Célula a combustível de óxido sólido	47
Figura 17	Sistemas auxiliares de um veículo convencional	49
Figura 18	Sistemas auxiliares de um veículo elétrico	50
Figura 19	Sistema automotivo com FC	51
Figura 20	Ônibus movido com célula a combustível no Brasil.....	52
Figura 21	Custos de produção de hidrogênio por diferentes processos.	57
Figura 22	Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 2000 US\$/kW	61
Figura 23	Custo de transporte urbano(US\$/kmh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 2000 US\$/kW	62
Figura 24	Economia anual esperada, tomando como base o custo da célula a combustível 2000 US\$/kW	62

Figura 25	Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 4000 US\$/kW	63
Figura 26	Custo de transporte urbano (US\$/kmh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 4000 US\$/kW	64
Figura 27	Econômia anual esperada, tomando como base o custo da célula a combustível 4000 US\$/kW	64
Figura 28	Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 6000 US\$/kW	65
Figura 29	Custo de transporte urbano (US\$/kmh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 6000 US\$/kW	66
Figura 30	Econômia anual esperada, tomando como base o custo da célula a combustível 6000 US\$/kW	66
Figura 31	Diagrama de blocos do software desenvolvido.....	69
Figura 32	Entrada de dados do programa.....	70
Figura 33	Gráfico de custo em US\$/kmh gerado.	71
Figura 34	Gráfico de receita em US\$/ano gerado pelo programa	72
Figura 35	Sistema de produção de hidrogênio via reforma de gás natural.....	75
Figura 36	Sistema de produção de hidrogênio via reforma a vapor de etanol	79
Figura 37	Sistema de obtenção de hidrogênio via hidrelétrica.....	83
Figura 38	Sistema de obtenção de hidrogênio via turbina eólica.....	85
Figura 39	Eficiência ecológica de produção de hidrogênio.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação dos programas CUTE, ECTOS, STEP	26
Tabela 2: Emissões do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor.....	76
Tabela 3: Capacidades caloríficas e entalpia de formação	78
Tabela 4: Entalpias calculadas para temperatura de 1073K.....	78
Tabela 5: Emissões do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor de etanol	80
Tabela 6: Entalpias calculadas para temperatura de 1000K.....	81
Tabela 7: Índice de emissão de CH ₄ e CO ₂ do reservatório de 9 hidrelétricas brasileiras	82
Tabela 8: Resultados dos cálculos de eficiência ecológica em hidrelétricas	85
Tabela 9: Valores dos parâmetros associados a eficiência ecológica.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC - Alternating Current

AFC - Alkaline Fuel Cell

BGq – Bagaço de Cana Queimado

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH₄ - Metano

C₂H₆ – Etano

C₃H₈ - Propano

C₄H₁₀ - Butano

C₅H₁₂ - Pentano

C₂H₅OH - Etanol

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

Comb – Combustível

CsFCP - The Californian Fuel Cell Partnership IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

CUTE - Clean Urban Transport for Europe

DC – Direct Current

ECTOS - Ecological City Transport System

EMTU - Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos do Estado de São Paulo

FC – Fuel Cell

FCV - Fuel Cell Vehicle

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

GEF - Global Environment Facility

GNq – Gás Natural queimado

H₂ - Hidrogênio

H₂O – Água

KOH – Hidróxido de Potássio

MCFC - Molten Carbonate Fuel Cells

MCI – Motor de Combustão Interna

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME – Ministério das Minas e Energia
MP – material Particulado
N₂ - Nitrogênio
NaH - Hidreto de Sódio
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NaOH – Hidróxido de Sódio
NO_x- Oxido de Nitrogênio
PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cells
PEM - Próton Exchange Membrane
PEMFC - Próton Exchange Membrane Fuel Cell
PNUD - Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento
PPM – Parte por Milhão
SO₂ – Dióxido de Enxofre
SO_x – Oxido de Enxofre
SOFC - Solid Oxide Fuel Cell
STEP - Sustainable Transport Energy Project

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	m^2
C _{comb}	Custo do combustível	US\$/kWh
C _{F1}	Investimento no Combustível	US\$/kmh
C _{F2}	Investimento no Combustível	US\$/kWh
C _{inv1}	Investimento na Tecnologia Utilizada (FC ou MCI)	US\$/kmh
C _{inv2}	Investimento na Tecnologia Utilizada (FC ou MCI)	US\$/kWh
C _{main1}	Custo de Manutenção	US\$/kmh
C _{main2}	Custo de Manutenção	US\$/kWh
(CO ₂) _e	Dióxido de Carbono Equivalente	kg/kgcomb
C _{onibus1}	Custo do Ônibus	US\$/kmh
C _{onibus2I}	Custo do Ônibus	US\$/kWh
C _p	Calor Específico a pressão constante	kJ/kmolK
dH	Calor de Formação	kJ/kmol
E _p	Energia Potencial	J
f	Fator de anuidade	1/ano
G	Aceleração da gravidade	m/s^2
H	Período de Operação	h/ano
H_f^0	Entalpia de Formação	kJ/kmol
H*	Entalpia molar	kJ/molK
H	Altura	M
H _{HID}	Energia específica da hidrelétrica	MJ/kg _{agua}
I	Investimento	US\$/kW
I _{e CO₂}	Índice de emissão Equivalente do Dióxido de Carbono	kg/km ² /dia
I _{fc}	Custo do ônibus com Célula a Combustível	US\$/kW
I _{mci}	Custo do ônibus com motor Combustão Interna	US\$/kW
K	Período de Amortização (payback)	Anos
\dot{m}	Fluxo de Massa	kg/s
m	Massa	kg

m_{agua}	Massa da Água	kg
m_{CO_2}	Massa do Dióxido de Carbono	kg
n_{mols}	Fração molar	%
P	Potência	kW
PCI	Poder calorífico Inferior	kJ/kg
PCI _D	Poder Calorífico Inferior do Diesel	kJ/kg
PCI _H	Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio	kJ/kg
R*	Constante Universal dos Gases	J/molK
R	Receita	US\$/ano
R	Taxa de Anual de Juros	%
T ₁	Temperatura do Ambiente	K
T ₂	Temperatura do Reformador	K
T _{am}	Media Aritmética de Temperatura	K
W	Potência	kW
W _{fc}	Potência do ônibus com Fuel Cell	kW
W _{mci}	Potência do Motor de Combustão Interna	kW
ΔH	Varição de Entalpia	kJ/kmol
ΔS	Vida Útil do Ônibus	km
Πg	Indicador de Poluição	kgCO ₂ /
		MJ
ε	Eficiência Ecológica	%
η_{MCI}	Eficiência do Motor de Combustão Interna	%
η_{R}	Eficiência do Reformador	%

SUMÁRIO

1. Generalidades	18
1.1 Introdução	18
1.2. Mudanças climáticas	20
1.3. Programas de ônibus movido com sistema de célula a combustível	22
1.3.1. O programa CsFCP- EUA.....	22
1.3.2. O programa CUTE- União Européia.....	23
1.3.3. O programa ECTOS- Islândia.....	25
1.3.4. O programa Step- Austrália.....	25
1.3.5. Programa HyFLEET CUTE.....	26
1.3.6. Programa brasileiro de ônibus com célula a combustível.....	27
1.4. Ônibus movido com células a combustível	28
2. HIDROGÊNIO	30
2.1. Processos de obtenção do hidrogênio	30
2.1.1. Eletrólise da água	30
2.1.2. Biológicos e fotobiológicos.....	31
2.1.2. Gaseificação de biomassa e pirólise.....	32
2.1.3. Reforma a vapor	33
2.2. Armazenamento de hidrogênio	34
2.2.1. Reservatório de gás hidrogênio comprimido	34
2.2.3. Reservatório de hidrogênio líquido	35
2.2.4. Hidretos metálicos.....	35
2.2.5. Hidretos alcalinos	36
2.3. Segurança	37
3. CÉLULA A COMBUSTÍVEL	38
3.1.História.....	38
3.2. Funcionamento.....	39
3.3. Eficiência	41

3.4. Tipos de célula a combustível.....	41
3.4.1. Célula de membrana de troca de prótons (PEMFC)	42
3.4.2. Célula alcalina (AFC).....	44
3.4.3. Ácido fosfórico (PAFC)	44
3.4.4. Carbonatos fundidos (MCFC).....	46
3.4.5. Óxido sólido cerâmico (SOFC).....	47
4. SISTEMAS AUTOMOTIVOS QUE UTILIZAM CÉLULA A COMBUSTÍVEL..	48
4.1. Veículos com motores de combustão interna e veículos com motores elétricos.....	48
4.2. Aplicação veicular	50
5. O PROGRAMA BRASILEIRO DE ÔNIBUS MOVIDO A FC	52
5.1. Estrutura do veículo	53
5.1.1. Chassis.....	53
5.1.2. Subsistemas para a propulsão, a geração da energia e a alimentação das células a combustível.....	54
5.1.3. Subconjunto das células a combustível de hidrogênio.....	55
6. ANÁLISE ECONÔMICA.....	57
6.1. Simulação computacional	67
7. EFICIÊNCIA ECOLÓGICA.....	73
7.1. Introdução	73
7.2. Eficiência ecológica de processos de produção de hidrogênio.....	75
7.2.1. Produção de hidrogênio via reforma a vapor de gás natural	75
7.2.2. Produção de hidrogênio via reforma a vapor de etanol.....	79
7.2.3. Produção de hidrogênio via eletrólise em hidrelétrica (água vertida no caso Itaipu).....	82
7.2.4. Produção de hidrogênio via eletrólise por turbina eólica.....	85
7.2.5. Comparação dos processos de produção de hidrogênio.....	86
8. CONCLUSÃO.....	88

9. BIBLIOGRAFIA.....	90
----------------------	----

1. GENERALIDADES

1.1 Introdução

Para a melhoria do cenário ambiental do planeta e do padrão de vida da humanidade, requer-se qualidade de energia distribuída e também, nos serviços oferecidos para o uso dessa energia. É necessário que esse processo ocorra de forma sustentável. Atualmente as maiorias dos modelos energéticos são dependentes de combustíveis fósseis e seus usos geram contaminantes atmosféricos, como o dióxido de carbono, principal responsável pela ocorrência do efeito estufa, que provoca o aquecimento global (OMER A.M., 2008; ZOULIAS E.I. et al, 2006).

A concentração de dióxido de carbono de nossa atmosfera vem aumentando desde a revolução industrial, a maior parcela desse gás é gerado na descarga de automóveis, ônibus, caminhões que trafegam diariamente nos centros urbanos (SANTARELLI M.G.L.et al, 2002).

Devem-se ainda considerar os 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 fazem com que se desenvolvam novas tecnologias para geração de energia, que façam uso mais eficiente dos recursos naturais e usem recursos renováveis, sendo menos agressivas ao meio ambiente.

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 (MME, 2010).

Segundo dados da CETESB, o maior consumo de petróleo e seus derivados é por parte dos meios de transporte, e nesse contexto surgem as células a combustíveis como tecnologia alternativa para geração de energia de forma mais sustentável, principalmente em substituição do motor de combustão interna (CETESB, 2009).



Figura 1 Matriz energética brasileira (MME, 2010).

As células a combustível, também denominadas pilhas 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 melhor 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 H. D., 2006)

Alguns especialistas chegam a prever que as células a combustível representarão para esse século o que o computador representou para o século XX, embora a

descoberta das células a combustível data de 1839. As células a combustível podem ser aplicadas tanto para a geração estacionária de energia elétrica, como para a geração de energia nos meios de transporte, em substituição ao motor de combustão interna (em caminhões, ônibus, automóveis, etc), para a alimentação de equipamentos eletroeletrônicos em substituição às baterias, nos telefones celulares, computadores, calculadoras, entre outros. (SAXE M. et al, 2008)

1.2. Mudanças Climáticas

O planeta terra tem passado por mudanças climáticas desde o início dos tempos. No entanto no último século, ações antrópicas fizeram com que essas mudanças climáticas ocorressem em um período de tempo relativamente curto.

O Efeito Estufa é um fenômeno natural e indispensável para a vida na Terra, sem ele, não existiria vida tal como a conhecemos porque a temperatura média do planeta seria aproximadamente -19°C . Entretanto, atividades humanas, principalmente a queima de combustíveis fósseis e a derrubada de florestas, vêm intensificando o efeito estufa natural, causando um aumento do aquecimento global (MUDANÇAS CLIMATICAS, 2009).

O aquecimento da terra é o resultado do aumento de gases na atmosfera, os quais vem impedindo que o calor escape do planeta. Dessa forma, esse efeito “estufa” tem início quando a radiação solar entra na atmosfera terrestre, o calor aumenta e os gases associados a esse efeito, principalmente o dióxido de carbono, criam um escudo atmosférico permitindo que boa parte do calor permaneça na terra. Porém é necessário que essa concentração de gases, esteja em equilíbrio, de modo que a temperatura do planeta permaneça dentro dos limites normais.

Desde que começou a revolução industrial, grandes quantidades de gases têm sido emitidas para a atmosfera; as emissões de dióxido de carbono aumentaram 31%, metano 151%, óxido de nitrogênio 17% e ozônio troposférico 36%. (IPCC, 2009)

Segundo estudos do IPCC (2009), no século 20, a temperatura média da Terra aumentou em cerca de $0,6^{\circ}\text{C}$ e nos últimos 30 anos houve um aumento significativo da temperatura do planeta, conforme é mostrado na Figura 2. O sistema climático parece

ter engatado uma marcha superior e ter entrado em uma fase nova na qual o aquecimento veloz chega acompanhado por uma intensificação de fenômenos atmosféricos extremos, como os furacões, enchentes, degelos das calotas polares, etc.

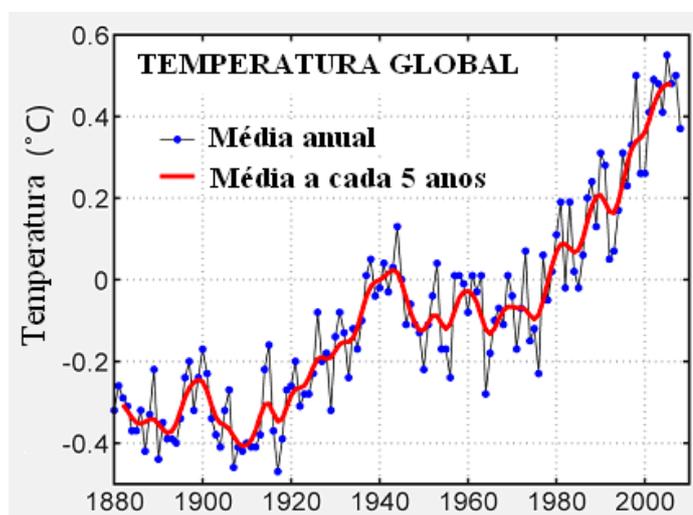


Figura 2 Mudança climática desde 1880 até 2000(IPCC, 2009)

Ainda, segundo o IPCC, em um cenário mais otimista no próximo século, ocorrerá um aumento da temperatura global do planeta, entre 1 e 3,5 °C.

No decorrer dos anos, diversas organizações não governamentais e a ONU (Organização das Nações Unidas), têm tentado desenvolver a consciência mundial para a redução da emissão de poluentes. Em 1997, a Conferência das Nações Unidas, realizada em Kyoto, Japão, adotou um protocolo, pelo qual os países industrializados deverão reduzir suas emissões de gases de efeito-estufa, em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990, entre 2008 e 2012. O protocolo de Kyoto estabelece também um regime de comércio de emissões e o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), pelo qual esses países poderão investir em projetos de redução de carbono atmosférico de países emergentes, e contabilizá-los como redução de suas próprias emissões. Isso inclui projetos de reflorestamentos de áreas degradadas em florestas tropicais, pois plantas removem carbono da atmosfera ao crescer, fixando-o na biomassa. Conservação ambiental é uma necessidade de sobrevivência da Humanidade, independente de mudanças climáticas, quer seja aquecimento ou resfriamento global (RICARDO A., 2004). Para o controle de emissões algumas sugestões são:

- Utilização de novas tecnologias, que são baseadas em processos mais limpos e com maior eficiência energética.
- Substituição dos combustíveis de origens fósseis, por fontes energias renováveis.
- Redução, reutilização e reciclagem.
- Substituição dos motores de combustão interna que utilizam diesel e gasolina, por veículos movidos a gás natural, etanol e células a combustível de hidrogênio.

1.3. Programas de Ônibus Movido com Sistema de Célula a Combustível

No início dos anos 90 começaram a surgir vários protótipos funcionais de ônibus movidos a hidrogênio utilizando sistema de células a combustível, e pouco tempo depois, se iniciou o planejamento dos primeiros projetos de demonstração desta tecnologia nesse setor de transporte. Dentre os diversos programas de ônibus com célula a combustível existentes hoje ao redor do mundo destacam-se:

1.3.1. O Programa CsFCP- EUA.

Em Janeiro de 1999, duas grandes agências do governo do Estado da Califórnia, nos Estados Unidos—California Air Resources Board (Órgão do controle do Ar da Califórnia) e California Energy Commission (Comissão de Energia da Califórnia) se associaram com 6 companhias privadas:—Ballard Power Systems, DaimlerChrysler, Ford Motor Company, BP, Shell Hydrogen e ChevronTexaco—para formar o Programa CsFCP (“The Californian Fuel Cell Partnership”- Programa de Célula a Combustível da Califórnia). O objetivo era demonstrar e promover veículos com célula a combustível em substituição aos motores de combustão interna. Em um período muito curto de tempo, outras agências governamentais e privadas se tornaram membros desse programa, sendo hoje em dia composta por mais de 33 membros e com ônibus operando 16 horas por dia, sete dias por semana (Figura 3). O programa

pretende já estar comercializando os transportes movidos com sistema de célula a combustível a partir de 2012 (FUEL CELL PARTNERSHIP, 2009).



Figura 3 Ônibus operando com FC do programa CsFCP (FUEL CELL PARTNERSHIP, 2009)

1.3.2. O programa CUTE- UNIÃO EUROPÊIA.

Na Europa se iniciou 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 europeias estão envolvidas no projeto (Amsterdan, Barcelona, Madri, Hamburgo, Stuttgart, Londres, Luxemburgo, Porto e Estocolmo) cada uma com seus veículos e tendo um foco de estudo próprio (HARALDSSON K.et al, 2005).

Os ônibus são baseados num ônibus convencional urbano Mercedes-Benz Citaro de piso baixo, com comprimento de 12 metros, conforme mostra a Figura 4.

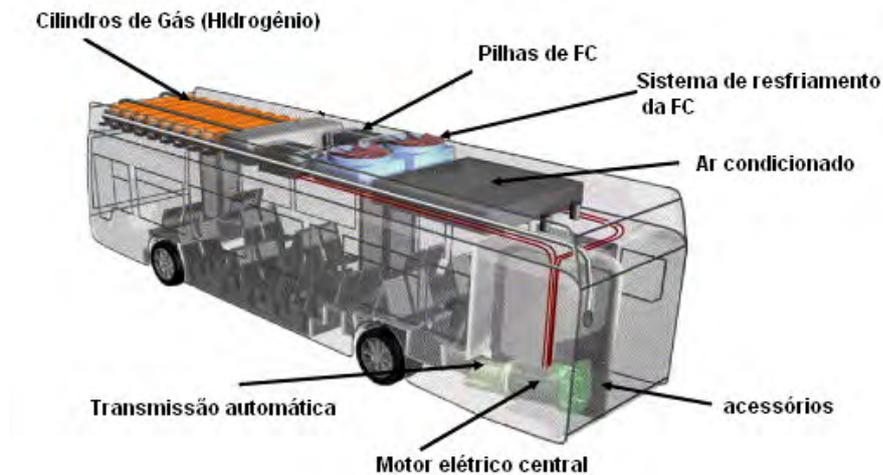


Figura 4 Ônibus Mercedes- Benz com FC (HARALDSSON K.et al, 2005)

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, o motor, ao invés de ser acionado mecanicamente, é acionado eletricamente. O sistema de FC e o tanque de hidrogênio foram colocados no teto do ônibus, tanto por questões de espaço como de 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 Figura 5. As repostas foram positivas.

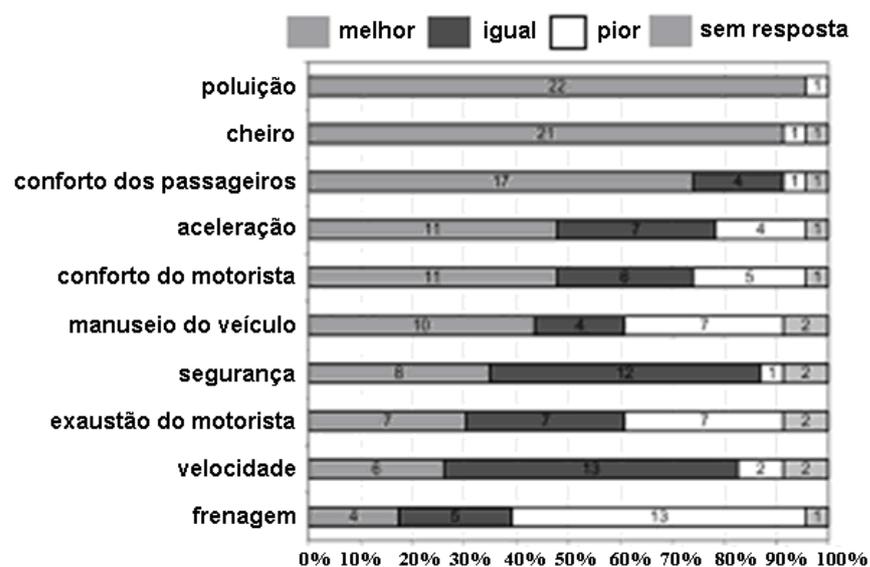


Figura 5 Pesquisa com motoristas de ônibus movidos à FC em Estocolmo (HARALDSSON K.et al, 2005).

1.3.3. O Programa ECTOS- ISLÂNDIA.

O Programa ECTOS (“Ecological City Transport System”- Sistema de Transporte Urbano Ecológico) foi iniciado na cidade de Reikjavik, na Islândia, foram testados o funcionamento de três ônibus, do modelo Citaro Fuel Cell Bus, dentro do sistema regular de transporte urbano da cidade. Esse programa foi financiado pela Comissão Européia. O objetivo desse programa foi demonstrar o estado da arte do hidrogênio como combustível e confiabilidade do uso desta alternativa tecnológica.

A primeira fase, iniciada em 2001, correspondeu à preparação da infra-estrutura necessária. Em 2003 inaugurou-se a estação de hidrogênio na cidade de Reikjavik, composto da planta de produção, sistema de armazenamento e de posto de abastecimento da frota dos ônibus com células a combustível. (Hy FLEET CUTE, 2009)

1.3.4. O Programa STEP- AUSTRÁLIA.

O Programa STEP (“Sustainable Transport Energy Project” - Energia Sustentável para Transportes) foi iniciado em 2002 ao desenvolvimento de ônibus movido por célula a combustível em substituição ao motor de combustão interna. Foi financiado pelo Governo do Oeste da Austrália, desenvolvido especificamente na cidade de Perth. Os ônibus ficaram conhecidos como ECOBUS. O projeto iniciou-se com uma primeira fase para a instalação da infra-estrutura necessária para a produção e abastecimento do hidrogênio, cuja duração foi de dois anos, para em seguida dar início à segunda fase, de inserção de três ônibus com células a combustível. (DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE DO GOVERNO DA AUSTRÁLIA, 2009)

A Tabela abaixo mostra dados comparativos dos programas CUTE, ECTOS e STEP.

Tabela 1: Comparação dos programas CUTE, ECTOS, STEP (GODOY G.A.R, 2008)

Características	ECTOS	STEP	CUTE
Cidade (País) participante	Reykjavik (Islândia)	Perth (Austrália)	Amsterdã (Holanda); Barcelona e Madri (Espanha); Londres (Reino Unido); Hamburgo e Stuttgart (Alemanha); Porto (Portugal); Luxemburgo (Luxemburgo); Estocolmo (Suécia)
Início	2001	2002	2001
Finalização	2005	2007	2006
Modelo do ônibus utilizado	Citaro Fuel Cell Bus	Citaro Fuel Cell Bus	Citaro Fuel Cell Bus
Quantidade de ônibus utilizados	3 (três)	3 (três)	27 (vinte e sete)
Total de tempo de operação dos ônibus (h)	5.216	11.704	62.545
Quilometragem total percorrida (km)	89.243	259.545	841.123
Consumo de hidrogênio do ônibus (kg/100 km)	19,5	18,1	22,8
Processo de obtenção de hidrogênio	Eletrolise da água	Associado a refinaria de petróleo	Eletrolise da água Reforma de Gás Natural Associado a refinaria de petróleo
Capacidade de produção de hidrogênio (m ³ /h)	60	Segundo a necessidade	Segundo a necessidade
Quantidade de hidrogênio fornecido (kg)	17.342	46.954	>192.000 kg

1.3.5. Programa HyFLEET CUTE-ISLÂNDIA, AUSTRÁLIA, CHINA E UNIÃO EUROPÉIA.

Em Janeiro de 2006, foi iniciado, como união dos 3 projetos citados na tabela 3, o projeto denominado Hy FLEET: CUTE

Este novo projeto visa a utilização de 47 ônibus, 33 deles com a tecnologia de células a combustível e 14 com motores de combustão interna adaptados para utilizar hidrogênio, inseridos dentro do sistema regular de transporte coletivo urbano de 10

idades: Reykjavík (Islândia) inicialmente parte do projeto ECTOS; Perth (Austrália) inicialmente do projeto STEP; Beijing (China); Londres (Reino Unido); Amsterdã (Holanda); Luxemburgo (Luxemburgo); Madri e Barcelona (Espanha); Hamburgo e Berlim (Alemanha). A Figura 6 mostra o ônibus com motor de combustão interna utilizado no projeto.



Figura 6 Ônibus do projeto Hy FLEET CUTE (GODOY G.A.R., 2008)

1.3.6. Programa Brasileiro De Ônibus com Célula a Combustível

No Brasil, em 2008, foi lançado um projeto de ônibus a hidrogênio, sob a coordenação da EMTU/SP (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos do Estado de São Paulo) e apoiado financeiramente pelo PNUD (Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento), pela GEF (Global Environment Facility) e pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos). O Programa Brasileiro será descrito detalhadamente no capítulo 5.

1.4. Ônibus Movido com Células a Combustível

O veículo automotor proposto, nesse trabalho foi o ônibus urbano, apesar da possibilidade de aplicação de células em outros meios de transporte. Isso se deu pelos seguintes fatos (SANTARELLI M.G.L. et al ,2002):

- 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 carros privados;
- 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 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 para ônibus: o motor é silencioso, ausência de vibrações e o motor elétrico têm uma suave operação, causando um aumento do conforto dos usuários

A Figura 7 ilustra a distribuição de um sistema de célula a combustível em um ônibus:

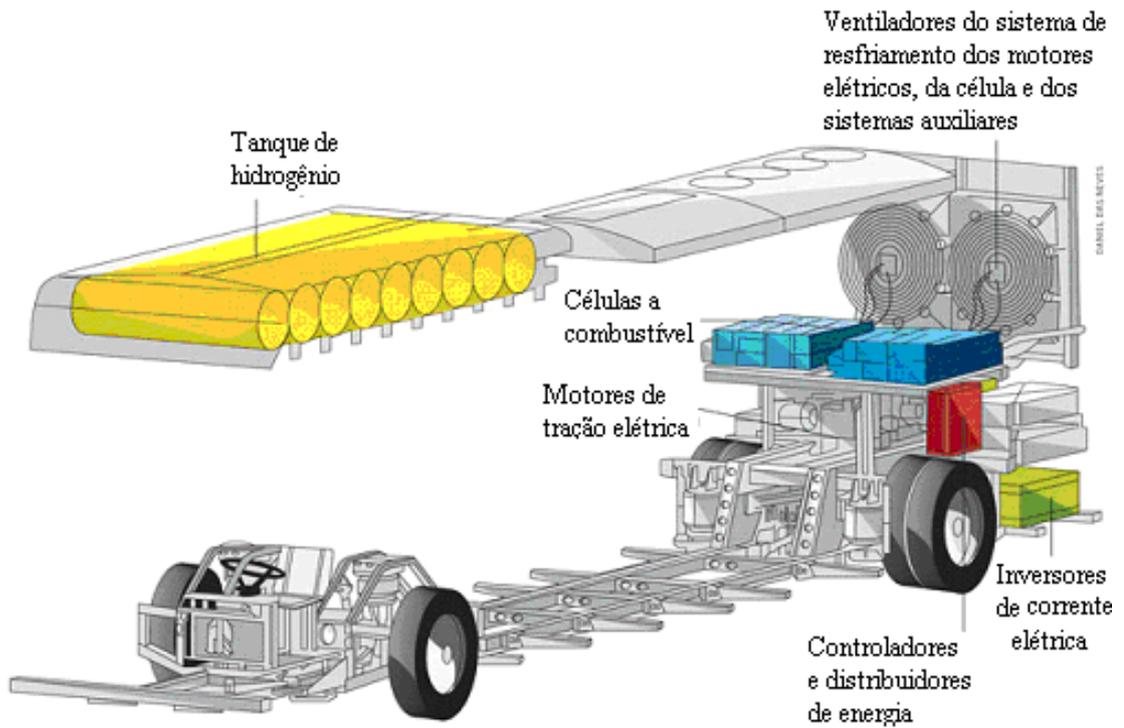


Figura 7 Modelo de ônibus de serie Marcopolo transformado para receber sistema de célula a combustível (AGÊNCIA FAPESP, 2009)

2. HIDROGÊNIO

As alternativas energéticas que substituam ou complementem as fontes utilizadas atualmente tem sido um constante desafio para estudiosos e pesquisadores. Devido a sua grande capacidade energética (PCI= 119.950 kJ/kg) e por oferecer uma importante redução de emissões de gases de efeito estufa, O hidrogênio pode ser uma excelente alternativa quando utilizado como vetor energético. Entretanto esse elemento não é encontrado como fonte de energia primária, então, precisa ser obtido através de processamento de combustíveis fósseis como os hidrocarbonetos, ou de combustíveis não fósseis como a biomassa ou da água. O método de obtenção do hidrogênio varia de acordo com a disponibilidade de matéria-prima, a quantidade de hidrogênio requerida e de acordo com a pureza necessária. Os principais métodos de produção de hidrogênio serão descritos no item 2.1.

O hidrogênio, elemento de símbolo H, é o mais simples entre os elementos químicos, por ser constituído de um próton e um elétron que gira ao seu redor; é um gás leve e o mais abundante no universo. Em seu estado molecular, H₂, como se encontra na natureza, constitui-se de dois átomos de hidrogênio, ligados por uma ligação covalente e faz parte das emanações vulcânicas em proporções reduzidas. O hidrogênio molecular é incolor, inodoro, insípido e insolúvel em água. Sua densidade é 14 vezes menor que do ar (MIDILLI A. et al, 2005)

2.1. Processos de Obtenção do Hidrogênio

2.1.1. Eletrólise da Água

A eletrólise da água é um método de produção de hidrogênio a partir da água que faz uso da eletricidade, oriunda de uma fonte externa, para romper a água em átomos de hidrogênio e oxigênio (Figura 8). Seu funcionamento consiste em dois eletrodos, submersos em água, um negativo (ânodo) e outro positivo (cátodo). A corrente elétrica promove a quebra das ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e o de oxigênio e separa os componentes atômicos. O hidrogênio concentra-se no cátodo e o ânodo

atrai o oxigênio. Devido ao gasto de grande quantidade de eletricidade, este processo só é economicamente viável em local onde a energia elétrica tem um custo baixo. Pode também ser uma opção importante nos países de grande potencial hidroelétrico, utilizando a eletricidade excedente da usina (caso de verter água). (KRUNGER P., 2001).

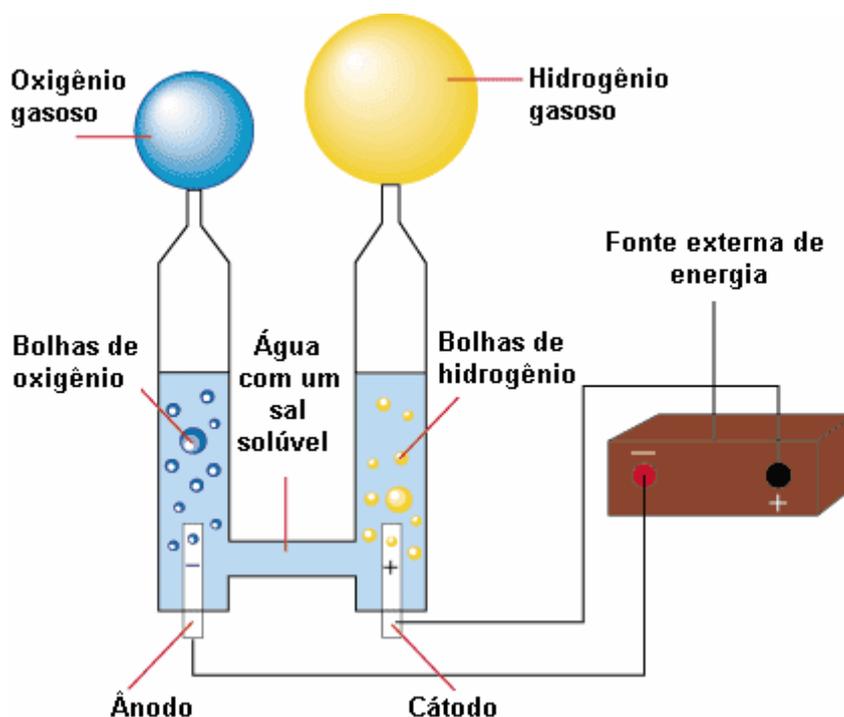


Figura 8 Separação de oxigênio e hidrogênio da água por eletrólise (LONGO M.A.V. et al, 2008).

2.1.2. Biológicos e Fotobiológicos

Nesses processos a obtenção de hidrogênio ocorre em bio-reatores que utilizam energia da luz e as atividades naturais de enzimas presentes nas algas verdes e microorganismos. Alguns microorganismos fotossintéticos produzem hidrogênio através de atividades metabólicas por meio da energia da luz. Pode-se então, em reatores, com o auxílio de catalisadores, alcançar uma eficiência de processo de 24% (SILVA M.E., 2005).

Alguns problemas associados a esse processo, estão no fato de que a tecnologia fotobiológica produz hidrogênio juntamente com oxigênio e esse sistema enzimático é

sensível ao oxigênio; deve-se então serem pesquisadas e desenvolvidas novas formas genéticas de organismos mais resistentes ao oxigênio.

Existem alguns tipos de bactérias fotossintéticas, diferente das algas que possuem potencial para a produção de hidrogênio a partir da biomassa, dessa forma esses organismos podem não só produzir hidrogênio, como também contribuir para a redução da poluição ambiental.

2.1.2. Gaseificação de Biomassa e Pirólise

As plantas, através da fotossíntese, capturam energia do sol e transformam em energia química. Essas fontes orgânicas são chamadas de biomassas. Esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor, através de processos como a gaseificação e a pirólise. A pirólise consiste na decomposição por aquecimento em altas temperaturas, na qual ocorre o desprendimento de substâncias líquidas e gasosas. Esse líquido, na pirólise de biomassa, é conhecido como (bio-óleo) e pode ser decomposto ou transformados em outros produtos, inclusive em hidrogênio.

O processo de gaseificação da biomassa é composta por 4 etapas::

- Secagem - a secagem é a retirada da umidade e pode ser feita introduzindo a madeira no gaseificador (aproveitando-se a temperatura já existente), embora o processo com madeira seca seja mais eficiente.
- Pirólise ou carbonização - durante essa etapa formam-se gases: vapor d'água, vapor de alcatrão e carvão
- Gaseificação – nessa etapa é liberada a energia necessária ao processo, pela combustão parcial dos produtos da pirólise.
- Combustão – oxidação total do combustível

O Tipo de gaseificador utilizado, pode modificar a ordem de algumas etapas, por exemplo no gaseificador do tipo Downdraft, ocorre primeiro o processo de gaseificação e depois o de combustão.

Algumas vantagens associadas a esses processos são (AMBIENTE BRASIL, 2009):

- As cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados
- combustível resultante é mais limpo e, na maioria dos casos não há necessidade de controle de poluição.
- Associada a catalizadores, como alumínio e zinco, a gaseificação aumenta a produção de hidrogênio e de monóxido de carbono e diminui a produção de dióxido de carbono.

2.1.3. Reforma a Vapor

A reforma a vapor é o método mais conhecido para obter-se hidrogênio a partir de hidrocarbonetos e é o processo que produz hidrogênio com maior eficiência. O método consiste no aquecimento do combustível até seu estado de vaporização, sendo, então, injetado com vapor superaquecido no vaso de reação, em presença de catalisadores.

Os processos dentro de um reformador são três, conforme descreve-se a seguir (BRAGA L.B. et al, 2008) :

- **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 contem 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.

A desvantagem do processo é que ele é endotérmico, necessitando de um aquecimento externo. Um reformador é uma unidade integrada constituída de um ou mais processos descritos acima para atingir as especificações de pureza de H₂ de acordo com a célula em questão.

A reforma a vapor pode ser realizada utilizando gás natural (metano), etanol, metanol, biogás entre outros.

2.2. Armazenamento de Hidrogênio

A maior parte do hidrogênio produzido no mundo é consumido quase que de imediato no próprio centro produtor, sem a necessidade de um armazenamento.

Porém em alguns casos a capacidade de armazenamento é um fator extremamente importante, por exemplo: em aplicações portáteis, estacionárias e espaciais e em veículos automotores. A dificuldade do armazenamento do hidrogênio, está ligada ao fato dele possuir a menor densidade no estado gasoso e o segundo menor ponto de ebulição de todas as substâncias conhecidas. Sendo assim, na forma gasosa, necessita de um sistema de armazenamento de grande volume e pressão, e no estado líquido, precisa que o seu armazenamento utilize sistemas criogênicos (temperaturas em torno de -253°C) (BRAGA L.B et al, 2009). A baixa densidade do hidrogênio seja no estado líquido ou gasoso, também resulta numa baixa densidade de energia. Isto faz com que o volume ou a pressão do tanque aumente, pois certa quantidade de hidrogênio é necessária para que um veículo atinja uma boa autonomia. (BRAGA L.B et al, 2009)

Apesar de sua baixa densidade de energia volumétrica, o hidrogênio tem a maior relação energia-massa que qualquer outro combustível. Infelizmente, esta vantagem é usualmente ofuscada pelo alto peso do tanque de armazenamento e equipamentos associados, fazendo com que muitas vezes seja maior e mais pesado que aqueles utilizados para armazenar gasolina, diesel ou álcool. Mas já há projetos que utilizam materiais de carbono ultra-resistentes e mais leves para estes propósitos (BRAGA L.B et al, 2009). Os principais sistemas de armazenamento de hidrogênio são:

2.2.1. Reservatório de Gás Hidrogênio Comprimido

Sistemas de armazenamento de gás em alta pressão são os mais comuns e desenvolvidos para hidrogênio. A maioria dos veículos movidos por células a combustível utilizam esta forma de armazenamento feito em cilindros, de forma similar aos utilizados com gás natural comprimido. O armazenamento de hidrogênio (geralmente até 200 atm) resulta em uma grande densidade volumétrica, atingindo

volumes muito menores. Mas a compressão de gás é um processo de uso intensivo de energia e quanto maior a pressão final para os cilindros, maior a quantidade de energia requerida.

2.2.3. Reservatório de Hidrogênio Líquido

Na forma líquida, o hidrogênio é o mais leve dos fluidos criogênicos, possuindo uma densidade de aproximadamente 1/14 da densidade da água. Dessa forma, os sistemas de armazenamento de hidrogênio no estado líquido, diminuem os problemas associados ao peso e tamanho. Porém, este processo, é complexo e caro.

Consegue-se armazenar uma quantidade maior de hidrogênio por unidade de volume, bem como, facilitar o seu transporte (fornecimento em maiores quantidades). A conversão do hidrogênio do estado gasoso para o estado líquido requer uma grande quantidade de energia sendo um processo caro (cerca de 40% da energia contida no hidrogênio pode ser perdida), pois o hidrogênio só se mantém líquido a temperaturas inferiores a -253°C (SANTOS F.M.S.M., 2009). Isto pode ser uma desvantagem, mas em contrapartida precisam-se de pequenos espaços para guardar grandes quantidades de energia, o que torna este método ideal para a aplicação em automóveis e aviões pois os tanques podem ser pequenos e leves.

Os perigos do hidrogênio liquefeito são menores que o comprimido, pois se existir uma fuga o combustível vai ter de aquecer de forma a ir evaporando-se e vai libertando-se sobre a forma gasosa mais lentamente para a atmosfera (SANTOS F.M.S.M, 2009).

2.2.4. Hidretos Metálicos

Estes sistemas de armazenamento de hidrogênio são baseados no princípio de que alguns metais absorvem o hidrogênio gasoso sob condições de alta pressão e temperatura moderada para formar os hidretos metálicos.

Alguns destes metais são: titânio, o zircônio, o vanádio, o ferro, o manganês, o cromo, o níquel e o magnésio (SOUZA A.C.C., 2005). Em geral, estão divididos de acordo com a capacidade de liberar hidrogênio em baixa ou alta temperatura. Esses metais liberam o gás hidrogênio quando aquecidos em baixa pressão (aproximadamente 15 bar), podendo ser em alta temperatura ou não (neste caso por volta de 20°C) (SOUZA A.C.C., 2005)

A vantagem do armazenamento utilizando hidretos metálicos está no fato de que o hidrogênio passa a fazer parte da estrutura química do metal e assim não precisa de altíssimas pressões ou estar no estado criogênico para operar. Como o hidrogênio é liberado do hidreto para uso em baixas pressões, os hidretos metálicos são a opção mais segura dentre todos os outros métodos para se armazenar o hidrogênio.

A maior desvantagem dos hidretos metálicos é a sua baixa densidade de energia. Outra desvantagem é que devem ser carregados somente com hidrogênio puro, pois podem ser contaminados e perderem a capacidade de armazenamento caso impurezas sejam inseridas. Outro problema associado aos hidretos de metal está relacionado à sua estrutura. Eles são geralmente produzidos na forma granular ou em pó possibilitando assim uma grande área para armazenar o gás. As partículas são suscetíveis ao atrito o que pode diminuir a eficiência.

2.2.5. Hidretos Alcalinos

É uma variação recente de hidretos que oferece algumas vantagens sobre os métodos anteriores e utilizam compostos como o sódio, potássio e o lítio. Estes compostos reagem com água para liberar o hidrogênio sem necessidade de calor. O processo mais desenvolvido comercialmente envolve o uso de hidróxido de potássio (NaOH), disponível facilmente como refugo de indústrias de papel, pintura, têxteis, plástico e petroquímicas. O hidróxido de sódio é convertido em hidreto de sódio (NaH) retirando-se o oxigênio pela adição de um pouco de calor. As vantagens deste processo é que não precisam de altas pressões para operar em temperaturas criogênicas, além da adição de calor para liberar o hidrogênio, não tem tanto problema com contaminação,

com problemas estruturais e são relativamente fácil de manusear (SOUZA A.C.C., 2005).

2.3. Segurança

O hidrogênio é inflamável como todos os outros combustíveis e quando manuseado de forma correta e tão seguro quanto os demais combustíveis. O hidrogênio é muito explosivo em espaços confinados, devido a alta velocidade de queima da sua chama, porém, devido ao alto coeficiente de difusão pode se dispersar rapidamente pelo ar, raramente ocorrendo explosão ao ar livre.

O hidrogênio não é tóxico e nem corrosivo, dessa forma seu vazamento não causa catástrofe ambiental, como é o caso do vazamento de petróleo. (JOHNSTON B., 2005)

Em relação aos cilindros de armazenamento, eles são muito resistentes e projetados para suportarem até 3 vezes a pressão aconselhada, antes de sofrer algum dano, sendo uma maneira de manter a segurança no caso de acidentes. (JOHNSTON B., 2005)

3. CÉLULA A COMBUSTÍVEL

3.1.História

O princípio da Célula a Combustível foi descoberto pelo cientista alemão Christian Friedrich Schönbein em 1838, mas foi o químico e juiz britânico Sir William Robert Grove que mostrou a aplicação prática desse princípio ao construir uma bateria voltaica a gás em 1839, combinando hidrogênio e oxigênio (Figura 9). O termo fuel cell (célula a combustível) foi criado em 1889 pelos químicos Ludwig Mond e Charles Langer, que tentaram construíram, sem sucesso, o primeiro dispositivo prático, utilizando gás de carvão e ar. (HARTMUT W. et al, 2000)

Passaram-se 70 anos até que em 1959 o engenheiro britânico Francis Thomas Bacon construiu a primeira célula a combustível tipo alcalina (eletrólito de hidróxido de potássio – KOH), com as características das células atuais. Utilizando hidrogênio e oxigênio, esta célula tinha uma capacidade de produzir 5 kW de energia elétrica. (HARTMUT W. et al, 2000)

No início dos anos 60 as células a combustível tiveram sua importância apenas nas aplicações aeroespaciais, uma vez que a NASA utilizou estes dispositivos para a geração de eletricidade e água nos projetos Gemini (células tipo PEM - Próton Exchange Membrane -, o tipo mais indicado para aplicação veicular, desenvolvidas pela empresa General Electric) e Appolo (células tipo alcalina fabricadas pela empresa Pratt & Whitney). (HARTMUT W. et al, 2000)

Nos anos 70, com o advento da Crise do Petróleo, as células a combustível foram consideradas para aplicações terrestres, juntamente com o hidrogênio, mas também perderam importância quando os preços do petróleo declinaram no início dos anos 80. Nesta década, apesar de poucas aplicações das células a combustível, muitos avanços científicos e tecnológicos tornaram mais prática e barata a fabricação desse equipamento. Porém, um interesse maior pelas células a combustível somente ocorreu em meados dos anos 90, com o aumento das preocupações ambientais, tomando proporções nunca vistas a partir da busca, principalmente pelos Estados Unidos, para alternativas ao Protocolo de Kyoto. (HARTMUT WENDT et al, 2000)

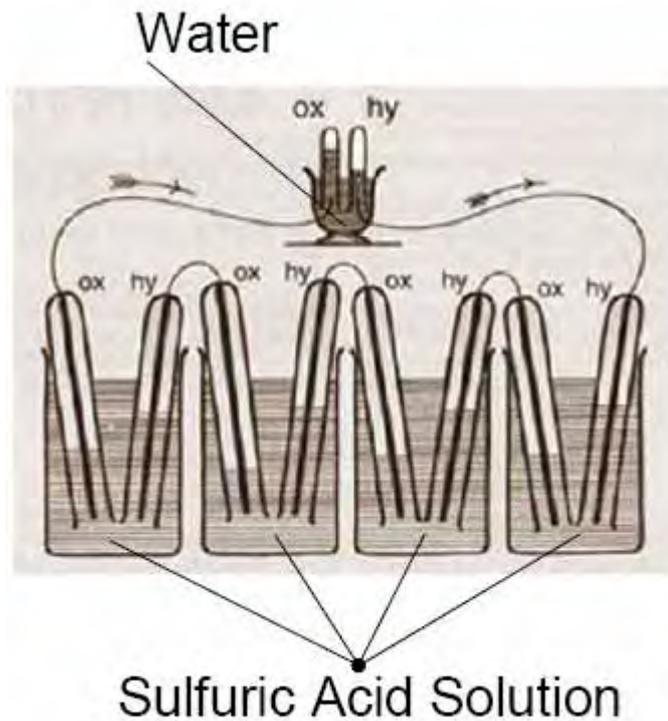


Figura 9 Bateria voltaica a gás (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009)

3.2. Funcionamento

Célula a Combustível é uma tecnologia que utiliza a combinação química entre oxigênio e hidrogênio para gerar energia elétrica e energia térmica (calor)

Diferentes tecnologias de célula a combustível têm basicamente o mesmo princípio composta basicamente de placas condutoras de eletricidade e de difusão de gases, eletrodos, catalisadores, membrana ou eletrólito, sensores de controle e monitoramento e, algumas vezes, um reformador para extrair o hidrogênio de um combustível. A Figura 10 ilustra a funcionamento de uma célula a combustível.

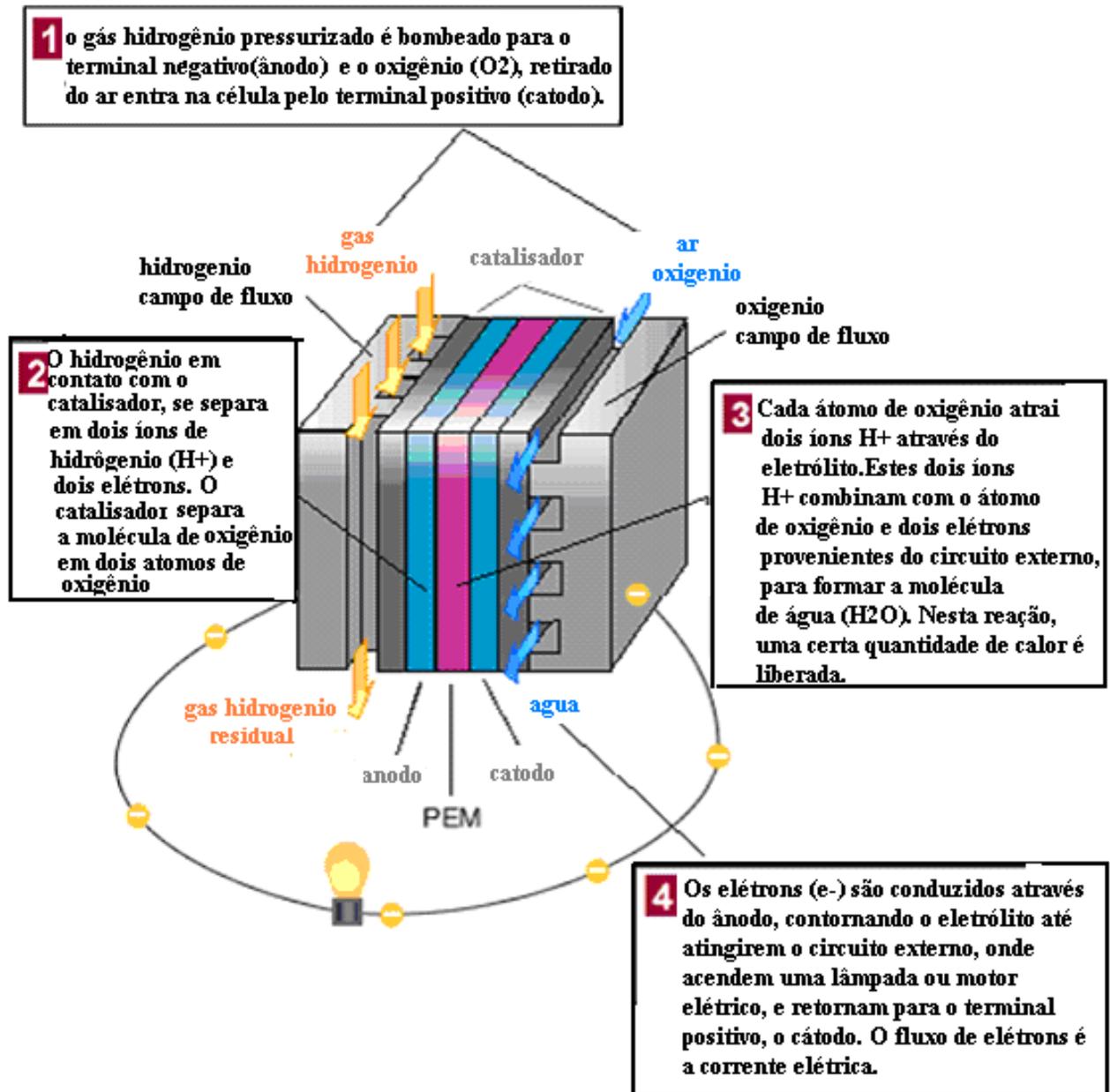


Figura 10 Célula a combustível PEM (BRAGA L.B ,2009).

Dentre as diversas tecnologias hoje existentes, as células PEM (membrana de troca protônica) são as mais indicadas e fazem parte dos protótipos de veículos automotores. 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), como apresentado na Figura 11 (SILVEIRA J.L et al, 2009).

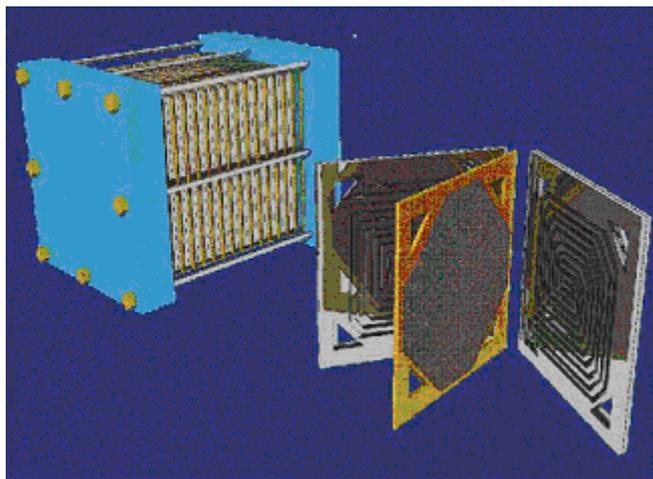


Figura 11 FC stack (FUEL CELL, 2009)

3.3. Eficiência

A eficiência termodinâmica das células a combustível, diferentemente dos motores de combustão interna (possuem a eficiência teórica determinado pelo ciclo de Carnot), é dada pelo quociente entre a energia livre da reação e a entalpia da reação, superando 90% (RICARDO A., 2004). Porém, a eficiência elétrica prática é menor pelo fato de que em contracorrentes operacionais o potencial da célula é menor que o teórico.

A eficiência tem uma fraca dependência da temperatura, quando comparada ao desempenho do ciclo de Carnot. Assim sendo, as células a combustível, mesmo aquelas que trabalham em baixa temperatura, possibilitam um melhor aproveitamento do combustível. Na prática, obtém-se eficiência elétrica de 45 a 60%. Quando a temperatura de operação da célula não for muito baixa, o calor pode ser aproveitado (cogeração) e a eficiência que se obtém é em torno de 80% (RICARDO A., 2004).

3.4. Tipos de Célula a Combustível

Existem várias tecnologias de célula a combustível que variam em tamanho, temperatura, combustível, eletrólito e aplicações. Por exemplo, algumas tecnologias

operam em temperaturas de 1000 °C e são mais usadas para aplicações industriais. Outras que operam a temperatura mais baixas, em torno de 60 a 220 °C, são utilizadas para equipamentos portáteis, automóveis e também para geração de energia estacionária.

O nome das células a combustível está geralmente ligado com a natureza do eletrólito. O tipo de eletrólito normalmente determina a temperatura de operação. Cada tipo de tecnologia requer materiais e combustíveis particulares, além de terem sua aplicação direcionada.

3.4.1. Célula de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)

A utilização da membrana polimérica como eletrólito na célula a combustível foi originalmente concebida por William Grubbs em 1959. Porém somente com a introdução da membrana de Nafion (Figura 12), mais resistente quimicamente, obteve-se sucesso em relação ao desempenho a longo prazo. A utilização do eletrólito sólido elimina a corrosão e as preocupações associadas a eletrólitos líquidos. A baixa temperatura de operação permite acionamento imediato e dispensa isolamento térmico. A membrana apresenta um aspecto fibroso e pode ser manejada facilmente e em segurança. As pontas das cadeias, onde se encontram grupos sulfônicos (íons negativos) formam uma espécie de bolha na estrutura que se incha em contato com a água, ou vapor d água. Estas bolhas, que são interligadas, são responsáveis pela condução de prótons H^+ e água pela membrana, sob o efeito de um campo elétrico. (HARTMUT W. et al, 2000)

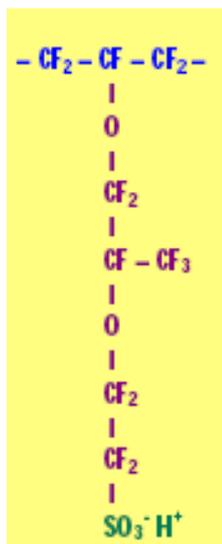


Figura 12 Estrutura química da membrana polimérica (THOMAS S, ZALBOWITZ M., 2008)

Dessa forma o manejo da água na membrana é crítico para a eficiência e célula a combustível deve operar sobre condições que determinam o equilíbrio entre a evaporação e a hidratação da água na membrana.

Com o eletrólito sólido, a célula apresenta excelente impermeabilidade ao gás. A temperatura de operação fica abaixo dos 80°C (RICARDO A., 2004).

As vantagens da tecnologia PEMFC segundo RICARDO A. (2004) são:

- Eficiência em torno de 55%;
- Alta densidade de energia;
- Pouco peso e pequeno volume;
- Atualmente é a célula a combustível com menor custo de produção;
- Eletrólito imóvel (membrana) simplifica a selagem no processo de produção, reduz a corrosão e possui maior vida útil;
- Baixa temperatura de operação o que permite rápida resposta para mudanças na demanda de potência;
- Robustez, mais resistente ao choque e vibrações em função do eletrólito sólido;
- Capacidade de seguir as variações de cargas;
- Atualmente é o sistema mais utilizado na propulsão de veículos e nos sistemas de energia estacionária de pequena escala.

3.4.2. Célula Alcalina (AFC)

Esse tipo de célula foi uma das primeiras tecnologias de células a combustível a serem desenvolvidas e foi a primeira a ser usada pela Nasa para produzir energia e água em operações espaciais. A sigla AFC significa “*Alkaline Fuel Cell*”, ou seja, Célula a Combustível Alcalina, e utiliza uma solução alcalina e aquosa de hidróxido de potássio (KOH), como eletrólito (Figura 13). Esse tipo de tecnologia utiliza materiais de baixo custo como catalisador e opera com temperaturas entre 100°C e 250°C e possui excelente eficiência, em torno de 60%(U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2009). A desvantagem desse tipo de célula é que necessita de hidrogênio e oxigênio puros, devido ao fato do dióxido de carbono (CO_2) até mesmo em baixas concentrações, afetar a operação da célula e diminuir sua vida útil (U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2009)

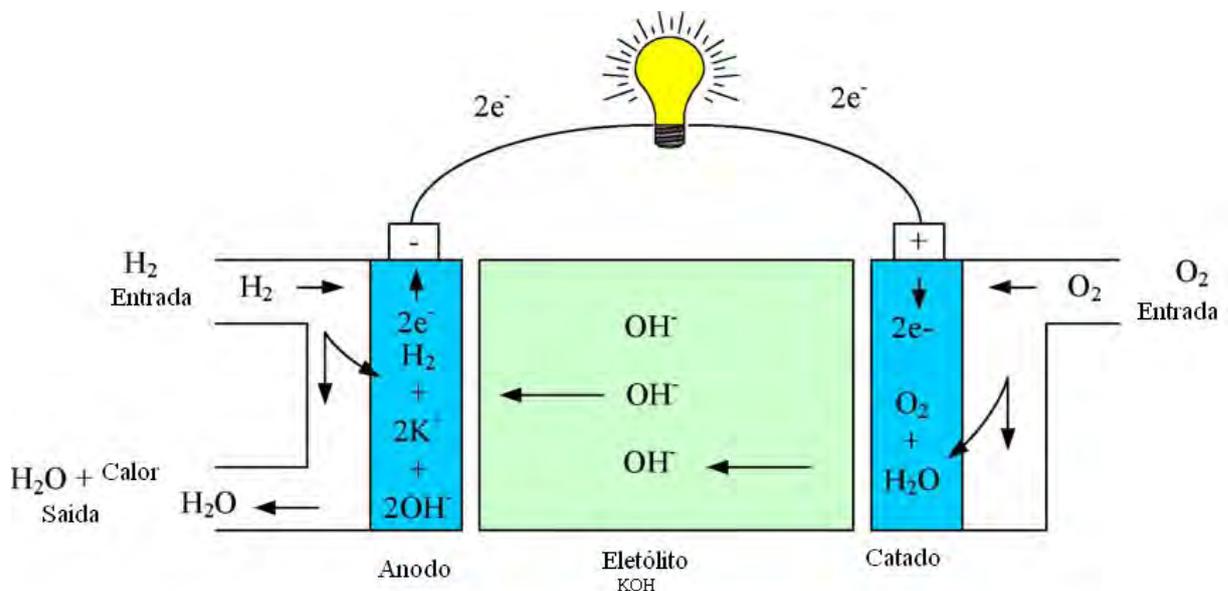


Figura 13 Célula a combustível alcalina (ANDÚJAR J.M., SEGURA F., 2009).

3.4.3. Ácido Fosfórico (PAFC)

Esse tipo de célula tem como eletrólito ácido fosfórico líquido e como catalisador a platina. A célula de ácido fosfórico (Figura 14) é considerada a primeira geração das

células modernas e foi a primeira a ser comercializada, com mais de 260 sistemas de células a combustível já instaladas ao redor do mundo - em hospitais, casas de repouso, hotéis, edifícios de escritórios, escolas, plantas de geração de energia, um terminal de aeroporto, aterros sanitários e plantas de tratamento de água (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009).

As PAFCs são tolerantes a impurezas presentes nos combustíveis fosseis, porém o monóxido de carbono em grande quantidade pode contaminar o catalisador (platina), diminuindo sua eficiência. Sua temperatura de operação esta entre 160°C e 240°C e possui uma eficiência entre 35 e 42% (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009). A sua maior desvantagem é a baixa corrente e potência gerada, comparada com outras células a combustível e esse ponto é recompensado com o aumento de seu tamanho e volume, tornando-se uma célula muito mais pesada para uma mesma potência gerada, se comparada com outras (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009).

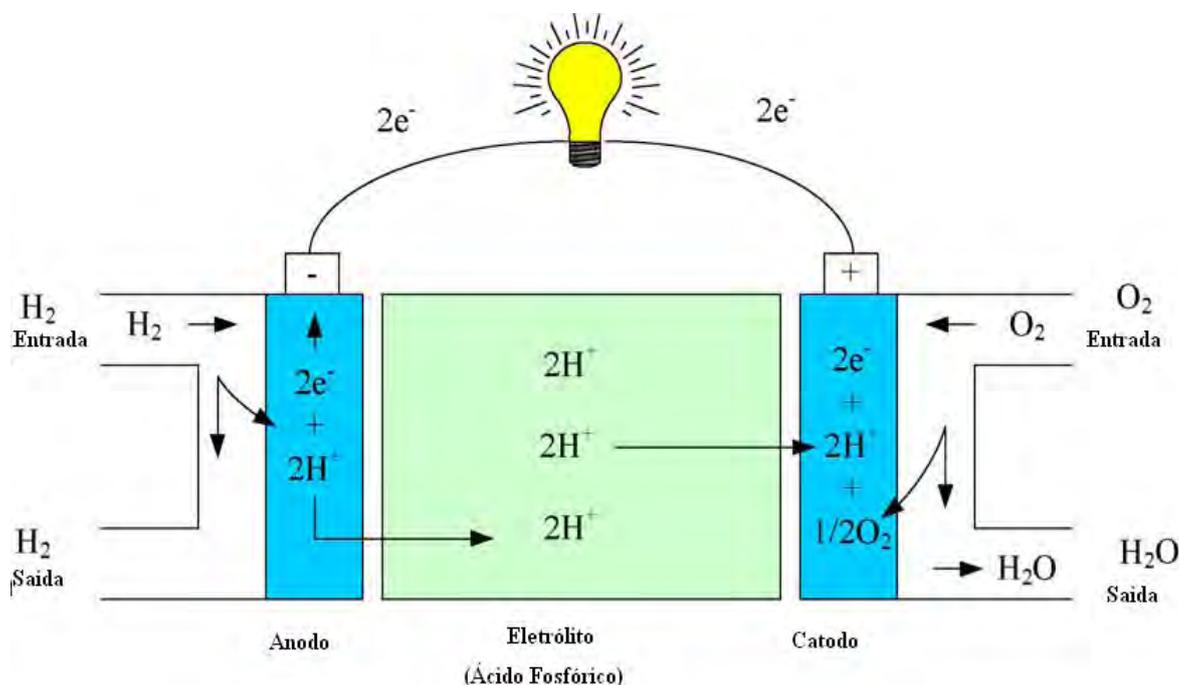


Figura 14 Célula a combustível de ácido fosfórico (ANDÚJAR J.M., SEGURA F., 2009).

3.4.4. Carbonatos Fundidos (MCFC)

A sigla MCFC deriva de “*Molten Carbonate Fuel Cell*”, que significa Célula a Combustível de Carbonato Fundido (sais como o carbonato de sódio, lítio ou potássio, que se fundem em altas temperaturas). Esse tipo de célula (Figura 15) opera em alta temperatura (em torno de 650°C) e dessa forma não necessita de catalisadores nobres. Sua eficiência pode chegar até 60% e caso reaproveite o calor que seria perdido (cogeração), essa eficiência pode chegar a 85%(U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2009).

AS MCFCs não necessitam de reformadores externos, pois podem realizar a reforma internamente. São usadas para aplicações estacionárias de geração de energia.

Uma desvantagem desse tipo de célula é a durabilidade. As altas temperaturas aumentam a corrosão e a falha de componentes da célula a combustível (U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2009).

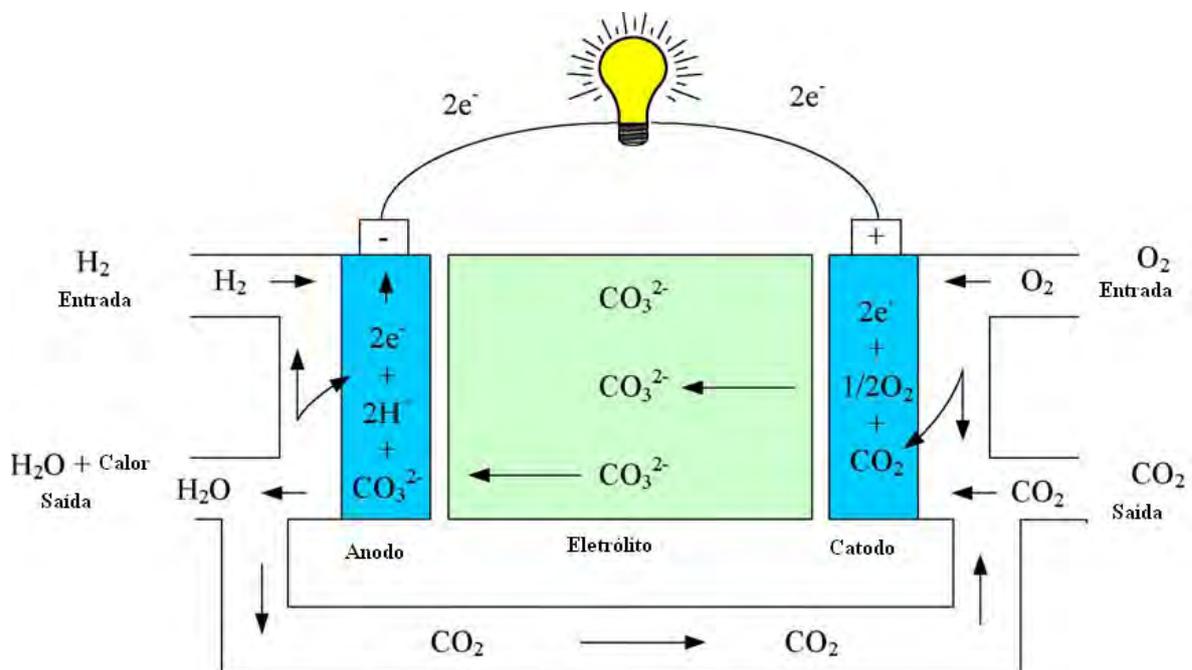


Figura 15 Célula a combustível de carbonatos fundidos (ANDÚJAR J.M., SEGURA F., 2009).

3.4.5. Óxido Sólido Cerâmico (SOFC)

A tecnologia SOFC, é denominada “*Solid Oxide Fuel Cell*”, ou Célula a Combustível de Óxido Sólido (Figura 16), e utiliza um eletrólito cerâmico e sólido, só que atua de forma contrária, com os íons de oxigênio fluindo pelo eletrólito. A eficiência esperada desse tipo de célula é em torno de 60% e também reaproveitar o calor que seria desperdiçado, chegando a uma eficiência de 85%(U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2009).

Essa célula opera em temperatura extremamente alta, em torno de 1000°C, não necessitando, portanto de catalisador nobre. Esse tipo de célula também tem processo de reforma interna, não necessitando de reformador externo.

Como desvantagem, além de ter baixa durabilidade, devido à alta temperatura de operação, esse tipo de célula é de lento acionamento, devido a necessidade de atingir a temperatura necessária para começar a operar (U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2009).

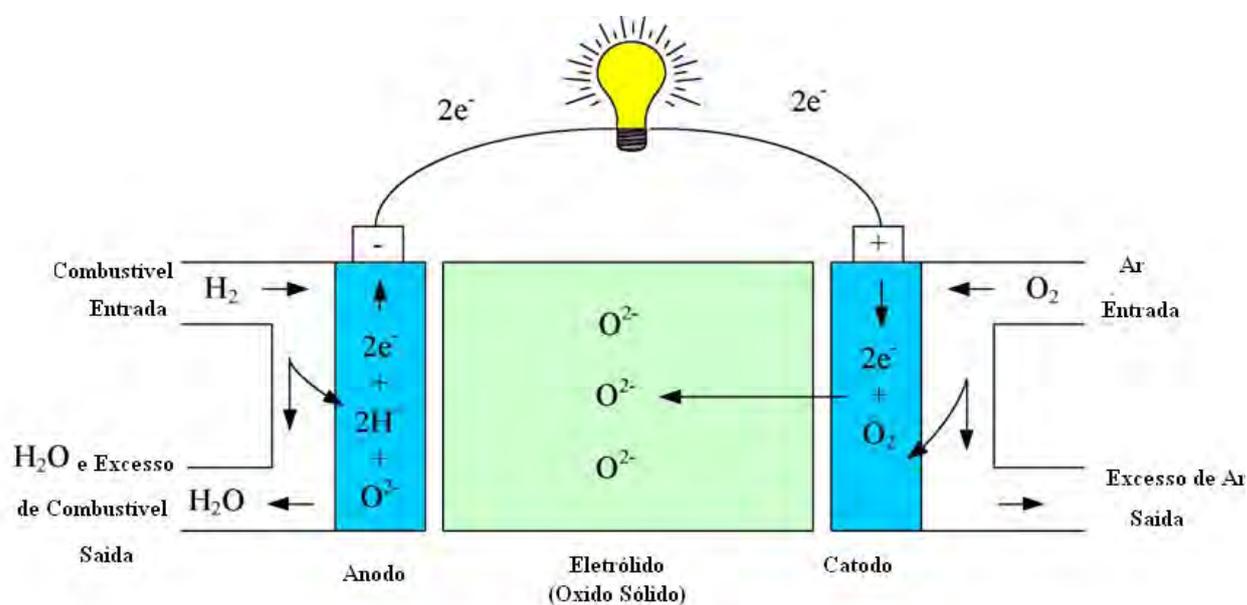


Figura 16 Célula a combustível de óxido sólido (ANDÚJAR J.M., SEGURA F., 2009).

4. SISTEMAS AUTOMOTIVOS QUE UTILIZAM CÉLULA A COMBUSTÍVEL

4.1. Veículos com Motores de Combustão Interna e Veículos com Motores Elétricos

O veículo convencional elétrico, embora com limitações de velocidade e autonomia é a base do veículo híbrido ou do veículo movido pelo sistema célula a combustível. Analisando os pontos favoráveis e desfavoráveis de ambos os mecanismos, o motor de combustão interna (MCI) precisa, além de combustível (diesel, gasolina, gás natural, etc), de outros fluidos como óleos e aditivos. As emissões de gases e partículas de um veículo convencional usando MCI, contribui para a degradação de atmosfera, além disso, precisa-se considerar como outro efeito degradante do meio ambiente, os filtros e óleos descartados da manutenção do MCI. No caso de veículos elétricos há a eletricidade como ponto favorável e até mesmo as baterias consideradas perigosas, podem ser 97% recicláveis (BUENO A.G., 2004).

Dois grandes inconvenientes dos motores de combustão interna (além da emissão de gases poluentes) são: possuírem baixíssima eficiência, raramente ultrapassando 30% e necessitam de sistemas auxiliares para seu correto funcionamento o que contribui para aumentar a sua ineficiência.

Os sistemas auxiliares são (BUENO A.G., 2004):

- Sistema de arrefecimento: Responsável pela eliminação do excesso de calor gerado no cilindro do motor. Esse calor é gerado por diversos meios, sendo os principais a queima do combustível e o atrito entre as partes móveis do motor. O sistema de arrefecimento é composto por radiador, bomba d'água, tubulações, válvulas, ventiladores, correias, etc.
- Sistema de alimentação: Na maioria dos casos, o próprio movimento de êmbolo dentro do cilindro promove a admissão da mistura ar/combustível. É o sistema que menos prejudica o motor, sendo composto por filtros, tubulações, carburador, bomba de injeção entre outros.

- Sistema de exaustão: É responsável pela retirada dos gases queimados de dentro do cilindro, permitindo que uma nova queima possa ocorrer. Constitui-se de: válvulas, tubulações, silenciadores, etc.
- Sistema elétrico/ignição: Neste sistema é gerada a faísca necessária para o início do funcionamento do motor. Constitui-se de: módulos eletrônicos, cabos, velas, bobinas, alternador e outros.
- Sistema de lubrificação: Minimiza o atrito entre as peças móveis do motor, aumentando a vida útil das peças. É composto por bombas e tubulações.

A Figura 17 mostra um diagrama esquemático da composição de um veículo equipado com um motor de combustão interna.

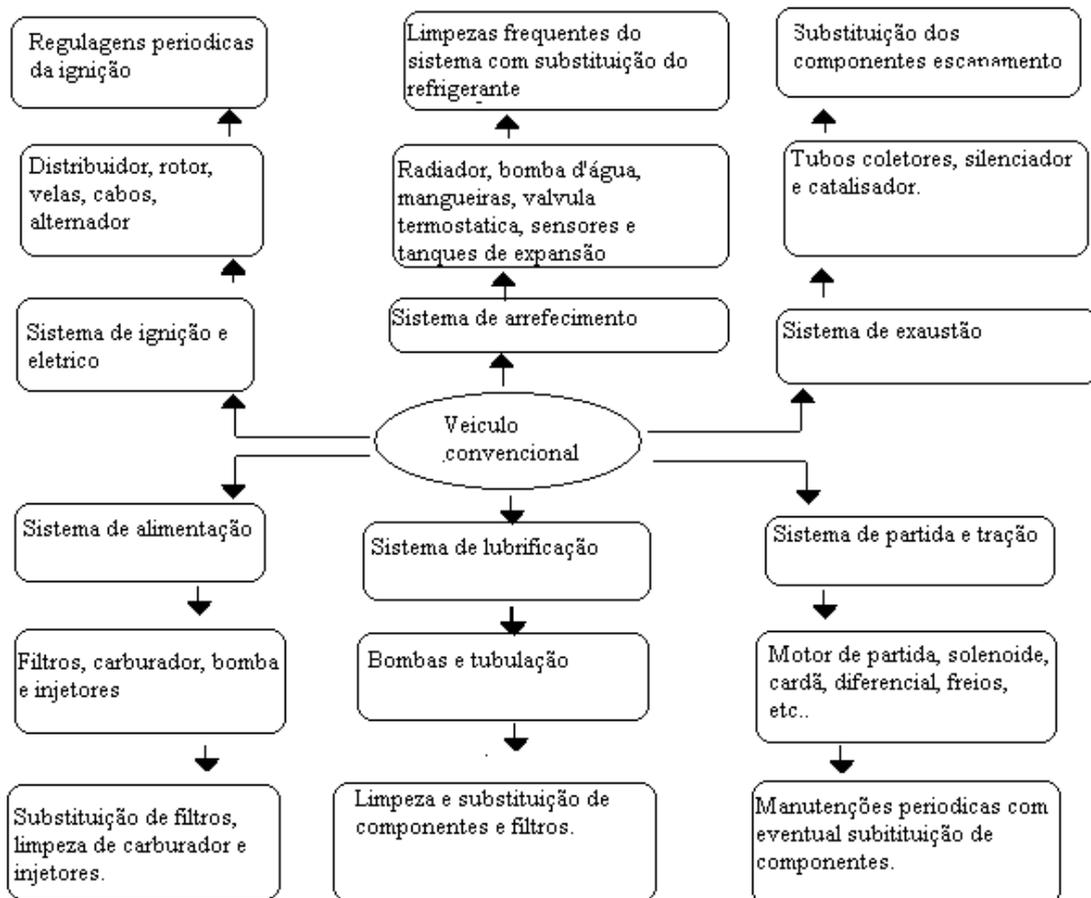


Figura 17 Sistemas auxiliares de um veículo convencional (BUENO A.G., 2004)

Em oposição a diversas peças móveis de um motor de combustão interna, o motor elétrico possui somente uma peça móvel, o rotor, sendo esse um dos principais

motivos da maior eficiência do motor elétrico. Para converter um veículo elétrico a partir de um veículo convencional, retira-se o motor e todos os componentes auxiliares como radiador, filtros, tubulações, carburador, bombas, silenciadores, ventiladores, correias, alternador, motor de partida, tanque de combustível e coloca-se em seu lugar um motor elétrico, um banco de baterias e um controlador. A Figura 18 mostra o quão simples um veículo elétrico é em relação ao convencional mostrado no diagrama anterior.

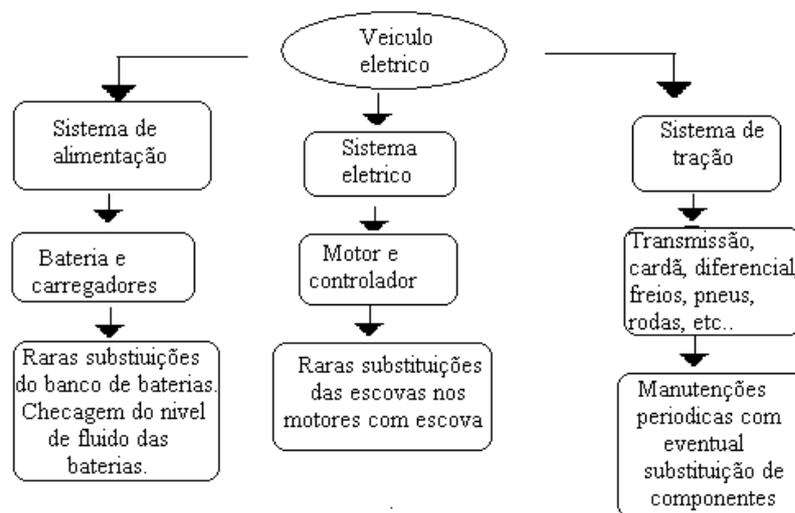


Figura 18 Sistemas auxiliares de um veículo elétrico (BUENO A.G, 2004)

O motor elétrico convencional é geralmente recarregado por baterias. Porém o veículo elétrico, ao invés das baterias, pode ser equipado com FC e tanque de hidrogênio, e passa a ser nomeado de FCV (Fuel Cell Vehicle).

4.2. Aplicação Veicular

Um sistema de célula a combustível projetado para aplicações veiculares (Figura 19) deve ser o mais leve e compacto possível; deve ter rápido acionamento e autonomia. Consiste principalmente dos seguintes componentes (TORRES F.S.,2002):

- Tanque de hidrogênio.
- Dispositivo de célula a combustível e um compressor de ar, para abastecer a célula a combustível com oxigênio.

- Um sistema de resfriamento, para suportar a temperatura de operação.
- Um sistema de gerenciamento de água, para manter a membrana da célula úmida.
- Um inversor para converter a tensão DC para AC e frequência variável para comandar o motor de propulsão
- Um motor de propulsão e transmissão AC
- Uma bateria ou ultracapacitor (que recebem energia do freio regenerativo) pode ser conectada para abastecer a potência suplementar ao sistema.

O bom funcionamento de um sistema que opera com célula a combustível depende da operação de diversos subsistemas importantes. O dispositivo de célula a combustível é o coração do sistema e não pode operar sem componentes que controlam o ar, a água, um sistema de resfriamento da célula, etc.

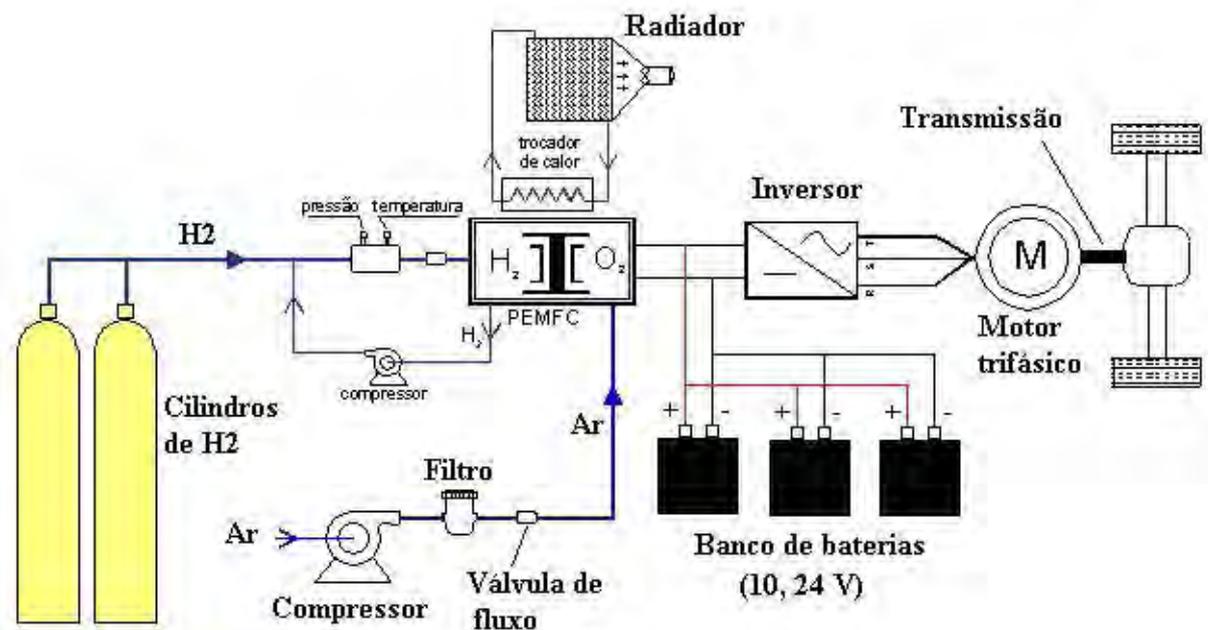


Figura 19 Sistema automotivo com FC (SORDI A., 2008).

5. O PROGRAMA BRASILEIRO DE ÔNIBUS MOVIDO A FC

O projeto brasileiro de ônibus movidos a célula a combustível, é desenvolvido pelo Governo Brasileiro através do Ministério das Minas e Energia (MME); em conjunto com a EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos), o PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento), o GEF (*Global Environment Facility*), FINEP (Agencia Financiadora de Pesquisa e Projetos) e com sistema de tração desenvolvido pela ELETRA (empresa brasileira proprietária de tecnologia de tração elétrica para transporte urbano).

Essa tecnologia garante emissão zero de poluentes na atmosfera e resulta em uma solução de desenvolvimento de transportes limpos urbanos no Brasil (BRAGA L.B. et al, 2009)

O EMTU/SP é uma companhia nacional que coordena projetos no Brasil e tem como política tentar minimizar emissões de poluentes de transporte público, nesse sentido contribuiu e desenvolveu muitas pesquisas na área de energia, entre os quais testes de transportes usando etanol, ônibus movido a gás natural, ônibus híbrido e agora ônibus movido a hidrogênio com FC.

O primeiro ônibus urbano movido com célula a combustível desenvolvido no Brasil (como é mostrado na Figura 20) tem 12 metros de comprimento, 3 portas, capacidade para 63 passageiros, piso baixo para maior segurança e conforto, sistema de ar condicionado e autonomia de 300 km (15 kg de hidrogênio por 100 km rodados). O ônibus começou a circular na região metropolitana de São Paulo em 2009, onde foi detectada a maior emissão de poluentes. (BRAGA L.B.et al, 2009)



Figura 20 Ônibus movido com célula a combustível no Brasil (BRAGA L.B.et al, 2009)

Tomando como base o projeto brasileiro, a seguir serão descritas as principais características do veículo (PROJETO BRASILEIRO, 2009):

5.1. Estrutura do Veículo

A estrutura do ônibus brasileiro movido a célula a combustível é composta por um conjunto monobloco chassis/carroceria ao sistema de tração. O sistema de tração desse ônibus é composto por um sistema de célula a combustível, um sub-sistema armazenador de hidrogênio e um sub-sistema de tração. O subsistema de tração é composto por motor elétrico, comandos eletrônicos e equipamentos auxiliares (como compressores, para o gerenciamento da alimentação de ar e combustível, sistema de controle da variação de potência, etc).

A durabilidade esperada para esses veículos é cerca de 20 anos, porém os subsistemas devem ter uma durabilidade ainda maior, e os componentes eletrônicos uma durabilidade um pouco menor. Assim, a vida útil esperada para as partes principais é (PROJETO BRASILEIRO, 2009):

- Chassi e carroceria: 20 anos;
- Sistema elétrico e sistema de tração: 30 anos ou 3.000.000 km;
- Sistema de célula a combustível: 3 anos ou 250.000 km (primeiros protótipos) e 8 anos ou 700.000 km (alvo).

5.1.1. Chassis

O sistema de direção do ônibus é hidráulico. A bomba hidráulica é ativada pelo motor elétrico e isolada eletricamente da estrutura do veículo. Dessa forma, em caso de falha do sistema elétrico, o sistema de direção não sofrerá pane imediata e será mantido nos níveis apropriados por no mínimo 20 segundos, a fim de assegurar segurança na manobra do veículo (PROJETO BRASILEIRO, 2009).

A suspensão é inteiramente pneumática e com sistema de variação de altura. A suspensão deve, em todas as condições de operação do veículo (PROJETO BRASILEIRO, 2009):

- Diminuir os choques e as vibrações da carroceria;
- Assegurar a estabilidade do veículo;
- Manter constante a altura da terra em relação aos eixos, assegurando o conforto dos passageiros.

O sistema de freios é composto por (PROJETO BRASILEIRO, 2009):

- O sistema de freio de fricção é um freio a tambor ou a disco, com ação pneumática e é capaz de causar uma desaceleração de 5 m/s^2 , com o veículo em sua situação de peso total.
- O sistema de freio elétrico é acionado automaticamente pelo pedal do freio. Pode ter a capacidade de freio regenerativo que auxilia também a frenagem pneumática, aumentando a eficiência nas paradas e a vida útil dos componentes do sistema de freio do veículo.
- Freio de estacionamento: atua nos eixos traseiros, atuando automaticamente como um freio de emergência.

5.1.2. Subsistemas para a Propulsão, a Geração da Energia e a Alimentação das Células a Combustível.

O equipamento elétrico da tração do veículo é projetado para suportar as exigências de desempenho. O sistema de propulsão utiliza em princípio, um motor elétrico AC, água, ar ou o óleo de refrigeração, com um redutor de velocidade agindo nas rodas traseiras do veículo.

A temperatura de operação das células a combustível é especificada pelo fabricante, e deve ser mantida nestes níveis por um sistema termostato, tal como um radiador com ventiladores eletronicamente controlados. Se esse sistema utilizar a água como fluido refrigerante, a água pode também ser usada para umedecer o ar e o fluxo do gás combustível antes de sua entrada no sistema de célula a combustível, caso seja

necessário. Neste caso, algum dispositivo (tal como um filtro de troca de íons, por exemplo) deverá manter a água pura, para impedir que a água se torne condutor de eletricidade.

O subconjunto elétrico é composto por interfaces de transferência de energia do sistema de célula a combustível aos componentes elétricos, ao motor e aos demais componentes do veículo. Os interruptores de corrente para a proteção dos circuitos e dos controladores de tração do veículo e dos sistemas auxiliares são instalados no mesmo lugar. Os conversores de corrente DC para corrente AC fornecem energia nas diferentes tensões requeridas para operação do motor e aos outros componentes do veículo. Os componentes elétricos de alta energia são refrigerados por um líquido a fim reduzir o tamanho e o peso.

O abastecimento deve ser realizado sob uma pressão limitada a 3 bar, afim de assegurar uma distribuição uniforme e o uso completo do combustível, bem como o umedecimento dos gases antes da entrada no sistema de célula a combustível. (PROJETO BRASILEIRO, 2009).

5.1.3. Subconjunto das Células a Combustível de Hidrogênio

As células a combustível de hidrogênio são do tipo da membrana de troca protônica (PEMFC). O número e o tamanho das pilhas (“stack”) de célula a combustível em série, são especificadas afim de suprir a demanda de energia requerida por todos os sistemas e subsistemas elétricos do veículo, incluindo aquela para os momentos de alta demanda requeridos na partida do motor e em acelerações curtas. Os “labirintos” e os caminhos internos distribuem os fluxos do combustível, de ar e de líquido refrigerante, e também coletam a água produzida pelas operações das células a combustível e ajudam na remoção do calor e na umidificação, mantendo o sistema na temperatura de operação apropriada.

O hidrogênio comprimido é armazenado nos cilindros pressurizados, instalados no alto do ônibus, para assegurar a ventilação apropriada dos cilindros e preservar o espaço interior do veículo.

O controle de aceleração deve apresentar as seguintes características, em sua condição de peso total:

- O controle da aceleração corresponde à posição do pedal do acelerador, fornecendo uma aceleração constante, sem interrupção na intensidade do esforço da tração;
- Partindo do ponto morto em um pavimento horizontal e em um ambiente com uma temperatura entre 15 e 25 °C, o veículo deverá alcançar 50 km/h em 18 segundos;

6. ANÁLISE ECONÔMICA

Nessa seção efetua-se análise econômica de ônibus movido à célula de combustível baseada na metodologia desenvolvida por SILVEIRA J.L. et al (1999). Foi considerado, para efeito comparativo, hidrogênio proveniente de quatro fontes diferentes: eletrólise com energia eólica, eletrólise com energia de hidroelétrica (caso de verter água), reforma a vapor de gás natural e reforma a vapor de etanol brasileiro. Os custos do hidrogênio produzido por eletrólise com energia eólica e reforma a vapor de gás natural estão de acordo com PADRÓ C.E.G. et al (1999), considerando a produção de hidrogênio em larga escala (plantas com custo estimado para 2010) entre 1,34 até 25,4 milhões Nm^3/dia . O custo de hidrogênio por reforma de etanol foi baseado na metodologia de SOUZA A.C.C. et al (2006), considerando produção em média escala ($7200 \text{ Nm}^3/\text{dia}$) e o custo de hidrogênio por eletrólise com energia de hidrelétrica foi baseado na metodologia de FERREIRA P.F. et al (2003), considerando energia vertida turbinável de Itaipu.

Os custos de produção de hidrogênio por esses processos estão apresentados na Figura 21:

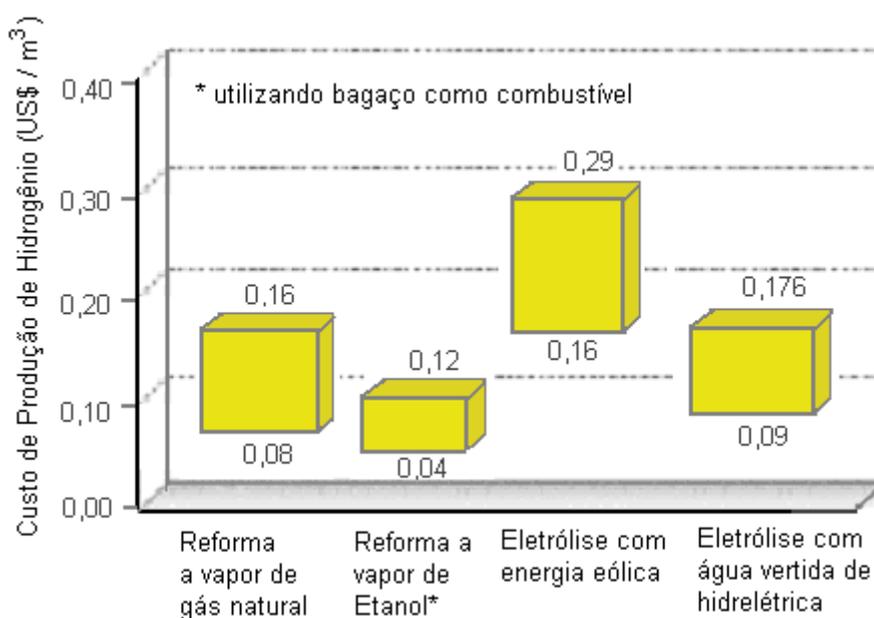


Figura 21 Custos de produção de hidrogênio por diferentes processos.

Foram utilizados os seguintes custos médios do hidrogênio:

- Eletrólise com energia eólica: 0,225US\$/m³
- Eletrólise com energia de hidrelétrica: 0,133US\$/m³
- Reforma a vapor de gás natural: 0,12 US\$/m³
- Reforma a vapor de etanol: 0,08 US\$/m³

O custo do diesel foi obtido de acordo com a ANP (Agência Nacional de Petróleo, 2009) dados do dia 26/12/2009 e a cotação do dólar utilizada foi de 1,743, consultada 30/12/2009, de acordo com VALOR ONLINE (2009).

- Custo do diesel: 1,13 US\$/l (1,98R\$/l).

Esses custos foram convertidos para US\$/kWh levando em conta o poder calorífico inferior do hidrogênio e do diesel e obteve-se 0,0766US\$/kWh, 0,044978 US\$/kWh, 0,04054 US\$/kWh, 0,02702 US\$/kWh e 0,11 US\$/kWh, respectivamente.

Para o prosseguimento da análise, outros parâmetros foram considerados:

- Variou-se os investimentos de células a combustível (I_{FC}) = US\$ 2000/kW, US\$ 4000/kW e US\$ 6000/kW de acordo com os autores TORRES F.S. (2002), DOTY F.D. (2004) e NETO E.F.G.(2005).
- Investimento em um motor a combustão interna (I_{MCI}) = US\$ 1000/kW (NETO E.F.G., 2005)
- Eficiência da FC e do MCI: $\eta_{FC} = 48\%$ e $\eta_{MCI} = 27\%$ (NETO E.F.G., 2005)
- Potência elétrica da FC e potência do MCI: $W_{FC} = 250$ kW e $W_{MCI} = 175$ kW (NETO E.F.G, 2005)
- Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio e do Diesel, respectivamente: $PCI_H = 119742,48$ kJ/kg e $PCI_D = 42552,40$ kJ/kg (VILELA I. A. C.,2007)
- Vida útil do ônibus: $\Delta S = 3.360.000$ km, considerando o ônibus rodando 4.800 h/ano, durante 17,5 anos (durabilidade de um ônibus entre 15 e 20 anos) de acordo com MINISTERIO DAS MINAS E ENERGIA (2008)
- Período equivalente de operação: $H = 4.800$ h/ano (16 h por dia por 300 dias)
- O período de amortização de capital (k) foi de 1 a 10 anos
- A taxa anual de juros foi de 8% ao ano.

Não foram considerados nos custos do ônibus a troca de células a combustível a cada 3 anos ou 250.000 km (como mencionado no item 5.1.)

As equações utilizadas foram:

Para o cálculo da massa de combustível consumido pelo veículo usou-se a Equação 6.1 (kg/s)

$$\dot{m} = \frac{W}{\eta \cdot PCI} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Para o custo do investimento com um período de amortização de capital de 1 a 12 anos e com taxas de juros de 8%, usou-se as equações 6.2 e 6.3 (ambas adimensionais).

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (6.2)$$

$$f = \frac{q^k \cdot (q - 1)}{q^k - 1} \quad (6.3)$$

Considerou-se também para o cálculo do custo do ônibus em US\$/kmh, o custo de investimento, o custo do combustível e custo de manutenção em US\$/kmh representados pelas equações 6.4, 6.5 e 6.6, respectivamente:

$$C_{inv1} = \frac{I \cdot f \cdot w}{H \cdot \Delta S} \quad (6.4)$$

$$C_{f1} = \frac{C_{comb} \cdot PCI \cdot \dot{m}}{\Delta S} \quad (6.5)$$

$$C_{main1} = (0,1 \cdot C_{inv}) \quad (6.6)$$

E para o cálculo o custo do ônibus em US\$/kWh, considerou-se: o custo de investimento, o custo do combustível e custo de manutenção em US\$/kWh representados pelas equações 6.7, 6.8 e 6.9, respectivamente:

$$C_{inv2} = \frac{I.f}{H} \quad (6.7)$$

$$C_{f2} = \frac{C_{comb} \cdot PCI \cdot \dot{m}}{w} \quad (6.8)$$

$$C_{main2} = (0,1 \cdot C_{inv}) \quad (6.9)$$

Utilizando as equações acima, chega-se as equações globais:

$$C_{onibus1} = \left(\frac{I.f \cdot w}{H \cdot \Delta S} \right) + \left(\frac{C_{comb} \cdot PCI \cdot \dot{m}}{\Delta S} \right) + 0,1 \cdot \left(\frac{I.f \cdot w}{H \cdot \Delta S} \right) \quad (6.10)$$

$$C_{onibus2} = \left(\frac{I.f}{H} \right) + \left(\frac{C_{comb} \cdot PCI \cdot \dot{m}}{w} \right) + 0,1 \cdot \left(\frac{I.f}{H} \right) \quad (6.11)$$

$$R = (C_{onibus_{mci}} - C_{onibus_{FC}}) \cdot H \cdot \Delta S \quad (6.12)$$

As equações 6.10 e 6.11 correspondem ao custo do transporte urbano em US\$/kmh e em US\$/kWh, respectivamente. A primeira parte da equação 6.10 corresponde à equação 6.4, que indica o investimento na tecnologia de célula a combustível ou motor de combustão interna. A segunda parte da mesma equação corresponde à equação 6.5, que indica o investimento no combustível utilizado e a terceira parte dessa equação corresponde à equação 6.6, que indica o custo de manutenção do transporte, considerando esse sendo 10% do custo de investimento. O mesmo ocorre com a equação 6.11, porém as equações correspondentes a investimento

na tecnologia, investimento no combustível e custo de manutenção são as equações 6.7, 6.8 e 6.9 respectivamente.

A equação 6.12 corresponde à viabilidade econômica do transporte urbano movido com sistema de célula a combustível em relação ao transporte urbano movido com motor de combustão interna. Quando os valores da receita forem negativos (eixo y negativo) significa que o custo do transporte com FC é maior que o custo do transporte com MCI, a partir do momento que a receita passa a ser positiva (eixo y positivo), significa que o transporte com FC passa a ser viável em relação ao transporte com MCI.

Substituindo-se os valores, chega-se aos resultados:

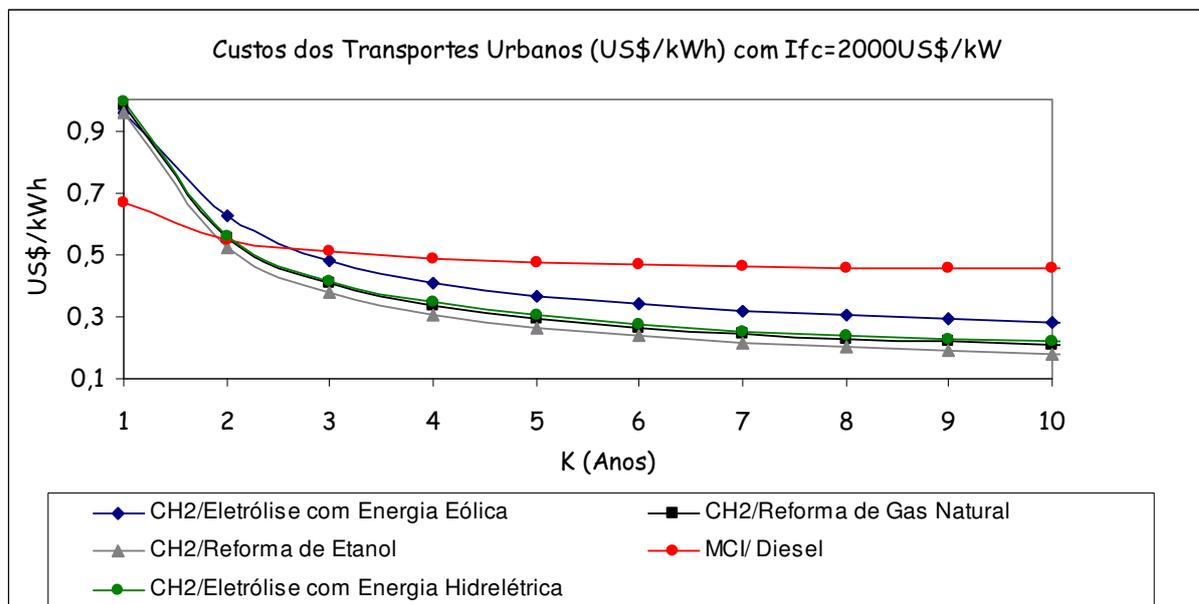


Figura 22 Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 2000 US\$/kW

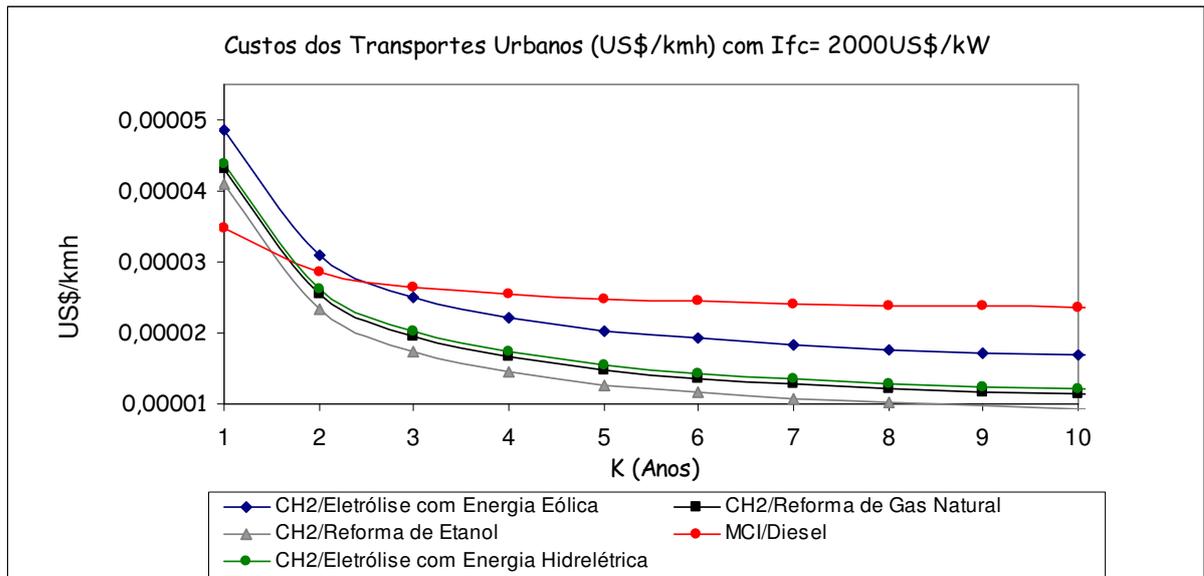


Figura 23 Custo de transporte urbano(US\$/kmh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 2000 US\$/kW

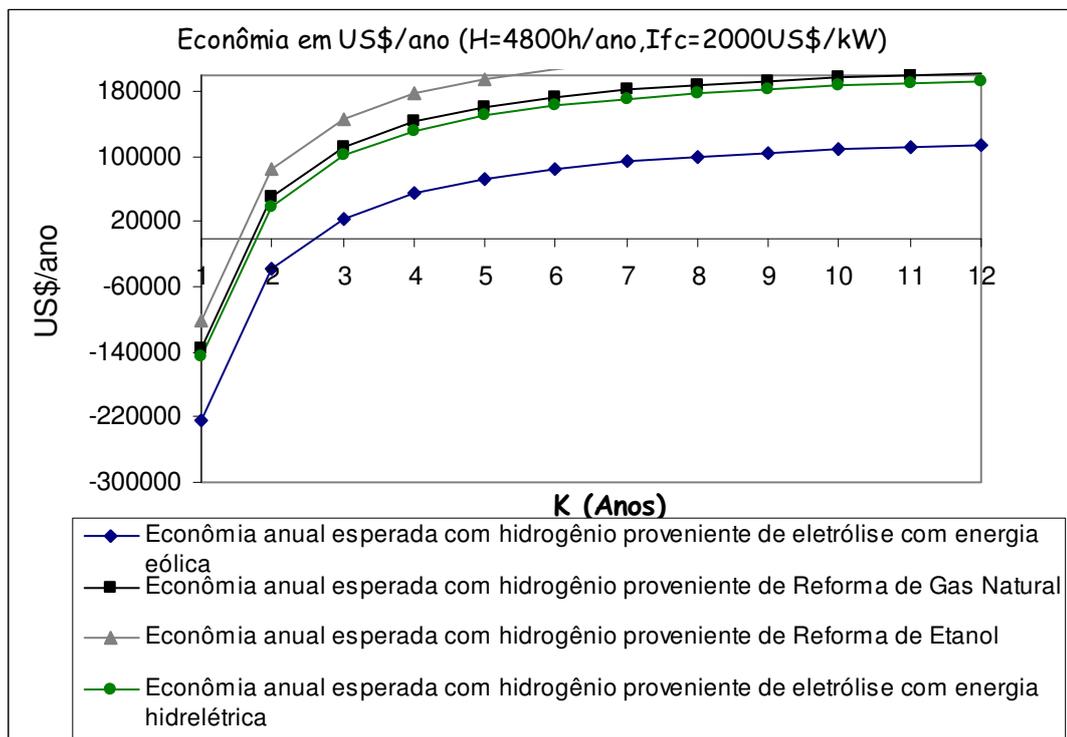


Figura 24 Economia anual esperada, tomando como base o custo da célula a combustível 2000 US\$/kW

Das figuras 22 e 23 percebe-se que com um investimento no sistema de células a combustível de 2000 US\$/kW, um ônibus movido com hidrogênio produzido a partir

de reforma a vapor de etanol, ônibus movido com hidrogênio de reforma a vapor de gás natural e de eletrólise com energia de hidroelétrica tornam-se economicamente mais viável que um ônibus movido com MCI no período compreendido entre 1 e 2 anos; já o ônibus movido com hidrogênio proveniente de eletrólise com energia eólica torna-se economicamente mais viável num período compreendido entre 2 e 3 anos. É possível confirmar esses tempos com o gráfico mostrado na figura 24, o qual demonstra que o tempo de retorno de investimento (payback) de um ônibus movido com FC e hidrogênio a partir de reforma de etanol, hidrogênio a partir de reforma de gás natural e eletrólise com energia proveniente de hidroelétrica esta compreendido entre 1 e 2 anos e de hidrogênio de eletrólise com energia eólica esta em torno de 2 e 3 anos.

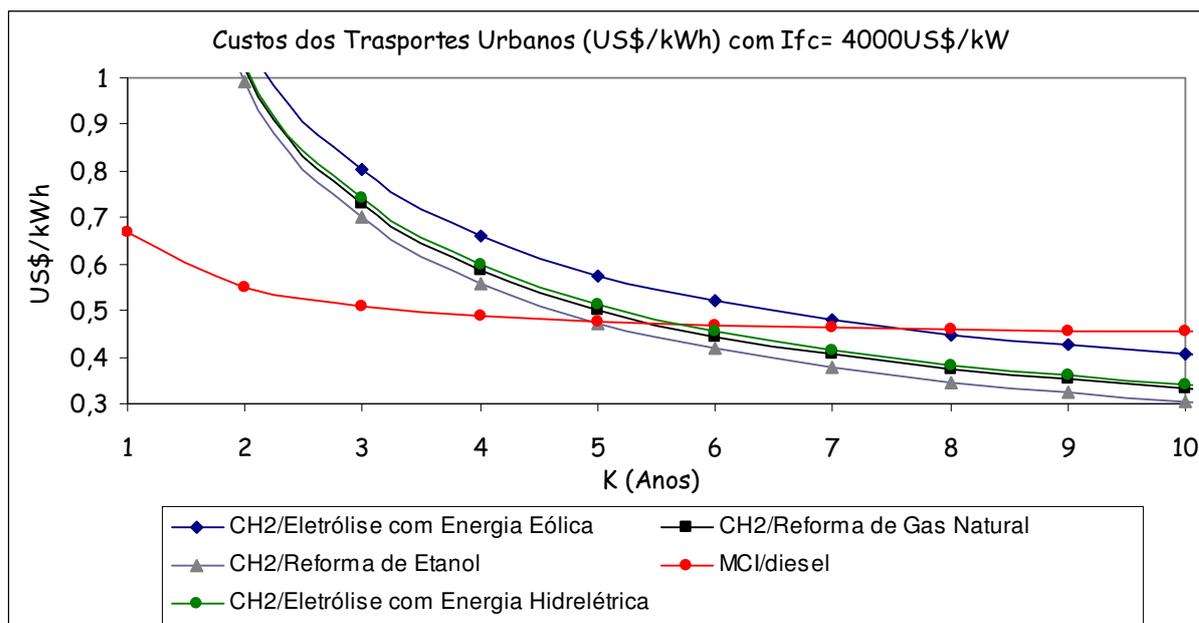


Figura 25 Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 4000 US\$/kW

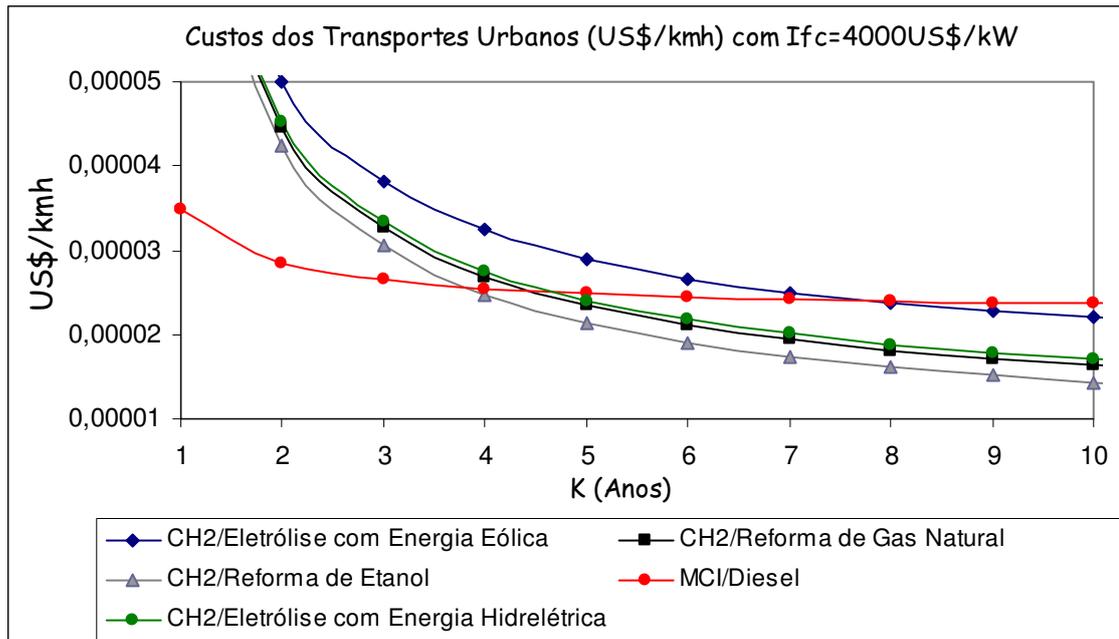


Figura 26 Custo de transporte urbano (US\$/kmh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 4000 US\$/kW

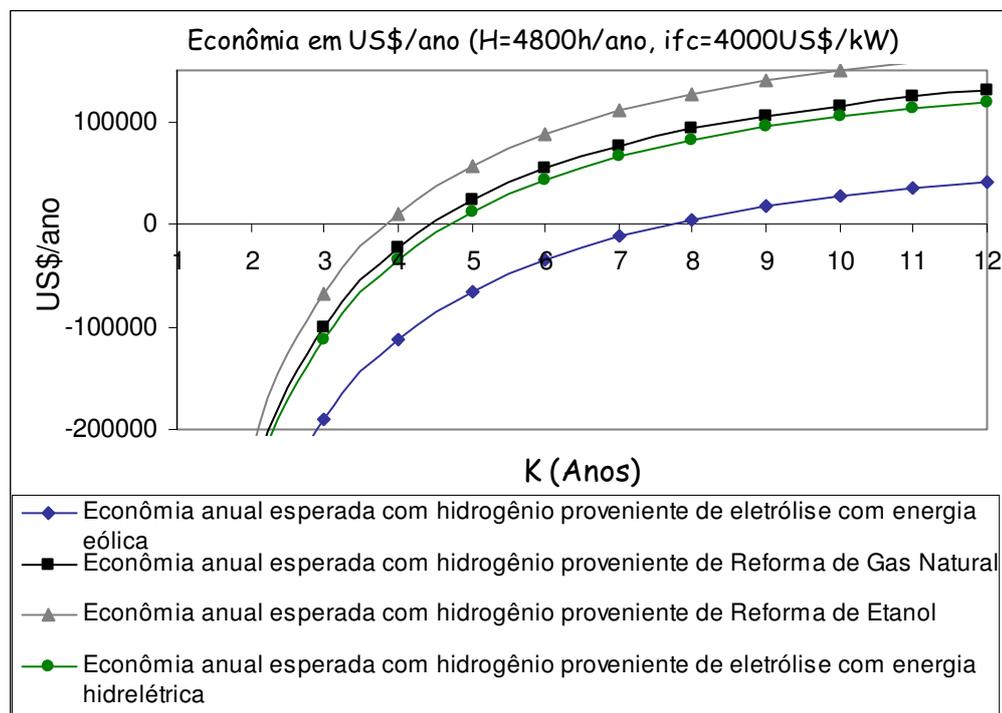


Figura 27 Economia anual esperada, tomando como base o custo da célula a combustível 4000 US\$/kW

Das Figuras 25 e 26 percebe-se que com um investimento no sistema de células a combustível de 4000 US\$/kW, um ônibus movido com hidrogênio produzido a partir

de reforma a vapor de etanol torna-se economicamente mais viável que um ônibus movido com MCI num período compreendido entre 3 e 4 anos, já o ônibus movido com hidrogênio de gás natural e de eletrólise com energia de hidroelétrica tornam-se economicamente mais viável que um ônibus com MCI a partir de 4,5 anos, enquanto o ônibus movido com hidrogênio proveniente de eletrólise com energia eólica a partir de 8 anos. É possível confirmar esses tempos com o gráfico mostrado na figura 27, o qual demonstra que o tempo de retorno de investimento (payback) de um ônibus movido com FC e hidrogênio a partir de reforma de etanol esta compreendido entre 3 e 4 anos, de hidrogênio a partir de reforma de gás natural e eletrólise com energia proveniente de hidroelétrica esta em torno de 5 anos e de eletrólise com energia eólica esta em cerca de 8 anos.

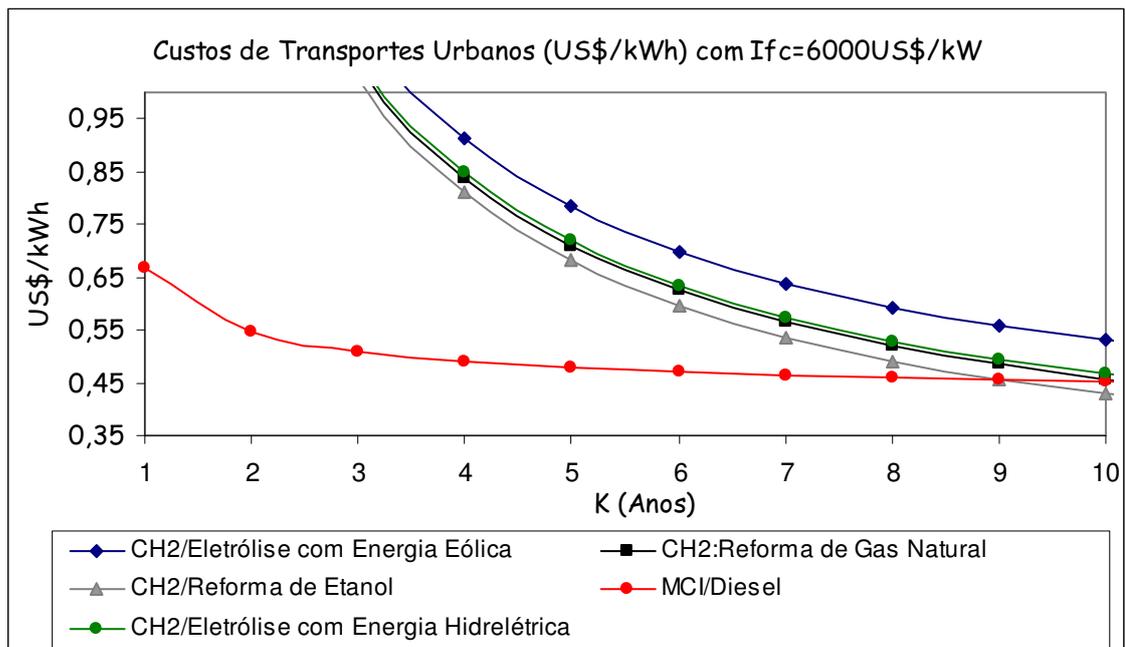


Figura 28 Custo de transporte urbano (US\$/kWh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 6000 US\$/kW

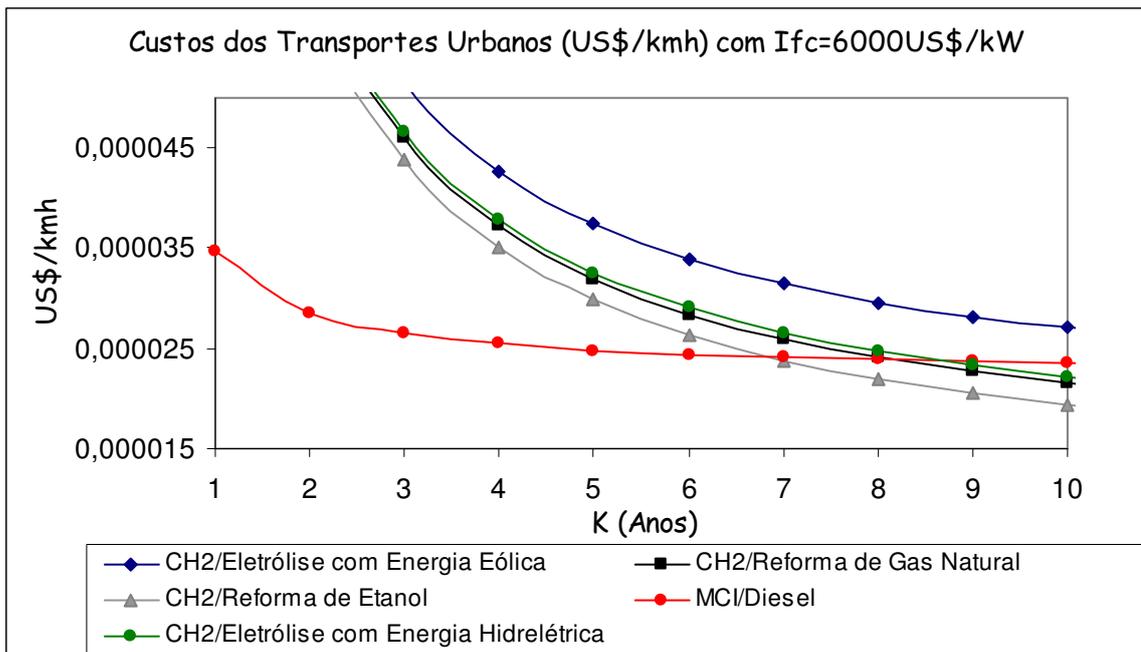


Figura 29 Custo de transporte urbano (US\$/kmh), tomando como base custo do sistema de célula a combustível 6000 US\$/kW

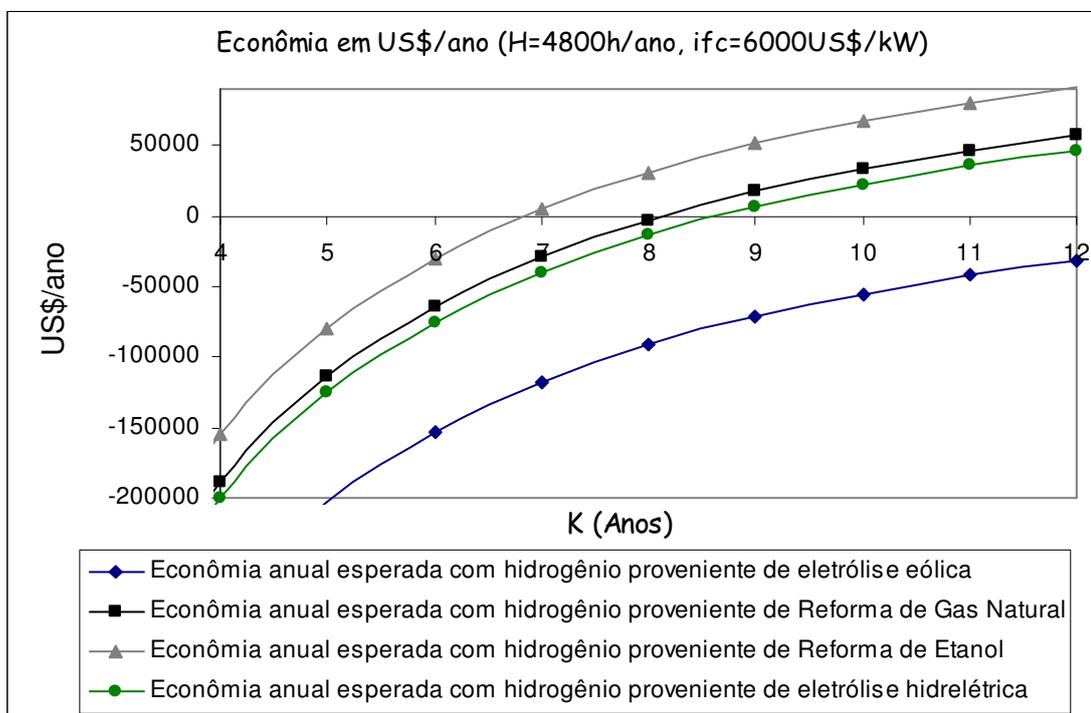


Figura 30 Economia anual esperada, tomando como base o custo da célula a combustível 6000 US\$/kW

Analisando o gráfico de custo de transporte urbano na Figuras 28 (investimento de célula a combustível de 6000US\$/kW), pode-se observar que o custo do transporte urbano operando com hidrogênio a partir de reforma a vapor de etanol torna-se economicamente viável em relação a um ônibus operando com MCI a partir de 9 anos, os transportes com hidrogênio a partir de reforma a vapor de gás natural e eletrólise com energia proveniente de hidroelétrica a partir de 10 anos. Já o transporte com hidrogênio a partir de eletrólise proveniente de energia eólica não se mostra economicamente viável no período de 1 a 10 anos. Analisando o gráfico de custo de transporte urbano na Figuras 29 com investimento de célula a combustível de 6000 US\$/kW e o gráfico de viabilidade econômica (Figura 30), pode-se observar que o custo do transporte urbano operando com hidrogênio a partir de reforma a vapor de etanol torna-se economicamente viável em relação a um ônibus operando com MCI em um período entre 6 e 7 anos; os transportes com hidrogênio a partir de reforma a vapor de gás natural e eletrólise com energia proveniente de hidroelétrica a partir de 8 anos. Já o transporte com hidrogênio a partir de eletrólise proveniente de energia eólica também não se torna economicamente mais viável no período de 1 a 10 anos. Isso se deve ao alto investimento na tecnologia de células, muito superior ao investimento em um ônibus com motor de combustão interna. Porém pode-se observar, que quanto maior o tempo de operação, mais economicamente viável torna-se o ônibus movido com sistema de célula a combustível, isso se deve ao fato da eficiência do ônibus com FC ser 48%, enquanto o ônibus com MCI cerca de 27%, além do PCI do hidrogênio ser muito maior que o PCI do diesel.

6.1. Simulação Computacional

Foi desenvolvido um software computacional, em linguagem DELPHI para complementar a análise econômica. A simulação realiza uma comparação entre 2 tipos de transportes, operando com diferentes combustíveis (diesel, gás natural, hidrogênio) e diferentes tecnologias (FC e MCI).

A vantagem da simulação computacional é facilitar a variação de valores na análise econômica, por exemplo: quando ocorre alteração no custo do diesel, é possível colocar esse valor na simulação computacional e observar os gráficos de custos em US\$/kmh, em US\$/kWh e o gráfico da receita. Também é possível variar o tipo de combustível, ou a eficiência do transporte, etc.

Como trata-se de um programa de comparação entre transportes é necessário fornecer os dados iniciais para ambos os tipos de transportes: MCI e FC. Esses dados são: Eficiência do Transporte (%), Potência (kW), Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível (kJ/kg), Custo da Tecnologia (MCI ou FC) em US\$/kW , Período de Operação do Veículo (h/ano), Vida Útil do Transporte (km), Custo do Combustível a ser Utilizada (US\$/kWh), Taxa Anual de Juros (%) e Período de Operação (anos), conforme a Figura 31.

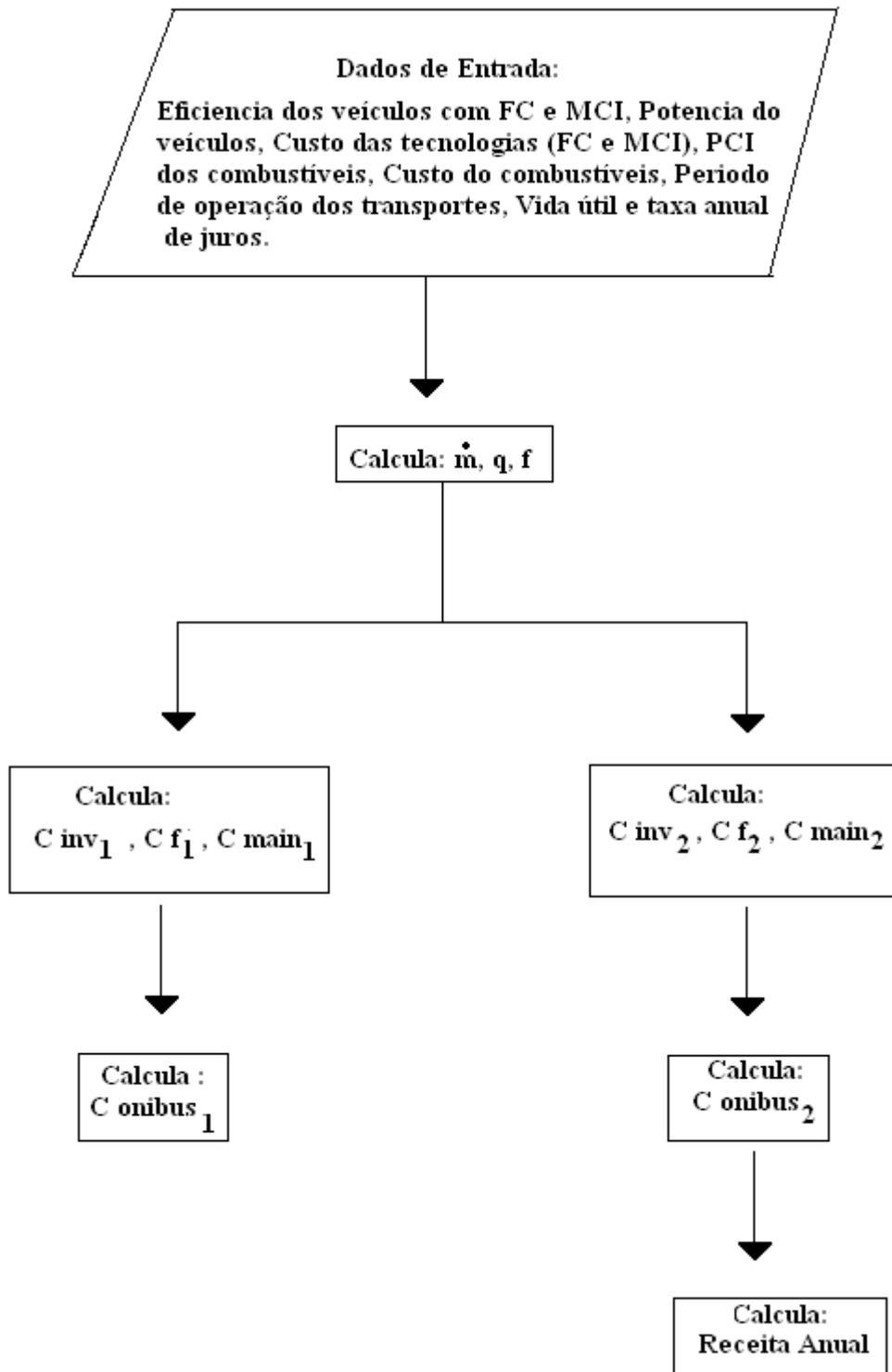


Figura 31 Diagrama de blocos do software desenvolvido.

Com os valores dados, o programa é capaz de calcular os custos do transportes em US\$/kWh (C_{onibus_1}), US\$/kmh (C_{onibus_2}) e o gráfico de receita anual esperada (R).

As Figuras 32, 33 e 34 mostram a simulação computacional realizada pelo software desenvolvido.

The screenshot shows a software window titled 'Simulação Computacional' with a menu bar containing 'Simulação', 'Receita Anual Esperada', and 'Sair'. The main area is divided into two columns for data entry:

	Onibus com FC	Onibus com MCI
Custo do Combustível (US\$/kWh)	0.027	0.11
Juros (%)	8	8
Custo de Investimento (US\$/kW)	2000	1000
Eficiência do Sistema (%)	48	27
PCI do Combustível (kJ/kg)	119742.48	42552.40
Período de Operação (h/ano)	4800	4800
Vida útil do ônibus (km)	3360000	3360000
Potência do Motor (kW)	250	175

At the bottom center of the input area is a button labeled 'Aceitar'.

Figura 32 Entrada de dados do programa

Conforme é mostrado na Figura 32, entra-se com os dados dos dois tipos de transportes que se quer comparar. No desta simulação, comparou-se um ônibus movido com sistema de célula a combustível e com combustível hidrogênio proveniente do processo de reforma de etanol e um ônibus com MCI e alimentado com diesel.

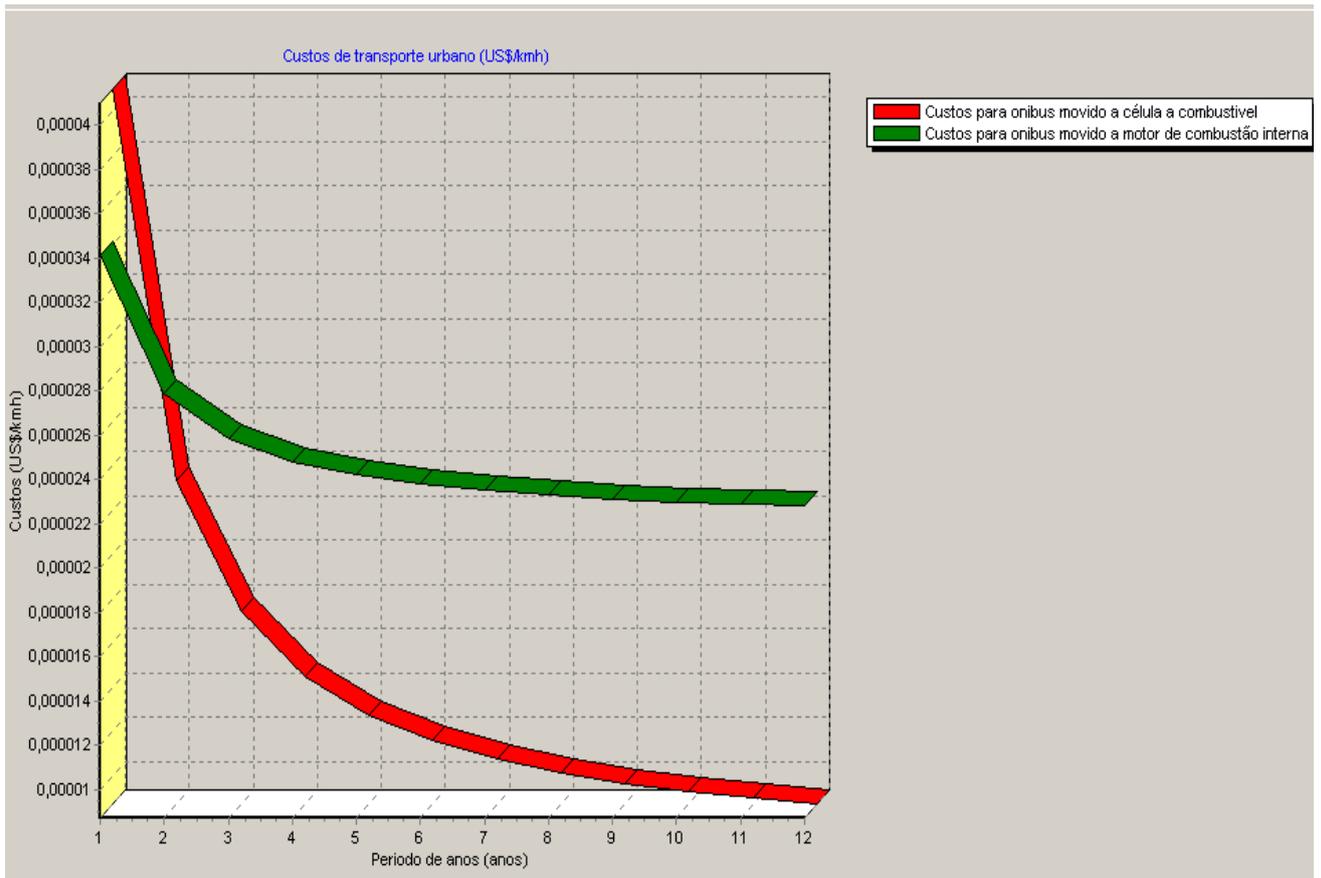


Figura 33 Gráfico de custo em US\$/kmh gerado.

Após a entrada de dados apresentados na Figura 32 é gerado o gráfico de comparação de custo dos dois tipos de ônibus, conforme é apresentado na Figura 33, em que a linha vermelha simula os custos de um ônibus movido com célula a combustível e hidrogênio proveniente de reforma a vapor de etanol em função do tempo e a linha verde simula os custos do ônibus movido com MCI e diesel em função do tempo.

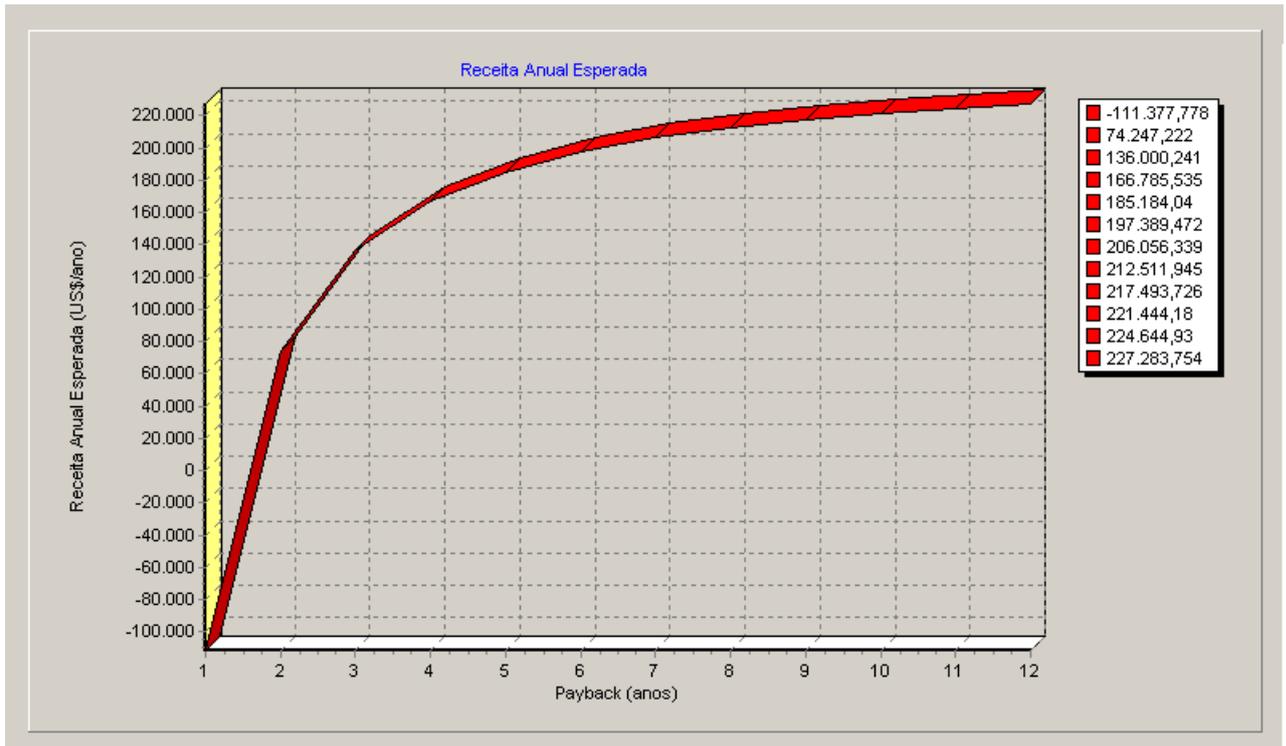


Figura 34 Gráfico de receita em US\$/ano gerado pelo programa

Na Figura 34, pode-se observar o gráfico da receita gerado pelo programa de simulação computacional, onde a linha vermelha mostra em quanto tempo o ônibus com célula a combustível e hidrogênio proveniente do processo de reforma a vapor de etanol passa a ser economicamente viável em relação ao ônibus com MCI e diesel. O período de amortização calculado pelo sistema computacional foi em entre 1 e 2 anos, o mesmo período em que se observa nos cálculos da análise econômica, realizada no item anterior.

7. EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

7.1. Introdução

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), óxido de nitrogênio (NO_x) 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 pode poluir dependendo do processo. Neste capítulo é efetuada a análise da eficiência ecológica das seguintes formas de produção de hidrogênio: reforma a vapor de gás natural, reforma a vapor de etanol, eletrólise por água vertida em hidroelétrica (caso Itaipu) e eletrólise por turbina eólica.

A eficiência ecológica avalia de certo modo o quanto poluidor é um processo produtivo, considerando as emissões por combustível e a eletricidade utilizada, permitindo quantificar o quanto poluidor ou não poluidor é a produção de hidrogênio por diferentes processos, e conseqüentemente, o quanto é poluidor um veículo operando com sistema de célula a combustível, poluição indireta, já que a maior emissão de poluentes no uso desse tipo de transporte esta ligada com a produção do 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. Em 1999, CARDU e BAICA introduziram o conceito de Dióxido de Carbono Equivalente [(CO₂)e], baseando-se na concentração máxima permitida para o CO₂ na atmosfera, que é 10.000 mg/m³ (JUNIOR L.C.M, 2008) . Os coeficientes equivalentes para alguns poluentes, cuja a unidade é kg por kg de combustível (kg/kgc_{omb}), são calculados segundo a equação (7.1) (VILLELA et al, 2007).

$$(\text{CO}_2)_e = \text{CO}_2 + 80.(\text{SO}_2) + 50.(\text{NO}_x) + 67.(\text{MP}) \quad (7.1)$$

Para quantificar o impacto ambiental CARDU e BAICA (1999) propõem um indicador, definido como a razão entre o Dióxido de Carbono Equivalente do combustível e seu Poder Calorífico Inferior (PCI). A este indicador deu-se o nome de “Indicador de Poluição”, representado por Π_g , equação (7.2).

$$\Pi_g = \frac{(\text{CO}_2)_e}{\text{PCI}} \quad (7.2)$$

Onde:

$(\text{CO}_2)_e$ – Dióxido de Carbono Equivalente (kg/kgcomb)

PCI – Poder Calorífico Inferior do Combustível (MJ/kgcomb)

Π_g – Indicador de Poluição (kg/MJ)

Ao relacionar o dióxido de carbono emitido pelo processo de combustão com seu poder calorífico, CARDU e BAICA (1999) possibilitam comparações entre combustíveis heterogêneos. Mas um combustível pode possuir um poder calorífico alto e emitir uma grande quantidade de poluentes na atmosfera ou ter a emissão de gases nocivos desprezíveis ou nulos, mas não possuir a energia desejada para se obter uma boa eficiência no processo produtivo.

Partindo-se da hipótese que o melhor combustível é aquele que possuir o menor Indicador de Poluição, CARDU e BAICA (1999) 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 em relação à energia útil produzida por usinas termelétricas. O indicador proposto é denominado Eficiência Ecológica (ϵ), determinada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{[0,204 \times \eta_{sistema} \times \ln(135 - \Pi_g)]^{0,5}}{\eta_{sistema} + \Pi_g} \quad (7.3)$$

7.2. Eficiência Ecológica de Processos de Produção de Hidrogênio

7.2.1. Produção de Hidrogênio via Reforma a Vapor de Gás Natural

Foi calculada a eficiência ecológica para o processo de produção de hidrogênio por reforma de gás natural (Figura 35).

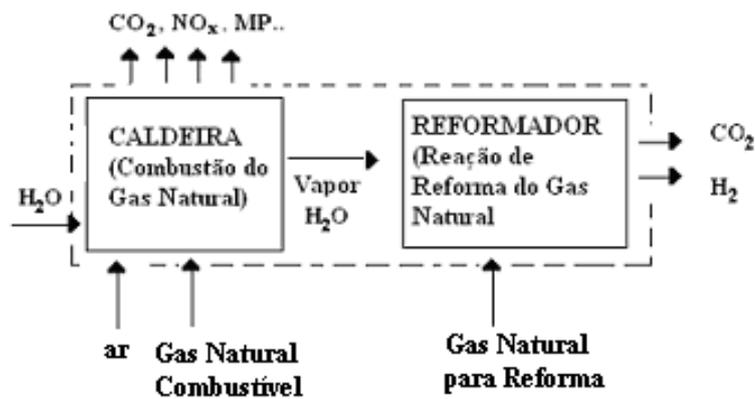
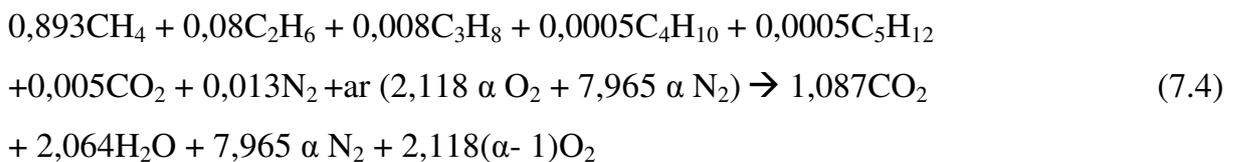


Figura 35 Sistema de produção de hidrogênio via reforma de gás natural.

Considerou-se para esses cálculos as equações estequiométricas de combustão de gás natural (Equação 7.4) e a equação global da reforma a vapor de gás natural (Equação 7.5).



Onde $\alpha = 1,20$ (considerando 20 % de excesso de ar na caldeira) (LORA E.E.S, 2004, QUIMICA, 2009)



Segundo as reações estequiométrica da combustão do gás natural (equação 7.4) e da reforma a vapor do gás natural (equação 7.5) têm-se as seguintes emissões demonstradas na Tabela 2:

Tabela 2: Emissões do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor de gás natural

Componentes	Combustão do Gas Natural (kg/kg GNq)	Reforma a vapor de Gas Natural (kg/kg GN)
CO ₂	2,703827237	2,487421561
SO ₂	0 *(VILLELA et al, 2007)	0
NO _x	0,003439394 (VILLELA et al, 2007)	0
MP	0,000363636 (VILLELA et al, 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 (Πg), considerando o PCI do gás natural= 47,966 MJ/kg (VILLELA, 2007).

$$[(\text{CO}_2)_e] = 5,38509471 (\text{kg/kg GN})$$

$$\Pi_g = 0,112268997 (\text{kg/MJ})$$

Para o cálculo de eficiência ecológica, necessita-se da eficiência total do processo de produção de hidrogênio. Considerou-se sendo o produto entre a eficiência da caldeira e a eficiência do reformador. A eficiência de uma caldeira operando com gás

natural é de 95% (LORA E.E.S, 2004) e a eficiência do reformador foi calculada segundo a Equação 7.6:

$$\eta_R = \frac{((m_{H_2} \cdot h_{H_2}) + (m_{CO_2} \cdot h_{CO_2}))}{((m_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) + (m_{GN} \cdot h_{GN}))} \quad (7.6)$$

Para o cálculo da eficiência do reformador, conforme a equação 7.6, foi necessário calcular as entalpias dos reagentes e dos produtos dessa reação na temperatura da reforma a vapor do gás natural (1073K) (VILLELA, 2007). Para esse cálculo ser possível, utilizou-se as equações 7.7, 7.9, 7.10 e 7.11 de acordo com ZAINAL Z.A. et al, (2000) e a equação 7.8 de acordo com JARUNGTHAMMACHOTE S. et al (2006).

$$dH_{(gases)} = H_{f298}^0 + AH \quad (7.7)$$

$$h_{f1073}^0 = n_{mols} \cdot dH \quad (7.8)$$

$$AH = C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (7.9)$$

$$C_p = R \cdot (A + B \cdot T_{am} + \frac{C}{3} \cdot (4T_{am}^2 - T_1 \cdot T_2)) + \frac{D}{T_1 \cdot T_2} \quad (7.10)$$

$$T_{am} = \frac{(298 + 1073)}{2} \quad (7.11)$$

A Tabela 3 indica os valores das constantes para o cálculo de Cp e o valor de

H_{f298}^0

Tabela 3: Capacidades caloríficas e entalpia de formação (Robert H.P. et al, 1984)

Fórmula	Tmax (K)	A	10 ³ B	10 ⁶ C	10 ⁻⁵ D	H _{f298} ⁰ (kJ/kmol)
CH ₄	1500	1,702	9,081	-2,164	-	-74520
H ₂	3000	3,249	0,422	-	0,083	0
CO	2500	3,376	0,557	-	-0,031	-110525
CO ₂	2000	5,457	1,047	-	-1,157	-356057,91
N ₂	2000	3,280	0,593	-	0,040	0
H ₂ O	2000	3,470	1,450	-	0,121	-285830

A Tabela 4 mostra as entalpias calculadas para componentes da reforma a vapor.

Tabela 4: Entalpias calculas para temperatura de 1073K

Fórmulas	Entalpias a 1073K (kJ/molK)
H ₂ O	-192615
CH ₄	-6474,53
CO ₂	-89012,5222
H ₂	17226,2986

Da equação 7.6, a eficiência calculada para o reformador de gás natural é de 54%, e a eficiência total do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor de gás natural foi obtida pelo produto entre a eficiência da caldeira e a eficiência do reformador, chegando-se a uma eficiência total do processo de produção de hidrogênio nessa essa modalidade de 51%.

Usando a Equação 7.3, chegou-se ao valor de eficiência ecológica de 90% para esse tipo de produção de hidrogênio.

7.2.2. Produção de Hidrogênio via Reforma a vapor de Etanol

A eficiência ecológica de um processo de produção de hidrogênio por reforma de etanol (Figura 36) assemelha-se com o calculo realizado com reforma a vapor de gás natural.

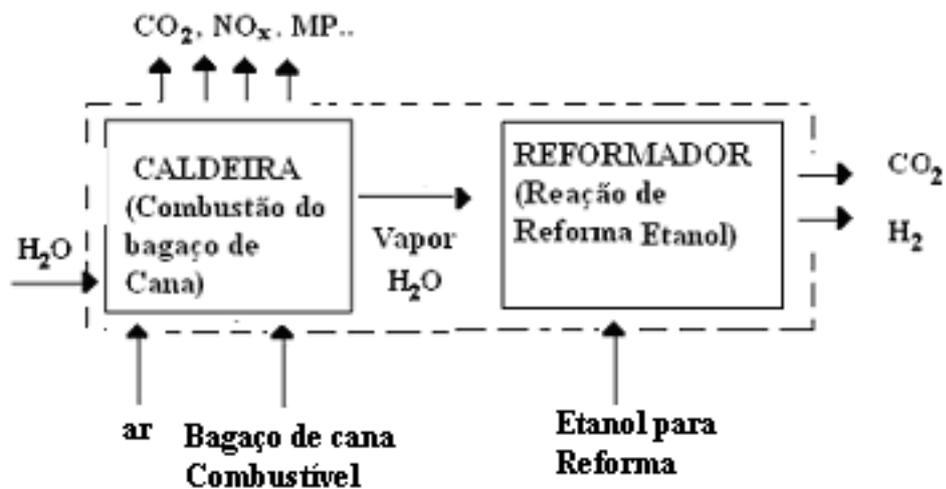
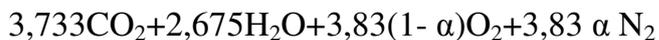
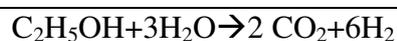


Figura 36 Sistema de produção de hidrogênio via reforma a vapor de etanol

Utilizando a equação estequiométrica de combustão do bagaço de cana (Equação 7.12), considerando a sua composição elementar e a equação global da reforma a vapor etanol (Equação 7.13), tem-se:.



Onde $\alpha = 1,30$ (considerando 30 % de excesso de ar na caldeira com bagaço de cana) (LORA E.E.S, 2004)



(7.13)

Segundo as reações estequiométricas da combustão do bagaço de cana (equação 7.12) e reação estequiométrica global da reforma a vapor de etanol (equação 7.13) têm-se as emissões indicadas na Tabela 5:

Tabela 5: Emissões do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor de etanol

Componentes	Combustão do Bagaço de Cana	Reforma a vapor de Etanol
CO ₂ (kg/kg BCq)	0,041452	0,366439
SO ₂ (kg/kg BCq)	0 (LORA E.E.S, 2007)	0
NO _x (kg/kg BCq)	0,0012 (LORA E.E.S, 2007)	0
MP(kg/kg BCq)	0,0071 (LORA E.E.S, 2007)	0

Com esses valores calcula-se o de Carbono Equivalente $[(CO_2)_e]$ e o Indicador de Poluição (Π_g), considerando o PCI do Bagaço de cana = 7,31 MJ/kg (SILVEIRA J.L. et al, 2008, SILVA M.E., 2005).

$$[(CO_2)_e]. = 0,903893 \text{ (kg/kgBCq)}$$

$$\Pi_g = 0,052248 \text{ (kg/MJ)}$$

Como foi calculado no processo de produção de hidrogênio por reforma a vapor de gás natural, para o cálculo de eficiência ecológica, necessita-se da eficiência total do processo, considerou-se essa sendo o produto entre a eficiência da caldeira e a eficiência do reformador. A eficiência de uma caldeira operando com bagaço de cana é de 85% (LORA E.E.S,2004) e a eficiência do reformador foi calculada segundo a Equação 7.14

$$\eta_R = \frac{((m_{H_2} \cdot h_{H_2}) + (m_{CO_2} \cdot h_{CO_2}))}{((m_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) + (m_{etanol} \cdot h_{etanol}))} \quad (7.14)$$

O cálculo da entalpia dos componentes na temperatura da reforma de etanol (1000K) foi calculado utilizando as mesmas equações utilizadas para o cálculos das entalpias dos componentes de reforma do gás natural (Equações de 7.7 a 7.11), porém para entalpia do etanol (por ser um combustível líquido) utilizou-se as equações 7.15 de ZAINAL Z.A.et al (2000) e 7.16 de (JARUNGTHAMMACHOTE S. et al (2006) a entalpia de vaporização do etanol considerada foi de 38,35kJ/mol (BROWN T.L et al, 2007):

$$dH_{(\text{liquido})} = H_{f298}^0 + H_{\text{vap}} \quad (7.15)$$

$$h_{f1000}^0 = n_{\text{mols}} \cdot dH \quad (7.16)$$

Os valores de entalpia encontrados estão demonstrados na Tabela 6:

Tabela 6: Entalpias calculadas para temperatura de 1000K

Fórmulas	Entalpias a 1000K (kJ/molK)
H ₂ O	-194884
C ₂ H ₅ OH	-59785
CO ₂	-89988,9
H ₂	15544,56

Segundo a equação 25, a eficiência do reformador de etanol foi de 58%, e a eficiência total do processo de produção de hidrogênio via reforma a vapor de etanol foi de 49%.

Segundo a equação 7.3, chegou-se a um valor de eficiência ecológica de 92% para esse tipo de produção de hidrogênio.

7.2.3. 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 do reservatório. Os índices de emissões em hidrelétricas foram avaliados e estão representados na Tabela 7.

O índice de emissão CO₂ e CH₄ de 9 hidrelétricas brasileiras kgCO₂/km²/dia, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7– Índice de emissão de CH₄ e CO₂ do reservatório de 9 hidrelétricas brasileiras (MCT,2009).

Hidrelétrica	Área km ²	Latitude	Potência MW	Índice de Emissão de CH₄ kg/km ² /dia	Índice de Emissão de CO₂ kg/km ² /dia	Emissões de Carbono kg/dia
Tucuruí	2.430	3°45'S	4.240	109,4	8475,0	2.603
Samuel	559	8°45'S	216	104,0	7488,0	538
Xingo	60	9°37'S	3.000	40,1	6138,0	42
Serra da Mesa	1.784	13°50'S	1.275	51,1	3973,0	895
Três Marias	1.040	18°13'S	396	196,3	1117,0	540
Miranda	51	18°55'S	390	154,2	4388,0	38
Barra Bonita	312	22°31'S	140	20,9	3985,0	137
Itaipu	1.549	25°26'S	12.600	20,8	171,0	93
Segredo	82	27°47'S	1.260	8,8	2695,0	23

O cálculo de eficiência ecológica de produção de hidrogênio em hidrelétrica (Figura 37) foi baseado na metodologia que vem sendo desenvolvida pelo Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos (www.feg.unesp.br/GOSE), da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá –UNESP. A produção de hidrogênio via eletrólise em

hidrelétrica (água vertida), considerará as emissões da hidrelétrica de Itaipu, devido ao custo do hidrogênio do item 6 (Análise Econômica), estar baseado na mesma hidrelétrica.

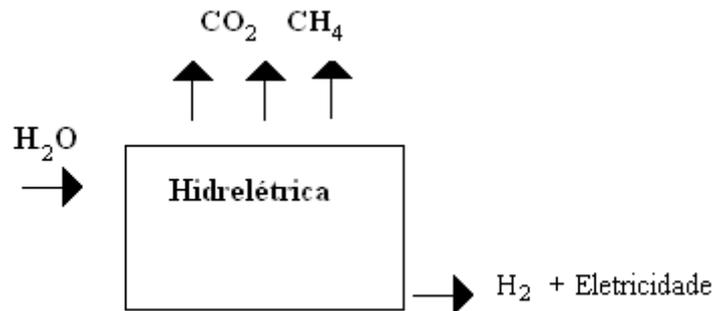


Figura 37 Sistema de obtenção de hidrogênio via hidrelétrica

Conforme equação 7.2, o indicador de poluição é obtido em função do (CO_2) e por PCI. No caso de hidroelétrica, não há combustível, mas por analogia, pode-se considerar a água equivalente ao combustível e a energia potencial disponível para a geração de eletricidade. Dessa forma, é possível, pela equação 7.17 calcular o Índice poluidor. Deve-se considerar a emissão de CH_4 sendo 21 vezes mais nociva que a emissão de CO_2 (BAMBACE L.A.W. et al, 2007), já que esse absorve 21 vezes mais radiação infravermelha que o CO_2 .

$$E_p = m \cdot g \cdot h^* \quad (7.17)$$

Logo, a massa de água expressa em kg/s, e é dada por:

$$m_{\text{agua}} = \frac{P}{\eta \cdot g \cdot h^*} \quad (7.18)$$

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/s^2 e h é a altura de queda, em m (no caso de Itaipu 117m)

O índice de emissão equivalente de CO₂ é calculado como sendo:

$$I_e(\text{CO}_2) = I_{\text{CO}_2} + 21 \cdot I_{\text{CH}_4} \quad (7.19)$$

A massa de CO₂ é obtida pela multiplicação do índice de emissão equivalente de CO₂ pela área do reservatório, ambos obtidos da Tabela 7.

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{I_{e\text{CO}_2} \cdot A}{86400} \quad (7.20)$$

O cálculo do (CO₂)_e é dado pela razão entre a massa de CO₂ e a massa do combustível, que no caso é a água. Assim o (CO₂)_e expresso em kg_{CO2}/kg_{Água}, é dado pela equação 7.21:

$$(\text{CO}_2)_e = \frac{m_{(\text{CO}_2)}}{m_{\text{água}}} \quad (7.21)$$

A energia específica da hidrelétrica E_{HID}, expresso em MJ/kg_{Água}, é calculado pela equação 7.22:

$$E_{\text{HID}} = \frac{E_p}{10^6 m_{\text{Água}}} \quad (7.22)$$

Onde E_p= energia potencial

A equação para o cálculo do indicador de poluição da hidrelétrica, Π_{gHid} adaptado e expresso em kg CO₂/MJ é dada por:

$$\pi_{g\text{Hid}} = \frac{(\text{CO}_2)_e}{E_{\text{Hid}}} \quad (7.23)$$

A eficiência ecológica é calculada segundo a equação 7.3.

Realizando os cálculos pelas equações citadas acima, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados dos cálculos de eficiência ecologia em hidrelétricas .
(no caso Itaipu-SP)

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

7.2.4. Produção de Hidrogênio via Eletrólise por Turbina Eólica

A eficiência ecológica da produção de hidrogênio via turbina eólica (Figura 38) 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

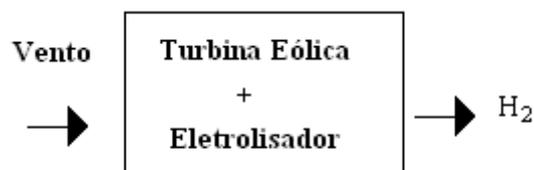


Figura 38 Sistema de obtenção de hidrogênio via turbina eólica

7.2.5. Comparação dos Processos de Produção de Hidrogênio

Pelos cálculos de eficiência ecológica da produção de hidrogênio por diversas fontes, obteve-se os valores apresentados na tabela 9. Os valores de eficiência ecológica também estão demonstrados na Figura 39.

Tabela 9: 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})	5,38509471	1,554322	3,40504E-07	0
Π g (kg _{CO2} /MJ)	0,112268997	0,089845	0,000291029	0
ε (%)	90%	92%	99%	~1

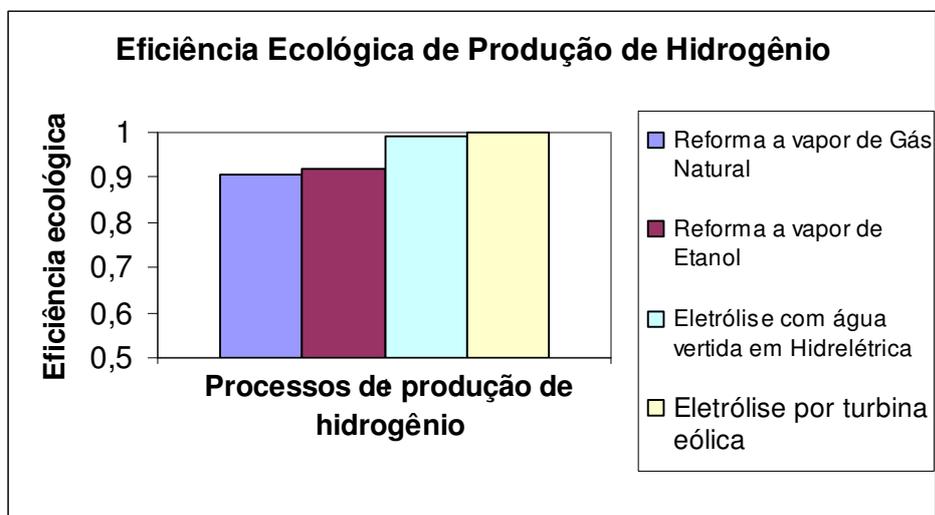


Figura 39 Eficiência ecológica de produção de hidrogênio.

Não foi considerada nos cálculos de eficiência ecológica 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 hidrogênio.

Não foi considerado para os cálculos de eficiência ecológica o crédito de carbono da cana de açúcar, porém, se for considerado o ciclo do etanol, a eficiência ecológica desse método de produção aumentaria.

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

8. CONCLUSÃO

Conclui-se através do estudo de veículos operando com célula a combustível e veículos operando com motor de combustão interna, que os veículos movidos com hidrogênio são uma alternativa para o transporte urbano, tornando melhor a qualidade de vida e ambiental do planeta.

Comparando com motores de combustão interna, os sistemas com células apresentam as seguintes 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 é de 48%;
- Com o controle eletrônico da aceleração e frenagem, o veículo é silencioso e sem “trancos”.

Apesar das diversas vantagens, ainda existem algumas barreiras que precisam ser quebradas para os transportes de célula a combustível competirem com os movidos a MCI. Peso e volume são obstáculos a serem contornados. O necessário seria, 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.

O hidrogênio, que alimenta a célula pode ser obtido por varias maneiras, mas como foi comprovado, o método de reforma a vapor de etanol é o melhor para garantir o volume de produção necessária no caso do Brasil. A integração da produção de hidrogênio com usinas de cana de açúcar, certamente podem colocar o Brasil em uma boa classificação na era do hidrogênio, num futuro próximo.

Conforme o estudo de viabilidade econômica, um ônibus com investimento de célula 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 de torna economicamente mais viável entre um período em 1 e 2 anos. Considerando-se ônibus

com célula a combustível utilizando as outras fontes de hidrogênio 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. Porém se forem incorporados nesses cálculos o crédito de carbono, até mesmo o ônibus com célula a combustível e hidrogênio a partir de eletrólise com turbina eólica, poderia se tornar mais viável economicamente que o ônibus com motor de combustão interna. Recomenda-se esse estudo detalhado como trabalho futuro.

Observando-se a tabela 9, fica claro que a melhor forma de obtenção do hidrogênio é a eletrólise com energia proveniente de eletrólise com 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 domínio de ambas tecnológicas e a potência hídrica do Brasil. Destaca-se ainda que se fosse incluído o ciclo da cana de açúcar nos cálculos de eficiência ecológica do hidrogênio obtido a partir do etanol, a eficiência ecológica por esse método aumentaria e se fosse considerada uma hidrelétrica de menor porte, a eficiência ecológica por esse método de obtenção de hidrogênio tenderia a aumentar, visto que o indicador de poluição seria maior (devido a menor massa de água).

Recomenda-se em um futuro trabalho a comparação entre os processos de produção de hidrogênio, considerando o ciclo do etanol, as emissões na fabricação do dispositivo eólico e a consideração de hidrelétricas de menor porte. Recomenda-se ainda incluir nos cálculos econômicos o crédito de carbono das diversas formas de produção de hidrogênio nos ônibus movidos com células a combustível em comparação com o ônibus movido a diesel.

9. BIBLIOGRAFIA

AMBIENTE BRASIL. Portal ambiente e energia. Disponível em <http://www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em 18 de dezembro de 2009.

AGENCIA FAPESP. Agencia de noticias da fundação de amparo à pesquisa do Estado de São Paulo Disponível em <http://www.agencia.fapesp.br> . Acesso em 18 de julho de 2009

AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. Disponível em <http://www.anp.gov.br/preco> . Acesso em 30 de dezembro de 2009

ANDÚJAR J.M., SEGURA F. Fuel Cell: History and updating. A walk along two centuries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Espanha, v13, p 2309-2322 , 2009

BAMBACE L.A.W., RAMOS F.M., LIMA I.B.T., ROSA R.R. Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams.**Energy**. v32, p1038-1046, 2007

BRAGA L.B, SOUZA A.C.C, SILVEIRA J.L, ANTUNES J.S Análise técnica e econômica para o uso de célula a combustível em ônibus. in: **Iberoamerican Workshop in Hydrogen and Fuel Cell**, 2008, Ubatuba.

BRAGA L.B., SOUZA A.C.C, SILVEIRA J.L, ANTUNES J.S., ZANZI R. O uso de célula a combustível em transporte urbano: benefícios do uso de hidrogênio a partir de reforma a vapor de etanol. In:**CLAGTEE 2009- Eighth Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission**, 2009,Ubatuba.

BUENO A.G. **A tração elétrica como alternativa para o transporte urbano.** 2004. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica -Engenharia automotiva)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BROWN T.L, LEMAY H.E.J, BURSTEN B.E., BURDGE J.R. **Química, a ciência central.** São Paulo. Pearson. 2007; 9 edição, 971p.

CARDU M., BAICA. M. Regarding a Global Methodology to Estimate the Energy-Ecologic Efficiency of Thermopower Plants. **Energy Conversion and Management**, v.40, p. 71-87, 1999

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL- Tipos de células a combustível. Disponível em <http://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-tipos>. Acesso em 07 de Outubro de 2009.

CETESB- Relatório do Inventário Estadual de Fontes Fixas: Emissões de CO₂ – Fontes Industriais e Combustíveis Fósseis- Disponível em www.cetesb.sp.gov.br. Acesso em: 08 de Agosto de 2009

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE DO GOVERNO DA AUSTRÁLIA- Disponível em <http://www.transport.wa.gov.au/greentransport/19531.asp>. Acesso em 09 de Novembro de 2009.

DOTY F.D. A Realistic Look at Hydrogen Price Projections. 2004. Doty Scientific Columbia, 2004 . Disponível em http://www.dotynmr.com/gen/gen_publications.htm. Acesso em 05 de Agosto de 2008.

FERREIRA P.F., Araújo, P D.; Lopes, D.G. e Silva, E. **Produção de Hidrogênio Utilizando Energia Vertida Turbinável de Itaipu: Cálculo de Custos e Comparação com o Gás Natural na Cidade de São Paulo.** 2003.

FUEL CELL. Fuel Cell Today- Disponível em <http://www.fuelcelltoday.com>. Acesso em: 08 de Outubro de 2009.

FUEL CELL PARTNERSHIP, Disponível em :
<http://www.fuelcellpartnership.org/node/82> Acesso em: 05 de Setembro de 2009.

GODOY G.A.R. **Aproveitamento da Energia Vertida Turbinável da UHE Itaipu para Uso em Ônibus a Hidrogênio:Estudo de Caso em Foz do Iguaçu.**2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica- Planejamento de Sistemas Energéticos)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas,2008.

HARALDSSON K., FOLKESSON A., ALVFORS P., A first Report on the attitude towards hydrogen fuel cell buses in Stockholm.**International Journal of Hydrogen Energy**, Etocolmo, v 31, p 317-325, 2005.

HARTMUT W., MICHAEL G., MARCELO L. Tecnologia de células a combustível, **Química Nova**, vol.23, n.4,São Paulo, 2000

Hy FLEET CUTE. Disponível em: <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/About/History/ECTOS> . Acesso dia 12 de Outubro de2009.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Disponível em:
<http://www.inovacaotecnologica.com.br>. Acesso dia 20 de novembro de2009

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em:
<http://www.ipcc.ch/>. Acesso em 09 de Setembro de 2009.

JARUNGTHAMMACHOTE S., DUTTA A. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of downdraft waste gasifier. **Energy**. Tailandia. V.32, p.1660-1669. 2006

JOHANSEN H. D. **A 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, 2006

JOHNSTON B., MAYO M.C., KHARE A. Hydrogen:energy souce for the 21st century. **Technovation**, Canada, v 25, p 569-585, 2005.

JUNIOR L.C.M **Sistema de ar condicionado por absorção para ônibus.**2008. Dissertação (Doutorado Engenharia Mecânica)- Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

KRUGER P.. Electric power requeriment for large-scale production of hydrogen fuel for theworld vehicle fleet. **International Journal of Hydrogen Energy**. USA, vol.26: 1137-1147, 2001.

LONGO M.A.V., LAZZARIN N., MIGUEZ T.A. **Produção Biológica de Hidrogênio**, Trabalho de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Disponível em: <http://www.enq.ufsc.br>. Acesso em 17 de Novembro de 2009

LORA E.E.S, NASCIMENTO M.A.R.**Geração terméletrica- Planejamento, Projeto e Operação.**Rio de Janeiro: Interciencia, 2004, vo l, 631p.

MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/21458.html>. Acesso em 20 de novembro de 2009.

MIDILLI A., AY M., DINCER I., ROSEN M.A., On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2005; 9; 255–271

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA: Hydrogen Fuel Cell Buses For Urban Transport. Disponível em :http://www.pnud.org.br/projetos/meio_ambiente. Acesso 15 de Setembro de 2008.

MME, Ministério das Minas e energia. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso 12 de Fevereiro de 2010.

MUDANÇAS CLIMATICAS. Solução ambiental. Disponível em <http://www.munduscarbo.com/mudancas.html>. Acesso em: 20 de Agosto de 2009.

NETO E.F.G. **Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: A Era do Hidrogênio**, das Energias Renováveis e das Células a Combustível. Curitiba, Brazil: H2 Fuel Cell Energy; 2005.

OMER A.M. Energy, Environment and Sustainable Development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2008; 12; 2265–2300

PADRÓ C., PUTSCHES V. Survey of Economics of Hydrogen Technologies. National **Renewable Energy Laboratory Study**. NREL/TP- DOE-570-27079, September 1999.

PROJETO BRASILEIRO.-BRA/99/G32. Disponível em http://www.pnud.org.br/projetos/meio_ambiente/visualiza.php?id07=105. Acesso em 21 de Junho de 2009

QUIMICA. Química e derivados. Disponível em <http://www.quimica.com.br>. Acesso em 10 de novembro de 2009

RICARDO A., **Célula a Combustível a Hidrogênio: Fonte de Energia da Nova Era**. - São Paulo: Editora Artliber, 2004

ROBERT H.P., DON W.G. **Perry's chemical engineers' handbook**. 6 ed. Nova York: McGraw Hill, 1984

SANTARELLI M.G.L., CALI M., BERTONASCO A. Different Fuelling Technologies for Urban Transport bus Service in an Italian Big Town: Economic, Environmental and Social considerations. **Energy Convers Manage**, vol.44 (14);p 353-70, 2002.

SANTOS F.M.S.M. O Combustível "Hidrogenio". Escola Superior deTecnologia do Instituto Superior Politécnico de Viseu.

Disponível em: <http://www.ipv.pt/millennium/Millennium31/15.pdf>. Acesso em 17 de novembro de 2009.

SAXE M., FOLKESSON A., ALVFORS P. Energy system analysis of fuel cell buses operated in the project: Clean Urban Transport of Europe. **Energy**, v 33(5);p 689-711, 2008.

SILVA M.E.; **Análise Termoquímica de Reformador de Etanol: Produção de Hidrogênio para Acionamento de uma Célula a Combustível do tipo PEM de 1kW**. Guaratinguetá 2005, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

SILVEIRA J.L., BRAGA L.B., SOUZA A.C.C., ANTUNES J.S., ZANZI R. The benefits of ethanol for hydrogen production in urban transport. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v 12, p 2525-2534, 2009

SILVEIRA J.L., GOMES LA. Fuel Cell Cogeneration System: A Case of Technoeconomic Analysis. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v3; p 233-242, 1999.

SILVEIRA J. L., SOUZA A. C. C., SILVA M. E. Thermodynamic Analysis of Direct Steam Reforming of Ethanol in Molten Carbonate Fuel Cell. **Journal of Fuel Cell Science and Technology**, v. 5, p. 021012, 2008

SORDI A. Hidrogênio e células a combustível.. Disponível em www.ld.utfpr.edu.br/semanadomeioambiente/2008/.../Minicurso_H2.pdf. Acesso em 24 de agosto de 2009.

SOUZA A.C.C. **Análise Técnica e Econômica de um Reformador de Etanol para Produção de Hidrogênio**. Guaratinguetá 2005, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

SOUZA A.C.C., SILVEIRA J.L., SOSA M.I. Physical-Chemical and Thermodynamic Analyses of Ethanol Steam Reforming for Hydrogen Production. **J. Fuel Cell Sci Technology**. v3(3); p346-50, 2006

THOMAS S., ZALBOWITZ M. Fuel cell-Green Power. (U.S. Department of Energy) Disponível em : <http://www.lanl.gov/orgs/mpa/mpa11/Green%20Power.pdf>. Acesso 09 de Setembro de 2008.

TORRES F.S. **Análise Técnica e Econômica de Células de Combustível Aplicadas a Veículos Automotores**. Trabalho de graduação Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, Brasil, 2002.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Energy efficiency & renewable energy Disponível em <http://www1.eere.energy.gov> Acesso em 03 de julho de 2009

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. How They Work: PEM Fuel Cells. Disponível em http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_pem.shtml. Acesso em 08 de junho de 2008.

VALOR ONLINE. Valor do dólar online. Disponível em <http://www.valoronline.com.br>. Acesso em 30 de dezembro de 2009.

VILELA I. A. C. **Desenvolvimento de um Modelo Termodinâmico que Considera os Impactos Ambientais**, 2007. 145f. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

VILLELA I.A.C., SILVEIRA J.L. Ecological efficiency in thermoelectric power plants. **Applied Thermal Engineering**. v27, p 840-847. 2007.

ZAINAL Z.A., ALI R., LEAN C.H., SEETHARAMU K.N. Prediction of performance of downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. **Energy Conversion & Management**. Malasia v 43, p1499-1515,2001

ZOULIAS E.I., GLOCKNE R., LYMBEROPOULOS N., TSOUTSOS T., VOSELER I., GAVALDA O., MYDSKE H.J., TAYLOR P. Integrated Transport and Renewable Energy Systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 10; p 432–462, 2006.